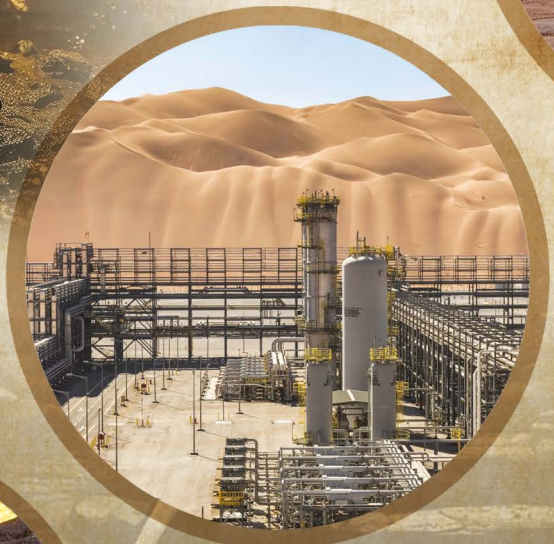
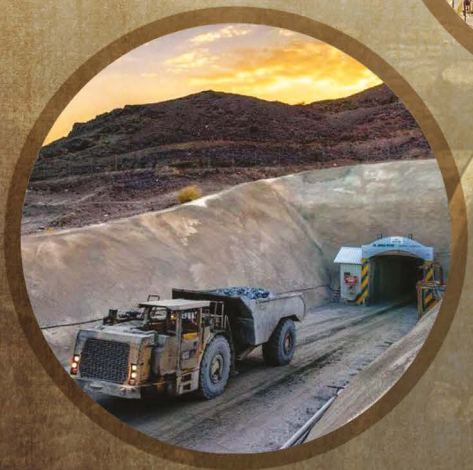
# موسوعة العمري

# في التعدين والطاقة

عبدالله بن محمد العمري





ح عبد الله بن محمد العمري، ١٤٤٥هـ

*فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر*

العمري ، عبدالله بن محمد

موسوعة العمري في التعدين والطاقة. / عبدالله بن محمد العمري -

ط١..- الرياض، ١٤٤٥هـ

١٠٠٨ صفحة ، ٢١ X ٢٧ سم

ردمك: ٣-٠٥٣٣-٠٥-٦٠٣-٩٧٨ رقم الإيداع ٢٠٣٥٣ / ١٤٤٥

**حقوق الطبع محفوظة للمؤلف**

**الطبعة الأولى**

**١٤٤٥هـ / ٢٠٢٤م**

العبيكان للنشر
Obeikan Publishing

**للاستفسارات والملاحظات: الاتصال على المؤلف**

alamri.geo@gmail.com

www.alamrigeo.com

**هاتف :** +966505481215

جميع الحقوق محفوظة، ولا يسمح بإعادة إصدار هذه الموسوعة أو نقلها في أي شكل أو واسطة، سواء أكانت إلكترونية أو ميكانيكية بما في ذلك التصوير بالنسخ (فوتوكوبي)، أو التسجيل، أو التخزين والاسترجاع، دون إذن خطي من المؤلف.

بسم الله الرحمن الرحيم

# شكر وتقدير

الحمد والشكر لله الذي ساعدني في إنجاز هذا المجهود المرتبط بتأليف **موسوعة التعدين والطاقة**. ربّما لا تُسعفني الكلمات في قول كلمة الحق في زملائنا الأفاضل، فأنتم خيرة الخيرة، ولولا جهودكم الحثيثة ومشاركتكم الدؤوبة ودعمكم اللامحدود ما كان لهذه الموسوعة أن تخرج بهذا الشكل، ونخص بالشكر د. سائر بصمة جي، د. مشاعل آل سعود، د. خالد العيسى، د. ناصر الخمشي، د. ثامر العتيبي، على مساهماتهم ومشاركتهم المميزة في الإضافة والتعديل في فصول هذه الموسوعة كل حسب اختصاصه.

الشكر موصول أيضاً لكل من ساهم في المراجعة والإخراج والتصميم ونخص بالشكر م. عبد الرزاق الحربي، أ. يحيى إبراهيم، أ. حسام تفاحة، أ. عمرو محي الدين.

**أما عائلتي الصغيرة** - الوالدة والزوجة والأبناء - فهم في سويداء القلب ولهم من الشكر أخلصه على وقوفهم ودعمهم اللامحدود.

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

# تمهيد

تم بحمد الله الانتهاء من تأليف **خمس موسوعات** علمية متخصصة وشاملة ترتبط بتاريخ العلوم بصفة عامة وعلاقة علوم الأرض بصفة خاصة بالفضاء والبيئة والمياه والتعدين والطاقة والمخاطر الطبيعية. تهدف هذه الموسوعات المدعمة بالصور والأشكال التوضيحية إلى خدمة الباحثين وطلاب التعليم العام والجامعات وفئات المجتمع كافة، نظرا لندرة المراجع العربية في هذا المجال.

## تغطي الموسوعات تحديدًا المجالات التالية:

| الموسوعة | الوصف |
|---|---|
| تاريخ العلوم | في 1080 صفحة، تبحث التسلسل التاريخي والزمني في أصول عشرة علوم معرفية مزودة بالمخطوطات والوثائق القديمة عن تاريخ الطب والصيدلة، تاريخ علم الأرض (الجيولوجيا)، تاريخ الكيمياء، تاريخ الفيزياء، تاريخ الفلك، تاريخ الرياضيات، تاريخ الجغرافيا، تاريخ النبات، تاريخ الحيوان، وأخيرًا تاريخ فن العمارة والهندسة. |
| الأرض والفضاء | في 965 صفحة، تناقش علوم الأرض والفضاء والعلاقة بينهما ودور المساهمات العلمية في استكشاف الفضاء والرحلات المكوكية. تغطي عمر الأرض وشكلها وحركاتها وتركيبها الداخلي وثرواتها المعدنية والتعدينية والجاذبية الأرضية بالإضافة إلى علاقة الأرض بالمجموعة الشمسية وبالأخص دور القمر ومنازله في ظاهرة المد والجزر وعلاقته بظاهرتي الخسوف والكسوف. دور البحار والمحيطات في الحفاظ على النظام الأرضي والبيئي. |
| البيئة والمياه | في 988 صفحة، تناقش كل ما يتعلق بالبيئة والمياه والمشاكل البيئية وحلولها والتفاعلات بين الأغلفة الجوية والمائية والحيوية المحيطة بالأرض، التغيرات المناخية وأهمية التشجير ومعالجة الاحتباس الحراري ودور الأمطار والسيول والسدود في النظام المائي. تقنين الإدارة المتكاملة للموارد المائية والاستفادة منها وتطوير أساليب تنميتها والحفاظ عليها. |

| الموسـوعـة | الوصـــف |
|---|---|
| المخاطر الطبيعية | في 1112 صفحة، تغطي كل ما يتعلق بالمخاطر الطبيعية وإدارتها وكيفية التعامل معها والتقليل من مخاطرها بالتركيز على الزلازل والبراكين والتسونامي والفيضانات والانزلاقات والانهيارات الأرضية والتصحر والجفاف ودورها في التأثير على بنية الأرض وبيئتها. |
| التعدين والطاقة | في 1008 صفحة، تناقش مصادر الثروات المعدنية والتعدينية والطاقة الغير متجددة (طاقة النفط والفحم والصخر الزيتي) والمتجددة صديقة البيئة (طاقة الشمس وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية والطاقة الحرارية الأرضية وطاقة من البحار) بالإضافة الى الطاقة النووية وطاقة الهيدروجين ومدى تأثير هذه المصادر على الطبيعة اقتصاديا وبيئيا والتحديات التي تواجه الاستثمار الأمثل لها. |

**الموسوعات والكتب والأبحاث العلمية والتقارير الفنية والمحاضرات وغيرها في متناول الجميع على الروابط:**

www.alamrigeo.com/encyclopedia/
www.alamrigeo.com/books/
www.alamrigeo.com

المؤلف / عبدالله بن محمد العمري

www.alamrigeo.com

# تقديم

بقلم / صاحـــب الســـمو الملكـــي

## الأمير عبدالعزيز بن سلمان آل سعود

### وزير الطاقة

إنّ تأسيس قاعدة للمعرفة والبيانات وتوثيق الإنجازات لهو أمر في بالغ الأهمية، إذ يساهم في بناء وتطوير الأمم وتقدمها، ولقد كرست المملكة العربية السعودية جهوداً كبيرة في هذا الصدد عبر تاريخها الممتد من خلال رحلات الاستكشاف لمواردها الطبيعية وجهود المؤسسات العلمية في البحث والتحليل. ومن نتائج هذه الجهود، يسرني أن أقدم للمهتمين هذا العمل العلمي النافع «موسوعة العمري في التعدين والطاقة» التي جاءت بمبادرة فردية من الأستاذ الدكتور عبدالله العمري، المتخصص في العلوم الجيولوجية، وتعتبر هذه الموسوعة مرجعاً شاملاً يعكس تطور الحضارة البشرية وتقدمها في هذين القطاعين كمورد إستراتيجي ومحرك رئيس للاقتصاد العالمي.

وفي ظل التحديات الكبيرة التي تواجه قطاع التعدين والطاقة والاستدامة، تبرز أهمية الوعي والمعرفة، وهنا يأتي دور هذه الموسوعة الشاملة، التي تضع بين يدي القارئ معلومات دقيقة ومحدثة عن مصادر التعدين والطاقة المختلفة، وتأثيرها على البيئة والاقتصاد، وكذلك تقنيات استخراجها واستخدامها بكفاءة. وأتطلع بشغف لما سيتم تحقيقه في المستقبل من نجاحت في المملكة العربية السعودية كدولة رائدة ومؤثرة في قيادة العالم في هذين القطاعين عبر رؤيتها الطموحة في صناعة الطاقة النظيفة من خلال مبادرات الطاقة المتجددة و الهيدروجين الأخضر والتي تبنت فيها العمل على تحقيق اقتصاد صفري من الانبعاثات الكربونية.

إنّ هذا النتاج المعرفي للدكتور عبدالله العمري ليس فقط إسهامًا علميًا مهمًا، بل هو أيضًا إرثٌ يتركه للأجيال القادمة، ليستفيدوا منه في بناء مستقبلٍ أفضل وأكثر استدامة لأوطانهم، وهو دليلٌ على التزامه الراسخ بخدمة المجتمع وإثراء الكتاب العربي. وأختتم تقديمي هذا بالشكر الجزيل للدكتور العمري على جهوده الجبارة في إنجاز هذا العمل العظيم، ولجميع الذين ساهموا في تحقيقه وتنفيذه.

# مُقدِّمة

وفي الوقت الحاضر، يعاني قطاع التعدين من نقص التمويل بشكل خطير. إن الإحجام عن الاستثمار في التعدين قد يؤدي إلى إبطاء تحول الطاقة. تعتبر العديد من منتجات التعدين أساسية لإنتاج تقنيات الطاقة النظيفة، يستخدم الكوبالت والليثيوم والنحاس في البطاريات. إن توربينات الرياح والألواح الشمسية ومحطات الطاقة الحرارية الأرضية مصنوعة إلى حد كبير من الفولاذ، والذي يعتمد في استخلاص الحديد ومعالجته. بينما تشمل المعادن المستقبلية منخفضة الانبعاثات الكربونية الليثيوم وخام الحديد والمنغنيز والألومنيوم والنيكل والرصاص والجرافيت. لكن المعدن الأكثر أهمية الذي سيمكن من كهربة وتنقل الإلكترونات هو النحاس. يعد النحاس أمرًا بالغ الأهمية للسيارات الكهربائية، ونقل الطاقة وتخزينها، وتقنيات الطاقة المتجددة التي تسخر الشمس والرياح. ومن الجدير بالذكر أن صناعة الإلكترونيات تعتمد أساسا على المعادن التي تستخرجها شركات التعدين إلا أن المدهش حقا والمثير للدهشة أن القيمة السوقية لشركة Apple تبلغ ضعف القيمة السوقية لأكبر 50 شركة تعدين مدرجة. ومن المتوقع زيادة الطلب بمقدار 12.2 مليون طن على المعادن التي تتحول إلى طاقة بين عامي 2020م و2040م.

يعد التعدين ضروريًا لانتقال الطاقة في العالم وتساعد التقنيات الحديثة في تمكين التعدين المستدام في المستقبل ويتطلب تطوير مناجم الغد استراتيجيات طاقة ذات تفكير مستقبلي ودمج حلول الطاقة الناشئة في عمليات اليوم. لقد أصبحت الوسائل متاحة تقريبا: فقد أصبحت الابتكارات التكنولوجية الناشئة القادرة على تغيير قواعد اللعبة أكثر قابلية للاستمرار من الناحية المالية. هناك فرصة لشركات التعدين لإعادة تشكيل الطريقة التي يتم بها تصميم المناجم وتوجيه استراتيجيات الطاقة نحو تحولات تحويلية أوسع. تعزيز مستقبل التعدين: من تكنولوجيا الطاقة

إلى التصميم الأساسي يستكشف الديناميكيات الحالية حول الطاقة والحواجز التي تحول دون دمج تكنولوجيا الطاقة بنجاح، ويقدم حلولاً للقادة الذين يسعون جاهدين لتشكيل منجم المستقبل. حيثما يوجد عدم اليقين، هناك فرصة. لا يمكن أن يحدث تحول الطاقة بالسرعة التي نحتاجها ما لم نتبنى تقنيات أفضل لتصميم وتشغيل مناجم التعدين. ومن الممكن أن يكون للتقنيات التي تساعد الإنتاجية تأثير كبير مماثل على تحول الطاقة.

من الصعب التنبؤ بالمستقبل، أن قطاع الطاقة بحلول عام 2024م سيبدو مختلفًا بشكل كبير عما هو عليه اليوم. وفي حين ستستمر الشركات في إنتاج الوقود الأحفوري، فإن مصادر الطاقة المتجددة يمكن أن تمثل ما يقرب من 70 % من مزيج الطاقة في العالم، في حين ستنبعث كمية أقل من الكربون في الهواء بنسبة 80 % تقريبًا. سوف يرتفع الطلب العالمي على الطاقة بنحو 28 % من الآن وحتى عام 2040م. إن الوصول إلى هذه النقطة لن يكون سهلا. في الوقت الحالي، أحد التحديات الكبيرة التي تواجه الصناعة هو إزالة الكربون من إنتاج الطاقة، إما عن طريق إدخال المزيد من مصادر الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة العالمي، أو إنتاج الوقود الأحفوري بطريقة أكثر كفاءة من الناحية البيئية، أو تقليل كمية الكربون في الهواء. ومن أجل الانتقال إلى كوكب خالٍ من الكربون ويعمل بالطاقة المتجددة بحلول عام 2040م، يجب على الشركات والأوساط الأكاديمية ومراكز الأبحاث تركيز جهودهم والبحث عن طرق أكثر إبداعًا لتسريع هذه العملية.

يخلص مؤشر تحول الطاقة، الذي يقيس أداء 120 دولة بشأن أداء أنظمة الطاقة الحالية ومدى جاهزية بيئتها التمكينية، إلى أنه على الرغم من إحراز تقدم واسع في مجال الطاقة النظيفة والمستدامة، إلا أن هناك تحديات ناشئة أمام التحول والوصول إلى الطاقة بأسعار معقولة والتنمية الاقتصادية المستدامة بسبب تحويل البلدان تركيزها إلى أمن الطاقة. إن تسريع نشر مصادر الطاقة المتجددة يمكن أن يعزز

حصولها على الطاقة وأمنها، ويقلل الاعتماد على الوقود الأحفوري، ويحقق أهداف خفض الانبعاثات الصفرية إلى الصفر.

وعموما تشير آفاق الاقتصاد العالمي الحالية الى استراتيجية عالمية لوضع العالم على المسار الصحيح بحلول عام 2030م وتتلخص في خمس ركائز أساسية: مضاعفة القدرة العالمية المتجددة ثلاث مرات؛ ومضاعفة معدل التحسينات في كفاءة استخدام الطاقة؛ وخفض انبعاثات غاز الميثان الناتجة عن عمليات الوقود الأحفوري بنسبة 75 %؛ وآليات تمويل مبتكرة وواسعة النطاق لزيادة استثمارات الطاقة النظيفة إلى ثلاثة أضعاف في الاقتصادات الناشئة والنامية؛ واتخاذ التدابير اللازمة لضمان التخفيض المنظم في استخدام الوقود الأحفوري.

تناقش هذه الموسوعة في الخمسة فصول الأولى مصادر الثروات المعدنية والتعدينية والاقتصاد الدائري وسلاسل قيم المعادن بالإضافة الى تقييم الإثر البيئي على النشاط التعديني ونختتم الجزء الأول من الموسوعة عن أبرز التحديات التي تواجه المملكة في مجال صناعة التعدين والاستراتيجيات المتبعة للتغلب عليها. بينما تشتمل الأربعة فصول الأخيرة من الموسوعة على مصادر الطاقة الغير متجددة (طاقة النفط والفحم والصخر الزيتي) والمتجددة صديقة البيئة (طاقة الشمس وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية والطاقة الحرارية الأرضية وطاقة من البحار) بالإضافة الى الطاقة النووية والهيدروجين الأخضر وتقييم الأثر البيئي على الطاقة المتجددة والغير متجددة. آلية مجابهة التحديات التي تواجه استثمار الطاقة وتطويرها واستداماتها عمومًا والمملكة بصفة خاصة بالإضافة إلى سبل تطبيق الاقتصاد الدائري وسلاسل التوريد والقيم تمت مناقشتها بإسهاب في الفصل التاسع من الموسوعة.

نأمل أن يكون هذا العمل الموسوعي جامعًا لكل ما يتعلق بموضوع التعدين والطاقة، وأن يسد ثغرة مهمة في المكتبة العلمية العربية.

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

## المحتويـــات


| | |
|---|---|
| • شـــكر وتقديـــر | v |
| • تمهيـــد | vii |
| • تقديـــم | ix |
| • مقدمـــة | xi |
| **الفصـــل الأول**<br>**تاريـــخ المعـــادن والتعديـــن** | 1 |
| مقدمـــة | 3 |
| • المعـــادن والتعديـــن عند الحضارات القديمة | 5 |
| ◆ المصريـــون القدمـــاء | 12 |
| ◆ بـــلاد الرافدين | 15 |
| ◆ اليونـــانيـــون | 18 |
| ◆ العلمـــاء العـــرب والمســـلمون | 20 |
| • التعديـــن في مرحلة ما بعد عصر النهضة | 24 |
| • تأثير علم المعـــادن العربي على أوروبـــا | 26 |
| • تقنيات التعديـــن في الحضارة الإسلامية | 27 |
| • تقنيـــات التعديـــن قديماً وحديثاً | 29 |
| • التعديـــن الهيدروليـــكي | 31 |
| • تقنيـــة «تحطـــيم الجبـــل» | 34 |

| الفصـــل الثانـي<br>المعـــادن والخامـــات الاقتصاديـــة | 41 |
|---|---|
| مقدمـــة | 43 |
| • تصنيـف المعـــادن | 46 |
| • كيـــف تتكـون المعـادن | 53 |
| • المعـادن المكونـة للصخـور | 56 |
| • خصائـص المعـــادن | 62 |
| • الخـامـــات | 63 |
| • تصنيف الخـامات المعدنيـة | 67 |
| • الأحجـار الكريمـة | 70 |
| • تشـكل الأحجـار الكريمـة | 72 |
| • أنـواع الأحجـار الكريمـة | 80 |
| • الأهمية الاقتصادية للخامات | 83 |
| • خامـات السبائك الحديديـة | 85 |
| • صناعـة وهندسـة المعـادن | 87 |
| • أنـواع العمليـات المعدنيـة | 88 |
| ◆ علـم المعـادن الكيميائـي | 89 |
| ◆ علـم المعـادن الميكانيكـي | 92 |
| ◆ علـم المعـادن الفيزيائـي | 94 |
| • معالجـة المعـادن | 101 |
| • عمليات تنقيب واستكشاف المعـادن | 114 |

| الفصـــل الثالـــث<br>تقنيـــــات ومراحـــــل التعديـــــن | 143 |
|---|---|
| مقدمـــــة | 145 |
| • عمليـــات التعديـــن | 148 |
| • مراحـــل التعديـــن | 149 |
| • تقنيـــات التعديـــن | 152 |
| ◆ التعديـــن السطحـــي | 152 |
| ◆ التعدين الجوفي | 154 |
| • التعديـــن الحيـــوي | 156 |
| • تأثير عمليات التعديـــن على البيئة | 160 |
| • تقديـــر المـــوارد المعدنيـــة | 162 |
| ◆ طريقة التقدير بالمضلعات | 163 |
| ◆ طريقة التقدير بالتثليث | 165 |
| ◆ طريقة المقطع العرضي | 167 |
| • التعديـــــن في البحـــــار | 174 |
| ◆ مزايا وعيوب التعدين في المحيطات | 175 |
| ◆ أنواع معادن المحيطات | 179 |
| • التعديـــن في الفضاء الخارجي | 197 |
| • ســـلامـة المناجـــم | 218 |
| • التخطيط لإغلاق مناجم التعديـــن | 240 |

| الفصـــل الرابـــع<br>مستقبل صناعـــة التعديـــن | 253 |
|---|---|
| مقدمـــة | 255 |
| • الاتجاهات الحديثة في التعديـــن | 259 |
| • الاتجاهات المستقبلية في صناعة التعدين | 263 |
| ◆ التغـــير المناخـــي | 263 |
| ◆ اســـتهلاك الطاقـــة | 266 |
| ◆ الأتمتـــة Automation | 268 |
| • تحديـــات صناعة التعديـــن | 272 |
| • اقتصاديات صناعة التعديـــن | 278 |
| • الفوائد الاقتصادية لمخلفات التعديـــن | 310 |
| • الاقتصاد الدائري | 321 |
| • الاقتصاد الدائري وسلاسل القيم | 329 |
| • التعدين والتنمية المستدامة | 337 |
| • سلاســـل قيم المعـــادن | 343 |
| • دور الذكـــاء الاصطنـــاعي في التعديـــن | 354 |
| • تقييم الأثر البيئي في صناعة التعديـــن | 365 |
| • التأثـــيرات الفيريائيـــة | 371 |
| • نظم الإدارة البيئية في التعدين | 382 |
| • التعدين وقضايا المجتمع | 389 |
| • البحث والتطوير في صناعة التعديـــن (R&D) | 400 |

| الفصـــل الخامـــس<br>مستقبل صناعة التعدين في المملكة | 407 |
|---|---|
| مقدمـــة | 409 |
| • نظـــرة تاريخيـــة | 412 |
| • أهمية الإستثمار في القطاع التعديني | 419 |
| ◆ المعوقات والتحديات التي تواجه قطاع التعدين | 421 |
| • آلية الإســتثمار في القطاع التعـديني | 424 |
| • التعدين في المملكة | 429 |
| • المعادن والصخور الإقتصادية في المملكة | 434 |
| • رواسـب المعـــادن الفلزيـــة | 438 |
| • رواسب المعـــادن اللافلزية | 449 |
| • الأحجـــار الكريمـــة في المملكـــة | 465 |
| • الاستثمار الاستراتيجي في قطاع التعدين | 477 |
| • استراتيجية شركة «معـــادن» حتى عام 2040م | 481 |
| • مشاريع هيئة المساحة الجيولوجية في مجال التعديـــن | 489 |
| • قطـــاع التعديـــن: التحديـــات والحلـــول | 495 |
| • دور الاقتصـــاد الدائـــري في صناعـــة التعديـــن | 501 |
| • عوائـــق تطبيـــق واســـتثمار الاقتصاد الدائري | 509 |
| ◆ سلاسل قيم المعادن في المملكة | 511 |
| • المملكة العربية السعودية: نحو اقتصاد أخضر | 514 |
| • خارطة الطريق لتحقيق رؤيـــة المملكـــة 2030م | 515 |

| الفصـــل الســـادس<br>الطاقـــة المتجـــددة | 521 |
|---|---|
| مقدمـــة | 523 |
| • الطاقـــة الشمســـية | 527 |
| ◆ التســـخين بالطاقـــة الشمسية | 531 |
| ◆ الخلايـــا والألـــواح الشمسيـــة | 534 |
| ◆ الطاقة الحرارية الشمسية | 544 |
| • تقييم الأثر البيئي للطاقة الشمسية | 545 |
| • طاقـــة الريـــاح | 548 |
| ◆ توربينـــات الريـــاح | 550 |
| ◆ تقييـــم الأثـــر البيئي لطاقـــة الريـــاح | 556 |
| • الطاقـــة الكهرومائيـــة | 558 |
| ◆ النواعير المائيـــة | 560 |
| ◆ التوربينـــات المائيـــة | 562 |
| ◆ تقييم الأثر البيئي للطاقة الكهرومائية | 565 |
| • الطاقـــة الحرارية الأرضية | 570 |
| ◆ المجـــال الحـــراري الأرضـــي | 572 |
| ◆ طرق استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية | 582 |
| ◆ مصـــادر الطاقـــة الحراريـــة الأرضيـــة | 592 |
| ◆ تقييم الاثر البيئي على الطاقة الحرارية الأرضية | 594 |

| الموضـــوع | الصفحة |
|---|---|
| • الطاقـــة الحيويـــة | 597 |
| ◆ أنـــواع الوقـــود الحيـــوي | 598 |
| ◆ التحويـــل الحـــراري | 600 |
| ◆ تقييم الأثر البيئي للطاقة الحيوية | 609 |
| • طاقـــة من البحـــار | 614 |
| ◆ طاقـــة المـــد والجـــزر | 617 |
| ◆ تيـــارات المحيـــط | 622 |
| ◆ طاقـــة الموجـــة | 624 |
| ◆ تقييم الأثر البيئي لطاقة البحار | 627 |
| • طاقـــة الهيدروجين الأخضر | 631 |
| ◆ ما هو الهيدروجين الأخضر؟ | 636 |
| ◆ لماذا أصبح الهيدروجين الأخضر فجأةً مهمًا؟ | 640 |
| ◆ اقتصاد الهيدروجين | 645 |
| ◆ تقييم الأثر البيئي للهيدروجين الأخضر | 650 |
| • الطاقـــــة النوويـــــة | 654 |
| ◆ هل الطاقة النووية متجددة أم غير متجددة؟ | 655 |
| ◆ دورة الوقـــود النـــووي | 663 |
| ◆ تصميم ومكونات المفاعلات النووية | 670 |
| ◆ تقييم الأثر البيئي للطاقة النووية | 691 |

| الفصـــل الســـابع<br>الطاقـــــة الغـــــير متجـــــددة | 695 |
|---|---|
| مقدمـــــة | 697 |
| • نبـــذة تاريخيـــة | 701 |
| • ما هيـــة النفـــط؟ | 713 |
| • مـــوارد الطاقـــة الغـــير متجـــددة | 715 |
| ◆ أصل ونشـــأة النفـــط | 718 |
| ◆ مكونـــات النفـــط | 721 |
| • النظـــام النفطـــي | 724 |
| ◆ صخـــور المصـــدر | 725 |
| ◆ صخـــور الخـــزان و الغطـــاء | 726 |
| ◆ المصائـــد النفطيـــة | 727 |
| • طـــرق اســـتخراج النفـــط والغـــاز | 737 |
| ◆ التكســـير الهيدروليـــكي | 737 |
| ◆ الصخـــر النفطـــي | 745 |
| • طـــرق الاستكشـــاف والتنقـــيب عن النفـــط | 754 |
| • ذروة عصـــر النفـــط | 765 |
| • التحديات التي تواجه الطاقة الغير متجددة | 776 |
| • نهايـــة عصـــر النفـــط | 782 |
| • التأثير البيئي للطاقة الغير متجددة | 787 |

| الفصـــل الثامـــن<br>مســـــتقبل الطاقـــــة فـــــي عالمـــــنا | 791 |
|---|---|
| مقدمـــــة | 793 |
| • أوجه الشبه والاختلاف بين الطاقة المتجددة والغير متجددة | 796 |
| • إيجابيـــات وســـلبيات مصـــادر الطاقـــة | 803 |
| • دور الذكـــاء الاصطناعي في صناعـــة الطاقـــة | 822 |
| • ما هي تحديات الذكاء الاصطناعي في قطاع الطاقة؟ | 828 |
| ◆ تطبيق الذكاء الاصطناعي في عمليات الشركات | 829 |
| • العرض والطلب على الطاقة | 830 |
| ◆ إمـــدادات الطاقـــة | 833 |
| • وسائل تخزين الطاقة | 835 |
| • الحفاظ على الطاقة وكفاءتها | 845 |
| • الاستثمار في الطاقـــة | 847 |
| • سياسات الدول نحو الاستثمار في الطاقة | 850 |
| ◆ تمويـــل المنـــاخ | 852 |
| • الاستدامة في الطاقـــة | 854 |
| ◆ تطورات سياسات الاستثمار | 855 |
| ◆ سياسات الاستثمار في الطاقة المستدامة | 858 |
| ◆ الاستثمار في الطاقة المستدامة للجميع | 859 |
| • الانتقال إلى طاقة المستقبل الأكثر استدامة | 862 |
| ◆ دور الاقتصاد والسياسة والتعليم | 869 |

| الفصـــل التاســع<br>جهـــود المملكـــة في تطوير الطاقة واستدامتها | 871 |
|---|---|
| مقدمـــة | 873 |
| • نظرة إحصائية عن اقتصاديات الطاقة | 876 |
| • توقعات النمو الاقتصادي العالمي | 892 |
| • سياسة المملكة في تعزيز الطاقة والبيئة | 907 |
| • نحو اقتصاد دائري أكثر استدامة | 927 |
| • مشاريع الطاقة المتجددة ودورها في تحقيق الرؤية 2030 | 931 |
| ◆ مشاريع الطاقة الشمسية الرئيسية | 938 |
| ◆ مشاريع الرياح الرئيسية | 940 |
| ◆ مشـاريع الطـاقة الحراريـة الأرضيـة | 941 |
| ◆ مشروع نيوم للهيدروجين الأخضر | 943 |
| • سلاسـل القيـم في صناعـة النفـط | 947 |
| • تحليل سـلاسل القيـم | 949 |
| • سلاسل التوريد في النفط والغـاز | 955 |
| | |
| • المراجـع | 965 |
| المراجـع العربيـة | 965 |
| المراجـع الأجنبيـة | 966 |

# الفصل الأول

# تاريخ المعادن والتعدين

- المعادن والتعدين عند الحضارات القديمة
- تأثير علم المعادن العربي على أوروبا
- التعديـــن الهيدروليـــكي
- التعدين في مرحلة مابعد عصر النهضة
- تقنيات التعدين قديماً وحديثاً
- تقنيات التعدين في الحضارة الإسلامية

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

# تاريـــخ المعـــادن والتعديـــن

## مُقَدِّمَة

يواجه مستقبل صناعة التعدين حاليا تحولات كبيرة مدفوعة بالتقدم التقني من جهود إعادة التدوير، وسلاسل التوريد المرنة، واعتماد الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي، والتركيز المتزايد على الممارسات البيئية والاجتماعية والحوكمة وممارسات الاستدامة. هناك ثلاثة اتجاهات رئيسية تعمل على إحداث تحول جذري في الصناعة. أولاً، التحول من الديزل إلى الكهرباء. ثانيا، هناك التحول الرقمي، الذي يؤدي إلى زيادة الإنتاجية واستخدام أكثر استدامة للموارد مع خفض تكاليف المدخلات. الاتجاه الثالث هو الأتمتة، والتي ستؤدي أيضًا إلى زيادة الإنتاجية وتغيير الطريقة التي نعمل بها.

ستكون القوى العاملة في مجال التعدين في المستقبل هي القوة التي تحتضن أجندة التحول الرقمي بسلاسة. في المنجم الرقمي، يتم ربط كل التفاصيل التشغيلية، مما يؤدي إلى تحسين السلامة والإنتاجية والكفاءة. ومن المتوقع أن يكون الطلب على معظم المعادن مرتفعًا من أجل تحقيق تحول الطاقة. في حين أن الوقود الأحفوري ساعد في تحسين مستويات المعيشة في جميع أنحاء العالم منذ القرن الثامن عشر، إلا أن انبعاثات الغازات الدفيئة المرتبطة به أدت إلى ظاهرة الاحتباس الحراري.

ومن أجل تجنب الوصول إلى درجات حرارة من شأنها أن تخلف عواقب كارثية على كوكب الأرض، يتعين على البلدان إزالة الكربون من أنظمة الطاقة لديها بحلول منتصف هذا القرن. ونظراً لأن أنظمة الطاقة والنقل المنخفضة الانبعاثات تعتمد على المعادن بشكل أكبر من نظيراتها المعتمدة على الوقود الأحفوري، فإن

التحول يوفر فرصة عظيمة لقطاع التعدين. وفي الوقت نفسه، سيتعين على قطاع التعدين خفض انبعاثاته. إن شركات التعدين التي تشغل عملياتها بالطاقة المتجددة، وتشغل أساطيل شاحنات تعمل بالكهرباء أو الهيدروجين وتدمج إعادة التدوير في سلاسل القيمة الخاصة بها، ستكون في وضع أفضل لبيع المعادن المتميزة منخفضة الكربون.

غالبًا ما يتم الحصول على مواد التعدين من الأجسام الخام أو الرواسب أو العروق أو الطبقات أو الشعاب المرجانية أو الرواسب الغرينية. يعتمد استغلال هذه الرواسب للمواد الخام على الاستثمار والعمالة والطاقة والتكرير وتكلفة النقل. يمكن لعمليات التعدين أن تخلق تأثيرًا بيئيًا سلبيًا، سواء أثناء نشاط التعدين أو بعد إغلاق المنجم. ولطالما كانت سلامة العمل مصدر قلق أيضًا، وعندما تم تطبيقها، أدت الممارسات الحديثة إلى تحسين السلامة في المناجم بشكل كبير. كثيرا ما يساهم التعدين غير المنظم أو غير القانوني، وخاصة في الاقتصادات النامية، في انتهاكات حقوق الإنسان المحلية والصراعات البيئية. ويمكن للتعدين أيضًا أن يؤدي إلى إدامة عدم الاستقرار السياسي من خلال الصراعات على الموارد.

يشتمل الجزء الأول من الموسوعة والذي يتألف من خمسة فصول عن المعادن ومعالجتها وما يتعلق باقتصاديات صناعة المعادن وكيفية التنقيب عن المعادن واستكشافها، وتقدير الموارد المعدنية واقتصاديات المناجم وإدارتها وطرق التعدين والبنية التحتية والخدمات الواجب توفيرها لنجاح صناعة التعدين وكيفية للتخطيط للتعدين في البحار والمحيطات والتعدين في الفضاء الخارجي وشروط الصحة والسلامة الواجب مراعاتها في عمليات التعدين والقضايا البيئية والمجتمعية وتوضيح سلاسل القيم المعدنية. كما أننا سنخصص الفصل الخامس عن صناعة التعدين في المملكة العربية السعودية منذ نشأتها وتحديات التعدين وآلية التغلب على هذه المشاكل.

# المعادن والتعدين عند الحضارات القديمة

ربما تعود الجذور الأولى لعلاقة الإنسان بالمعادن إلى الصدفة الحسنة التي جعلته يميز بين الأشياء. حيث إنّه وجد أن هذا الشيء (معدن) لامع وصلب ومتكتل على نفسه، وهو يختلف بخصائصه عن الأشياء الأخرى المحيطة به من نباتٍ أو صخورٍ أو حيوانٍ. وبتتبعنا لمراحل وتاريخ نشأة **علم المعادن والتعدين** Mineralogy and Mining أو (العدانة) فإننا لا نتتبع تاريخ تطور وتقدم الحضارات عبر العصور وحسب، وإنما نهوض وأفول الحضارات أيضاً. فكما أنّ المعادن أسهمت في رقي البشر ورفاهيتهم من خلال الاستفادة منها في مختلف التطبيقات؛ فإنها من ناحية أخرى أسهمت بدمارهم من خلال تطويرهم للأسلحة الفتّاكة. من ناحية الأهمية؛ فقد صارت معادن الحديد والنحاس والرصاص والزنك عند الإنسان أكثر أهميةً من الأحجار الكريمة منذ أن بدأ الإنسان بالسيطرة على البيئة واخترع الآلات.

اشتق لفظ «**معدن** Mineral» في العربية من كلمة (**عَدَنَ**)، والتي تعني الإقامة لزمنٍ طويلٍ. وقد أطلقها العلماء العرب والمسلمين بشكلٍ خاص على الأحجار الكريمة والجواهر (كالياقوت والزمرد وغيرها)، ولم يطلقوها على المعادن العنصرية التي نعرفها نحن اليوم، أي الذهب والحديد والفضة، وإنما أطلقوا عليها مصطلح «فلزات Metal» (الزركان، 2006م).

ويرى الباحثان **الورد والفضلي** (1977م) أنّ كلمة «المعدن» كانت تعني عند العرب «المنجم»، وكان **القزويني** أوّل من استخدم لفظ «المعدن» ليدلّ على معنى المعدن ومعنى المنجم. نشير هنا إلى أن العلماء العرب كانوا يطلقون مصطلح (الفلز) على الحديد و(المعدن) على الهيماتيت. أما كلمة معدن في اللغة اللاتينية Metal فقد اشتقت من كلمة (يبحث) عن اللغة اليونانية، التي تشير إلى ندرة

المعادن قديماً، الأمر الذي قد يفسّر لنا سبب اقتصار استخدامها في أدوات الترف والزينة قبل دخولها مجالات الصناعة (برنال، 1981م).

لقد تأخرت عملية تنظير علم المعادن كثيراً عن جانبه التطبيقي، فالكثير من الأفكار المهمة من الناحية التاريخية لم توضع كما يقول المؤرخ **هولدين** أول الأمر بهيئة كلمات وألفاظ، بل كانت اختراعات تنتقل بالتقليد، ولم تنتقل إلى ألفاظٍ إلا بشكلٍ بطيء. وحتى عندما أرسيت على شكل نظرية لم يكن لها معنى، في حين اكتسبت القدرة العملية شأناً ووزناً. مثلاً كان المعدنون المصريون يدركون أنّ أصلب سبيكةٍ من البرونز هي التي تحوي على نحو 12 % من القصدير، ولو قلت هذه النسبة في السبيكة عن ذلك فلن تتوفر فيها الصلابة المطلوبة، ولو زادت عن ذلك لزادت قابلية البرونز للكسر (فارنتن، 2011م).

في حين يُعرّف **علم المعادن والتعدين** على أنّه علم وفن استخراج المعادن (الحديد، النحاس، القصدير... إلخ) من خاماتها وجعلها صالحة للاستخدامات التطبيقية والتجارية، فهو يدرس عملية تحويل المعادن من الحالة الطبيعية التي كانت عليها وهي مدفونة في قشرة الأرض، إلى حالتها النقية، ويستفيد هذا العلم من القوانين الكيميائية والفيزيائية.

أما أولى عمليات **التعدين** فهي تحويل الصخور الفلزية إلى معدنٍ نقي، ومن الناحية الفنية، إنّ الكتلة المادية التي تحوي على معدنٍ هي فلزٌ إذا كان استخراج المعدن منها مجدياً من الناحية الاقتصادية. فاستخراج المعادن يجب أن يكون بكمياتٍ كافيةٍ لها قيمةٌ مرتفعةٌ بحيث إنّ الإنتاج النهائي يغطي كلفة عمليات الاستخراج مع توفير ربح معقول.

تشير الأدلة الأثرية إلى أن التعدين حدث لأول مرة في فترات ما قبل التاريخ. كانت المادة الأولى المستخرجة من الصوان، والتي قام البشر بتكسيرها إلى قطع ذات حواف حادة لاستخدامها ككاشطات وسكاكين ورؤوس سهام بسبب نمط كسرها الصدفي. تم اكتشاف آبار مناجم مبكرة في فرنسا وبريطانيا تحتوي على صوان يعود تاريخها إلى العصر الحجري الحديث، أو العصر الحجري الجديد، وكان عمقها يصل إلى 100 متر. ومع ذلك، يُعتقد أن أقدم منجم معروف تحت الأرض في العالم، والذي يقع في بومفو ريدج في جبال نغوينيا في سوازيلاند، يعود عمره إلى أكثر من 40 ألف عام.

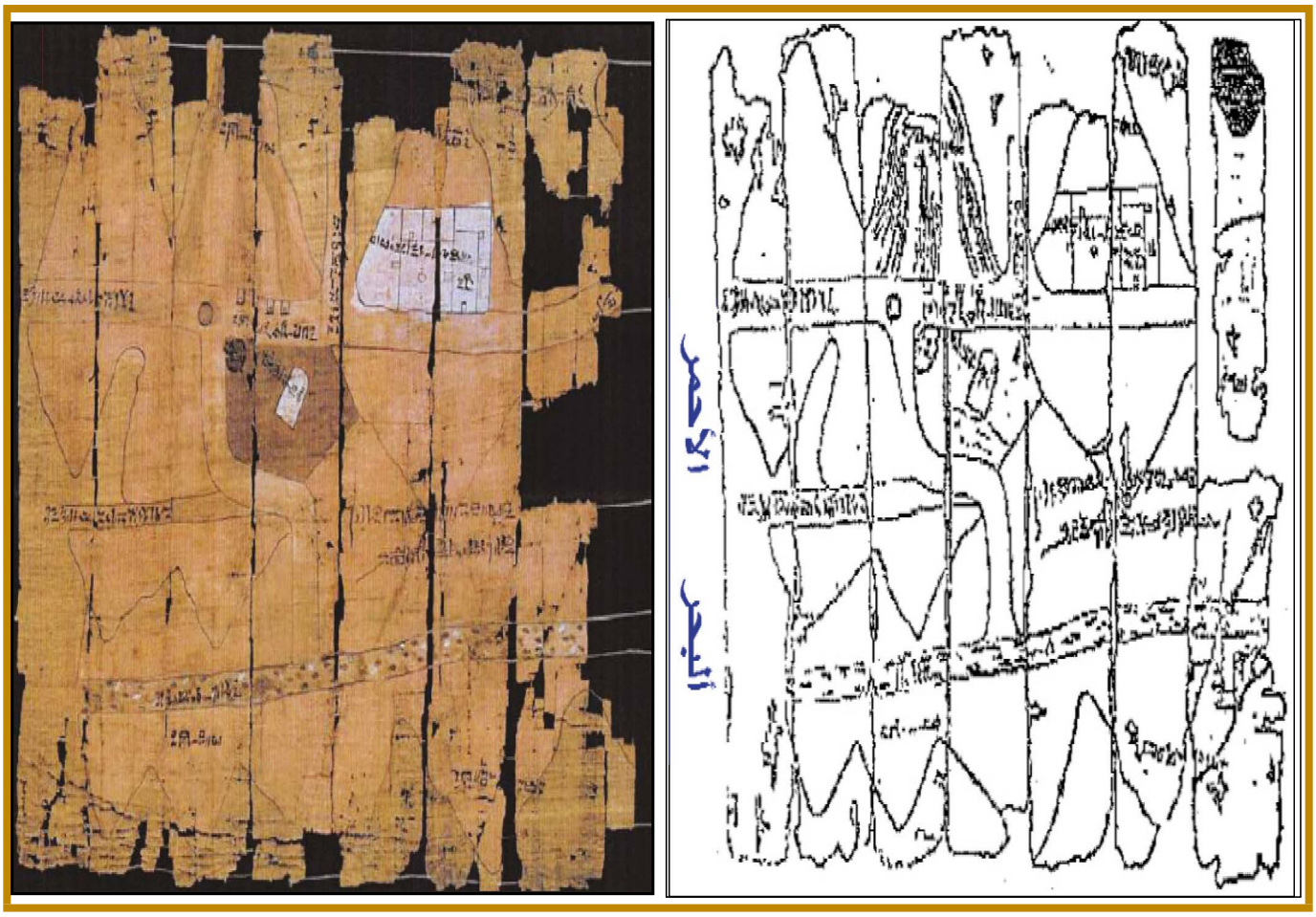
كان الذهب من أوائل المعادن المستخرجة من مجاري الرمل والحصى، حيث ظهر بشكل طبيعي كمعدن نقي بسبب ثباته الكيميائي. كانت الحضارات المبكرة تقدر الذهب لعدة أسباب – فهو جذاب بصريًا، ولا يتآكل، ومتعدد الأوجه، ومفيد في العديد من التطبيقات المختلفة. رأت الثقافات القديمة قيمة الذهب، والمقابر والمعابد المزخرفة ببذخ، تكريمًا للآلهة والشخصيات المهمة. وفي بلغاريا، اكتشف علماء الآثار أقدم قطعة من المجوهرات الذهبية، يعود تاريخها إلى ما يقرب من 6600 عام.

كان المصريون القدماء من أوائل الحضارات التي أنتجت الذهب على نطاق واسع، وتعود الأدلة على استخدامه إلى عام 3100 قبل الميلاد، خلال فترة ما قبل الأسرات ، ومن المرجح أن الناس جمعوا المعدن من الرواسب الغرينية طوال تلك الحقبة. من المحتمل أن أشهر اكتشافات الذهب في مصر (وفي التاريخ) كانت مقبرة توت عنخ آمون.. استخرج المصريون أيضًا النحاس في شبه جزيرة سيناء منذ عام 3000 قبل الميلاد، على الرغم من أن بعض البرونز (النحاس المخلوط بالقصدير) يعود تاريخه إلى 3700 قبل الميلاد. يعود تاريخ الحديد إلى عام 2800 قبل الميلاد، وتعود السجلات المصرية لصهر خام الحديد إلى

عام 1300 قبل الميلاد. يذكر المؤرخون أن الرصاص الموجود في أطلال طروادة القديمة يعود تاريخه إلى عام 2500 قبل الميلاد.

تم العثور على غالبية الذهب في ثقافة أمريكا الوسطى في مجاري الأنهار أو في التربة على مستوى السطح، دون حفر أو استخدام أساليب التنقيب العميق. وبحلول الألفية الثانية قبل الميلاد، كان الناس يستخدمون الذهب في المنطقة الجبلية في جبال الأنديز. ومن هناك، انتقل استخدام الذهب تدريجيًا شمالاً، ليصل إلى أمريكا الوسطى في القرون الأولى بعد الميلاد، وإلى المكسيك بحلول نهاية الألفية الأولى بعد الميلاد. وقد تم اعتماد صناعة المعادن في المكسيك في وقت لاحق مقارنة بالفنون الأخرى.

توجد أقدم خارطة جيولوجية معروفة توجه الشخص نحو مكمن للذهب في متحف تورين. وقد رُسمت هذه الخريطة (على بردية تورين Turin Papyrus)، اكتشفت عام 1825م، وقد نقلها لإيطاليا العالم دورفيتي غاردنر D. Gardiner (هميمي، 2002م). ففي عام 2000 ق.م أمر الفرعون ستهي الأول بالبحث عن الذهب على طول شاطئ البحر الأحمر (دوكروك، 1981م). هذه الخريطة تجعل من المصريين القدماء من أصحاب الحضارات السبَّاقة في مجال تأسيس علم المعادن والتعدين.




صـورة أقـدم خريطـة جيولوجيـة معروفـة وقـد كانـت مخصصـةً لتحديـد مواقـع مناجـم الذهـب والمحاجـر في وادي الحمامـات، يوضـح بالكتابـة الهيراطيقيـة الأسـماء التـي تطلـق علـى الجبـال والطـرق المؤديـة إليهـا. الرسـم منجـر علـى برديـة تعـود للدولـة الحديثـة، الأسـرتان التاسـعة عشـرة والعشـرون (بونهيـم و بفيـرش، 2014م).

قد تعود معرفة الإنسان بالمعادن إلى نحو 7000 سنة، عندما بدأ يستخدمها في صناعة الحلي والأدوات، وقد كان الذهب بلمعته الصفراء صاحب الحظ الأوفر في الاكتشاف والاستخدام، وقد تبعه بعد ذلك الفضة والنحاس، لحق بها الحديد المكتشف في الأحجار النيزكية. ولم تجري أولى عمليات **التعدين** واستخراج المعادن من باطن الأرض إلا منذ نحو 5000 سنة في الحضارات المتقدمة في تلك العصور، ويعد اكتشاف القصدير في الصين نقطةَ انعطاف كبرى، فقد تمكن الصينيون وقدماء المصريين من سبكه مع النحاس لصناعة سبائك البرونز وفتح عهد جديد أطلق عليه المؤرخون اسم (العصر البرونزي) الذي سبق العصر الحديدي (الصباغ، (د. ت).

يرى المؤرخون أنّ العصور التاريخية المنسوبة لظهور المعادن، أي العصر الحجري والنحاسي والبرونزي والحديدي، لم تكن في زمنٍ واحد في جميع أنحاء العالم القديم، كما أنّها اختلفت في مدد استمراريتها بين حضارةٍ وأخرى بسبب عدم توفر الخامات بالكميات نفسها، وبسبب احتكار أسرار الصناعة من قِبل العاملين فيها.

مع دخول البشر العصر الحديدي أدركوا أنّ تعدين الحديد يختلف عن تعدين البرونز، ففي حالة البرونز يعتمد الأمر برمته على تركيب السبيكة؛ أما في حالة الحديد فإنّ الخصائص المرغوب إكسابها للمعدن تعتمد بشكل كبير على طريقة المعالجة؛ أي زمن إلانة المعدن ودرجة حرارته وسرعة التقسية (فارنتن، 2011م).

في الواقع لم تكن صناعة التعدين لتنجح منذ نشأتها الأولى لولا النار. وقد تنبّه إلى هذا الأمر المؤرخ الروماني بليني عندما وصف أثر النار ودورها فقال: «هي العامل الفعَّال» (فارنتن، 2011م). فمن ضرب حجرين مع بعضهما ولّد الإنسان النار ومن النار عاد واستخرج المعادن من الصخور.

وإذا علمنا أنّ أحدث تقديرات لعلماء الحفريات عن بداية استخدام الإنسان للنار تعود إلى وقتٍ ما بين 2 مليون و 1.75 مليون سنة (كورييـر، 2020م)، لنا أن نتوقع أن استكشاف المعادن يعود لفترات أبعد بكثير من تلك الفترات التي جرى خلالها تقسيم العصور البشرية على أساسها. ونسوق هنا عدة أدلة تؤكد ذلك (عبد الحميد، 2008م):

- عُثر على مشغولات نحاسية تعود إلى 9500 سنة ق.م في أحد الكهوف في جبال زاغروس شمال شرق العراق، وهذا يعني أنها أقدم بنحو 4500 سنة من التاريخ الذي حدده أصحاب نظرية تقسيم العصور لمعدن النحاس خلال الفترة من 5000 – 3000 ق.م.
- عُثرَ على قطع نحاسية مشغولة تعود إلى 7200 ق.م في كهوف تقع جنوب شرق تركيا وشمال شرق إيران.
- عُثر على قطع نحاسية مشغولة تعود إلى 6000 ق.م في أوربا بمنطقة روبنهاوزن بسويسرا.
- عُثر على قطع نحاسية مشغولة تعود لحضارة البداري (حضارة تعود لفترة ما قبل عصر الأسر) بأسيوط في صعيد مصر يعود تاريخها إلى الألف الخامس ق.م.

ويؤكد المؤرخ **جورج سارتون** إلى أنّ تقسيم الحقب التاريخية إلى عصور تجمعها صفةٌ واحدةٌ، لم تحدث في وقتٍ واحد في كل أقاليم الحضارات، ربما ابتدأت مبكرةً، وربما استمرت أطول من غيرها. مثلاً استمر العصر الحجري في الأمريكيتين إلى عصر الغزو الأوربي. من ناحيةٍ أخرى فقد استمرت الأدوات الحجرية بالاستخدام في العصر البرونزي، وكذلك استمرت الأدوات البرونزية بالاستخدام في العصر الحديدي وهكذا. وقد يبقى استخدام الأشياء القديمة لأغراض احتفالية أو دينية، مثل استخدام السكاكين الحجرية لأغراض الختان

في مصر الفرعونية وفلسطين، أو استخدام الآلات المصنوعة من حجر اليشم في الصين (سارتون، 2010م).

من ناحيةٍ أخرى فإنّ المدة الزمنية التي حدث فيها الانقلاب من العصر البرونزي إلى عصر الحديد هي «مرحلةٌ غامضةٌ»، وليس من الممكن، ولا من الضروري أن نعيّن هذه المرحلة تعييناً دقيقاً على سلم الزمن، وذلك لأنّ وقوعها ومداها اختلف من مكانٍ لآخر (سارتون، 2010م). مثلاً بعض الحضارات لا تعرف العصر البرونزي، مثل: اليابان وأستراليا وأمريكا الشمالية وجنوب الهند ووسط إفريقيا وبولينيزيا وشمال روسيا وفنلندا، حيث إنّ هذه الحضارات قفزت مباشرةً من العصر الحجري إلى العصر الحديدي (كوب ووايت، 2001م).

## المصريون القدماء

انتشرت عدة مناجم معدنية في مصر القديمة، وقد وثّق لنا المصريون بالصور عملية التعدين التي كانوا يقومون بها من خلال المشاهد الجدارية، وهي توضح أنّ المعدن كان يوضع في فرن مفتوح أشبه بالأتون كان يُصنع من الطين لصهر المعدن، ثم يوضع الأتون فوق موقد وضع تحته كمية من الفحم النباتي، وكانت تُرفع درجة الحرارة باستخدام أنابيب نفخ الهواء، ولم تُعرف منافخ إحماء النار إلا في أوائل الدولة الحديثة، وقد كان المنفاخ الذي استخدموه يتركب من قطعتين من الجلد مفلطحتين ومتصلتين من أحد طرفيها بفوهة ضيقة، فعند الضغط على الجلدتين بالقدم يدخل الهواء إلى الفوهة ويوجّهً إلى جمرات الفحم النباتي، ومع أنّ هذه الطريقة بدائيةً، إلا أنها كانت كافيةً للحصول على درجة الحرارة المطلوبة لسبك المعدن. بشكل عام كان إنتاج المعادن قليلاً في كل مرة تعدّن فيها كمية من الخامات، كما أنه كان يحوي على الكثير من الشوائب

التي لا يمكن التخلّص منها إلا بإعادة عملية السبك، وبعد انتهاء عملية السبك كانت السبيكة توزن بالميزان قبل أن تعطى لصانع المعدن (جيمز،1999م). ولرفع درجة حرارة فرن صهر المعادن استخدم المصريون القدماء أنابيب النفخ منذ الأسرة الخامسة، كما أنهم استخدموا الكير منذ أيام الأسرة الثامنة عشرة وما بعد (سارتون، 2010م).

تشير الوثائق المصرية إلى وجود هيئة متخصصة للكشف عن الموارد المنجمية، والذهب بصفةٍ خاصةٍ، وقد كانت هذه الهيئة تضم أشخاصاً يطلق عليه اسم (سمنتيو)، التي تترجم إلى (منقب جيولوجي). وقد كان يصوّر هؤلاء المنقبين في أغلب الأحيان وهم يمسكون في يدهم كيساً صغيراً من الجلد، حيث إنهم يضعون فيه العينات التي يجمعونها من الصحراء، لكن ليس هناك توضيحٌ للأساليب الفنية التي كانوا يستخدمونها أثناء عملية التنقيب، وإنّما يُتوقع أن تكون طريقةً عمليةً بحتة تقوم على ملاحظة الصخور بأكبر قدر من الدقة، ومع ذلك كان يفوتهم بعض المناجم التي كان بإمكانهم استثمارها. ويبدو أنّ الكثير من المناجم الأقل غنىً قد استنزفت منذ أيام الأسر الأولى (بونهيم، وبفيرش، 2014م).

كما وثّقت عمليات التعدين في مصر من خلال مجموعة من الآثار المنحوتة والأعمال المكتوبة. إذْ يحدّثنا العالم العربي **عبد اللطيف البغدادي** (توفي 629هـ / 1231م) أنّ المصريين القدماء قد رسموا على الجدران العُمَّال وآلاتهم التي كانوا يستخدمونها (البغدادي، 1869م). كذلك فقد وثّق المصريون القدماء عمليات التعدين على البرديات المحفوظة حالياً في متحفي ليدن وإستكهولم، لكنّ علماء الآثار لم يتمكنوا من تحديد العصر الذي تعود إليه: هل هو عصر الفراعنة القدماء أما البطالسة (البابا، 2000م).

أما عن عملية سبك التماثيل، فقد كانت تجري عند المصريين القدماء، منذ العصرين الصاوي والبطلمي، وفق أسلوب الشمع المزاغ، ففي حالة الأشياء الصغيرة التي تُصنع مصمتة كانت تُصب بقالب من شمع العسل، ثم يُكسى بالطين الذي تُصنع فيه فتحات منفذة، ثم يُسخّن النموذج فيتماسك الطين ويصبح فخارياً، بعدها ينصهر الشمع ويتسرّب خارج الفتحات. بعد تصّلب القالب الطيني يُصبّ المعدن في هذه الفتحات حتى يمتلئ جوف الفخار بالمعدن، وعندما يبرد المعدن يكسر القالب الفخاري ويُصقل النموذج. أما في حالة الأشياء والتماثيل الكبيرة فكانت تطبق طريقةٌ أخرى؛ حيث يُشكّل التمثال من رمل الكوارتز، ثم يُكسى بطبقة من شمع العسل الذي يُكسى بدوره بالطين الذي يعمل فيه الفتحات. ومع التسخين يجف الطين ويتسرّب الشمع فيصبّ المعدن في الفتحات ويملأ مكان الطبقة الشمعية المتبخرة، إلا أنّهم لم يوضحوا كيف كانوا يحافظون على القالب الرملي الداخلي متماسكاً خلال العملية، وبعد أن يبرد المعدن كان الغطاء الفخاري يُكسر، ثم يُصقل التمثال صقلاً نهائياً بوساطة الإزميل. وواضح من هذه العملية أنّ التمثل كان مجوفاً خفيف الوزن اقتصادياً في إنتاجه (جيمز، 1999م).

يبدو من بقايا المناجم أنّ المصريين القدماء قد استنفذوا المناجم المعدنية القريبة من سطح الأرض في البداية، ثم مضوا نحو التنقيب والحفر عميقاً. والدليل على ذلك نجده في مناجم سيناء منذ عصر الدولة القديمة، ثم جرى استغلال هذه المناجم مرة أخرى في عصر الأسرة الثانية عشرة، زمن الملك **سنوسرت الأول** (1980–1935 ق.م.)، ثم جرى التعمق في ذلك الاستغلال زمن **أمنمحات الثالث** (1849–1801 ق.م.) الذي حفر آباراً ومخازنَ للمياه، كما بنى مساكن للعُمَّال والموظفين وحصوناً لصد غارات البدو. ولا تزال بقايا هذه المستوطنات الخاصة بالتعدين باقيةً إلى يومنا هذا (سارتون، 2010م).

## بـــلاد الرافدين

لقد تطور فن التعدين في حضارة بلاد ما بين النهرين منذ عصر السلالة الثاني، فظهر البرونز والذهب والفضة وسبيكة الإلكتروم (مزيج بين الذهب والفضة)، كما صُنعت في عصر السلالات الثالث الفؤوس والقدور وأدوات الزينة كالمشابك والدبابيس (حميد، 2013م). عُرفت المعادن في بلاد الرافدين من العصر الحجري - المعدني، إلا أنّ استخدامها لم يبدأ إلا منتصف هذا العصر تقريباً، وأول معدنٍ استخدم كان النحاس، كما تشير إلى ذلك الخرزات التي عُثر عليها في تل الصوان (عصر حسونة). بعدها أخذت المعادن والتعدين تتطور في طور سامراء، إذْ صُنعت منها أنواع مختلفة من الحلي، وقد وثّقت لنا النصوص المسمارية التي تعود إلى سلالة (لكش الثانية) في عصر كوديا، معادن المصنوعات التي كانت معروفةً عندهم وهي البرونز والفضة والذهب (حميد، 2013م). كانت تترافق عمليات التعدين مجموعة من الطقوس الدينية لاسترضاء الأرواح الخفية التي تسيطر على باطن الأرض. وقد كان المعدنيون في بلاد ما بين النهرين يتحينون الفرص للقيام بعمليات التعدين عند ظهور بعض الكواكب أو النجوم اعتقاداً منهم بوجود تأثيرٍ لها على نجاح العملية (البابا، 2000م).

وكما نعلم فقد تأسست الدولة الآشورية على بنية عسكرية حربية؛ إذْ نراهم طوّروا استخدام الخيول والمركبات الحربية وابتكروا المنجنيق، ونتيجةً لاحتكاكهم مع الشعوب المتحضرة، مثل: الفينيقيين والآراميين والعموريين والميتانيين والحثيين تمكنوا من صنع الأدوات المعدنية النحاسية والبرونزية في أثناء الألف الثانية ق.م، ثم تعلموا استخدام الحديد في أسلحتهم من الحثيين (سوسة، 1981م).

في الجانب الغربي وعلى ضفاف البحر الأبيض المتوسط، أسست زوجة ملك مملكة أوجاريت نقميبا (توفي 1260 ق.م) الملكة أخت **ملكو** في قصرها الشمالي

في بيروت الأوجاريتية (القرن 13 ق.م) في الغرفة رقم 20 محترفاً لصناعة الأشياء الثمينة، كما خصصت الغرفتين الكبيرتين 17 و 18 لصهر المعادن، وقد استدل الباحثون على ذلك من وجود بقايا المعادن وبلاطة كبيرة من الحجر الكلسي الناعم المثبتة في الأرض والمعدّة كقالب لصب السبائك النحاسية على شكل جلد ثور، وهو القالب الوحيد في العالم المعروف إلى الوقت الحاضر. كما عُثر في الغرفة رقم 29 خامات لحجر اليمان (الكالسيدوني) وكمية من الكوراندوم القاسي جداً الذي يُدقّ ليستخدم في الصقل (الرحال، 2018م).

وبخصوص قوالب الصب المعدنية فقد كان يستخدم حجر ستياتيت (الحجر الصابوني) المعروف بكونه عازل للحرارة، وكان يؤتى به من الخليج العربي. وقد عُثر على قالب لصب المعادن في مملكة أوجاريت (رأس شمرا) يعود لعصر البرونز الحديث (القرن 15–13 ق.م). كان هذا القالب يستعمل لصبّ شريطٍ ذي ثقوب وزخارف كثيرة، يعتقد إنه إكليل (الرحال، 2018م). يروى أنّ قدموس Cadmus وهو أحد الملوك الفينيقيين هو من نقل صناعة التعدين لبلاد اليونانيين، وهو أول من استفاد من مناجم الذهب والفضة الموجودة في جبال مكدونيا، وكذلك فعل الأمير الفينيقي تاسوس Tassus في الجزيرة التي تقع شمال بحر إيجة، والتي سُمّيت على اسمه، حيث استثمر مناجم الذهب هناك (البابا، 2000م). وبعد أن سقطت دولة كريت أصبحت قبرص مركز صناعة المعادن في حوض البحر الإيجي، ونظراً لقُرْبها من ساحل بلاد الشام نشأت فيها بعض المستعمرات الفينيقية الأولى (سارتون، 2010م).

أما بخصوص ضبط عمليات وزن المعادن ووحدات القياس التي كانت تستخدم في بلاد الرافدين، فقد كانت الوزنات تصنع من حجر الدم (الهيماتيت Haematite)، أما وحدات القياس فقد استخدمت وحدة (الشيقل البابلي) و(المن)، إذْ كل (60 شيقل) يعادل (1 من بابلي) ويساوي نحو نصف كيلوغرام (حميد، 2013م).

## الهنـــــــــود

تعلم شعب الهند أنّ تسخين الأشياء يزيد من قوة تماسكها، فصنعوا أفراناً ليشووا فيها الآجر الطيني والخزفيات كالقدور والصحون وغير ذلك، ثم ما لبثوا أن اعتمدوا صهر المعادن وتعريضها لعمليات معالجة مختلفة بهدف تغيير أشكالها حسب الطلب، استخرج سكان وادي الهند المعادن كالنحاس والرصاص والذهب والفضة من الفلزات بصهرها، كما تعلموا صنع السبائك من النحاس والقصدير كسبيكة البرونز، كما تعلموا تسخين المعادن إلى درجات حرارة عالية جداً وصبها في قوالب لصنع أدوات مختلفة (أفندي، 2016م).

## الرومانيـــــــون

كانت أساليب الرومان في التعدين مستمدة من الأتروسكان واليونانيين والمصريين. لكنهم ابتكروا أساليب جديدة في التنقيب، خصوصاً في حفر الأروقة وفتح الممرات والإنارة والتهوية وتصريف المياه والدعم والجر والمسح. وقد ساعدهم في ذلك الأدوات الحديدية (من مطارق للحجارة ومعاول وأسافين) المطوّرة، وليس مؤكداً أنّ الحديد المصبوب كان معروفاً في روما، مع أنّه كان معروفاً في الفترة نفسها في الصين، ومن المحتمل أنّهم حصلوا عليه من البلدان البربرية في أوربا الوسطى. أما الفولاذ فقد كان معروفاً منذ عدة قرون، ومن المحتمل أن بعض الأماكن كانت تنتج فولاذاً أفضل من غيرها، مثل مدينة كومو، وكانت تُعزى جودة هذا الفولاذ إلى خواص مياه البحيرة الموجودة هناك (سارتون، 2010م).

ونظراً للمساحات الشاسعة التي كان الرومان يحتلونها فقد كان لديهم اكتفاءٌ ذاتيٌ من المعادن، كما أنّ سيطرتهم على طرق الملاحة البحرية مكنتهم من إحضار

المواد من أماكن بعيدة بتكاليف منخفضة نسبياً، كما أنّهم كانوا يصدّرون ما يزيد عن حاجتهم من باب الهيمنة السياسية على المستوردين. فقد صدّروا النحاس والفضة إلى ألمانيا كما صدّروا الذهب إلى الهند، لكن مجلس الشيوخ في فترة الجمهورية، حاول أن يضبط وينظم عملية تصدير الذهب، كما أنه منع تصدير الحديد في عصر الإمبراطورية اللاحق، مخافة أن يستخدمه البرابرة لصناعة الأسلحة. في المقابل كان الرومان يستوردون بعض المواد ذات الجودة المرتفعة من بلادٍ بعيدةٍ ليست تحت سيطرتهم، وقد كانوا يدفعون مبالغ كبيرة لنقل هذه المواد الثمينة، مثل الحديد الحريري Seric Iron الذي كان يستورد على الأغلب من الهند وليس من الصين (سارتون، 2010م).

## اليونانيـــــون

لا تتميز المعادن والأحجار الكريمة -وفق النظرية اليونانية- عن بعضها بعضاً إلا من خلال خصائصها الخارجية، وبشكلٍ خاص من خلال لونها، حيث إنّ تغيير اللون يعني تغيّر المعدن (قنواتي، 2005م).

فقد كان أفلاطون يعتقد أنّ المعادن عبارة عن مياه لا تنصهر، ووصف الذهب بأنه معدنٌ كاملٌ، والمعادن الأخرى مثل الذهب لكنها غير نقية (كوب، ووايت، 2001م). كما وضع أرسطو نظريته عن تشكّل المعادن في كتابه (الآثار العلوية)، وكان يعتقد أنّ المعادن تتشكل نتيجة اختراق أشعة الشمس لباطن الأرض، التي تعمل على توليد الأبخرة من الصخور، أما الجزء البعيد عن تأثير الأشعة فتكثر فيه المائية ويصبح ذهباً. وقد يكون أرسطو بقوله بمنشأ المعادن من عنصر الماء متأثراً بالفكرة التي طرحها تاليس حول منشأ المواد كلها من الماء (هميمي، 2002م). وقال أرسطو بأننا إذا استخرجنا المعدن الموجود في منجم، ثم تركنا المنجم فترةً من الزمن، فإنه يمتلئ بالمعدن من جديد (فروخ، 1970م).

وقد اتفق أرسطو مع أفلاطون بأنّ المعادن القابلة للانصهار هي مواد شبيهة بالماء، حيث إنّ هذه المعادن والماء تملك صفات مشتركة وتختلف عنه بصفات أخرى. وهذا يعني أنّ كلاً منهما صنَّفا الماء مع المواد الجامدة، واعتبرا أنّه لا يسيل إلا بفعل النار كما هو حال المعادن. وقد حافظ علماء اليونان على هذه النظرية الغريبة وامتد أثرها إلى بعض علماء العصور الوسطى (أفلاطون، 2014م). كما ذكر أرسطو أنّ المعادن واحدةٌ في النوع، وهي تختلف عن بعضها بعضاً ليس في ماهيتها وإنما في أعراضها أي خواصها. وهو يعتقد أنّه يمكن انتقال أحد المعادن إلى الآخر؛ فإذا كان العَرَضُ مختلفاً سهل الانتقال، وإن كان العَرَضُ ذاتياً صَعُبَ الانتقال، ويعتقد أن الانتقال بين الذهب والفضة سهل جداً نظراً لاختلاف الأعراض الذاتية بينهما (الشكري، 1979م). وقد ذكر الكندي أن أرسطو خصَّص الكتاب الخامس من كتب الطبيعة بعنوان (كتاب المعادن)، حيث وضح فيه كيفية تكونها في باطن الأرض وخواصها والأماكن الخاصة بها (الكندي، 1950م). وقد كان ثيوفراسطوس يعتقد - مثل أستاذه أرسطو- أن منشأ المعادن عنصر الماء، أمّا الصخور والأحجار الكريمة فمنشؤها عنصر الأرض نفسه، وقد اتفق معه لاحقاً الروماني سينيكا في كتابه (الأسئلة الطبيعية) (هميمي، 2002م).

## الصينيـــــون

كان أتباع الفلسفة الطاوية في الصين (القرن 5 ق.م) يعتقدون أنّ كل المعادن والفلزات ذات منشأ واحد، ولكنها تختلف عن بعضها بعضاً حسب كمية الين واليانغ. حيث إنّ اليانغ يرمز إلى العنصر الذكري - الشمس، وهو موجب وفعَّال بشكل ناري، من خواصه: الحياة والنور والدفء والرطوبة. أما الين فهو عنصر أنثوي – القمر، وهو سالبٌ وأرضيٌ وثقيلٌ، من خواصه: الموت والظلام والبرودة والجفاف (كوب، ووايت، 2001م).

## العلمـــــاء العـــرب والمســـــلمون

خالــف جابـر بـن حيـان (تـــــوفي 200هـ/ 815م) إنبيدوقليس Empedocles (توفي نحو 434 ق.م) وأتباعه من اليونانيين والمسلمين القائلين بتكوّن المواد من أربعة عناصر أساسية: التراب وطبيعته اليبوسة، والماء وطبيعته الرطوبة، والهواء وطبيعته البرودة، والنار وطبيعته الحرارة، وأنّه تختلف المواد في بنيتها حسب اختلاف نسب اجتماع هذه العناصر، حيث إنّ جابراً اعتمد نظريته (الزئبق والكبريت) في تفسير خواص المواد من ناحية تبلورها وانصهارها وتأكسدها (صبحي، 1997م).

وبذلك فإنّ جابر أراد أن يعمم عنصر كيميائي حقيقي (رمّزه بالكبريت) وآخر (رمّزه بالزئبق) هو من تكون له الفاعلية في تشكيل المواد، وليس تلك العناصر وطبائعها الافتراضية، وقد استخدم لفظ «الزئبق» للدلالة على الحالة السائلة، واستخدم لفظ «الكبريت» للدلالة على الاحتراق، حيث إنه استخدم الزئبق كونه يحتوي على عنصري الماء والتراب، والكبريت كونه يحتوي على عنصري النار والهواء، وبذلك تكون المادتان معاً قد احتوتا على العناصر الأربعة وكيفياتها.

وقد اعتقد جابر أنّه بهذه النظرية سيتمكن أيّ كيميائي من الحصول على طيفٍ واسعٍ من المعادن والمواد. فإذا أردت الحصول على الذهب الإبريز ما عليك إلا استخدام الزئبق والكبريت النقيين، ووفق النسب الأفضل، ودرجة الحرارة المعتدلة. فإذا انخفضت حرارة المعدن وسط عملية الدمج تولّدت الفضة البيضاء، وإذا تعرّض المزيج لحرارة شديدة تولّد النحاس الأحمر، وإذا انخفضت الحرارة قبل اتحاد أجزاء الزئبق والكبريت تولّد الرصاص القلعي (القصدير الأبيض)، وإذا تعرّض المزيج للبرودة وغلبت المواد الترابية على المزيج، تولّد الحديد.

وإن كان الكبريت أقل والزئبق أكثر، والحرارة ضعيفة تولّد الأُسْـرُب (الرصاص الأسود الرديء)، وإن زادت الحرارة أكثر على هذا المزيج تولّد الكحل... وهكذا إذاً فقد جعل جابر من الزئبق والكبريت مبدأين للفعل ورد الفعل أو تفاعل المواد مع بعضها بعضاً، كما أن وجود تأثيراتٍ سماويةٍ مناسبةٍ في الوقت المناسب هما المسؤولان عن وجود كل معادن الطبيعة (مفلح، 2014م).

إن نظرية جابر ستكون معتمدةً لاحقاً مع بعض التعديل سواءٌ من قبل العلماء العرب أو الأوربيين. فمن العلماء العرب نجد ابن وحشية النبطي (توفي 296هـ/ 909م) (ابن وحشـــية، مخطوطة نور سليمانية، رقم (3631)، ص 90و91–و)، ومؤيد الدين أبو إسماعيل الحسين بن علي المعروف بالطغرائي (توفي 513هـ/ 1121م) (الطغرائي، مخطوط ضمن مجموع في مكتبة المتحف البريطاني، رقم (Or. MS. 13,006)، ص 51و)، وابن تومرت الأندلسي (توفي 524هـ/ 1130م) (ابن تومرت، 1999م)، وأبو القاسم محمد بن أحمد العراقي (نحو 580هـ/ 1184م) (العراقي السيماوي، مخطوط ضمن مجموع في مكتبة نور عثمانية، إستنبول، رقم (3633)، ص 7و7–ظ)، وأثير الدين المفضل بن عمر بن المفضل الأبهري السمرقندي (توفي 663هـ / 1264م) (الأبهري، 2019م)، وعز الدين أيدمر عليّ الجلدكي (توفي بعد 760هـ/ بعد 1360م) (الجلدكي، مخطوط ضمن مجموع في مكتبة نور عثمانية، إستنبول، رقم (3633)، ص 220ظ221–و)، والإمام فخر الدين الرازي (توفي 606هـ/ 1209م) (الرازي، مخطوط ضمن مجموع في مكتبة المتحف البريطاني، رقم (Or. MS. 13,006)، ص 76و)، وكذلك السيد الشريف البخاري تأثر بنظرية جابر في الزئبق والكبريت في تشكل المعادن (البخاري، مخطوط ضمـــن مجمـــوع في مكتبـــة المتحف البريطاني، رقم (Or. MS. 13,006، ص 11ظ).

أما العلماء الأوربيون الذين تأثروا بنظرية جابر بن حيان فهم: باراسيليوس (توفي 1541م) Paracelsus، الذي أضاف عنصر الملح للكبريت والزئبق، ويان بابتست فان هيلمونت J. B. van Helmont (توفي 1644م) ، كما نلمح امتداد تأثير جابر على روبرت هوك R. Hooke (توفي 1703م) عندما تحدث عن «جزيء كبريتي» يساعد في عملية الاحتراق، وهو ما سيطلق عليه لاحقاً الأكسجين (مفلح، 2014م).

أما عن تشكل المعادن في باطن الأرض فقد عدّل جابر نظرية أرسطو التي تقول إنها تنشأ عن امتزاج عنصرين: أحدهما بخارٌ مائيٌ (جسيمات صغيرة من الماء في طريقها لتصبح هواء) والآخر دخانٌ أرضيٌ (جسيمات صغيرة من الأرض في طريقها لتصبح ناراً) (كوب، ووايت، 2001م). حيث انطوى تعديل جابر على أنّ تكاثف هذين العنصرين ينتج عنه الزئبق والكبريت، ومن اتحادهما بنسبٍ مختلفة تتكون المعادن المختلفة. ففي حالة الفضة يكونان متساويين في الوزن، أما في حالة الذهب فيكون بينهما اتزان مطلق، وهكذا (الشكري، 1979م).

ويبدو أن ابن سينا (توفي 428هـ / 1037م) قد تبنى نظرية جابر بن حيان في تشكل المعادن في باطن الأرض من الكبريت والزئبق، ولم يتبن نظرية أستاذه أرسطو في العناصر الأربعة. وهذا تغير لافت للنظر، فالمعروف عن ابن سينا اتّباعه لأرسطو في كل نظرياته التي تفسّر الظواهر الطبيعية، لكن ابن سينا هنا ربما وجد أن نظرية جابر مقنعة ومنطقية أكثر من نظرية أرسطو (ابن سينا، 2012م).

كما أشار ابن سينا في كتاب الشفاء إلى ظاهرةٍ طبيعيةٍ تتسبب بتشكيل النصول المعدنية في الصحراء عقب حدوث الصواعق، وهو ما اكتشفه الفرنسيون في خمسينيات القرن العشرين (الهاشمي، 1965م). كذلك فقد ناقش الحسن

بـن مثويـه (تـوفي 469هـ / 1076م) سـبب ليونـة الحديـد عنـد تعرّضـه للنـار، وقـد وجـد أنـه يعـود إلـى فقدانـه للعناصـر اليابسـة منـه بقـاء الأجـزاء الرطبـة، ويـرى أن هـذا هـو السـبب في حـدوث انصهـار المـواد. قـال ابـن مثويـه: «العلـة التـي لهـا يلـين الحديـد بالنـار أنهـا تذهـب بأجـزاء يابسـة عـن الحديـد. وإن كان لا يمتنـع ذهـاب أجـزاءٍ رطبـةٍ فيمـا بـين ذلـك، فتبقـى الأجـزاء الرطبـة ويظهـر فيهـا اللـين. وعلـى مثـل هـذه الطريقـة يـذوب القـار وهـذه الفلـزات أجمـع بالنـار، لأنهـا تذهـب عنهـا أجـزاء يابسـة فتصيـر مانعـة لبقـاء الأجـزاء الرطبـة. فـإذا صفعهـا الهـواء، عـادت إلـى حالهـا الأولـى» (ابـن مثويـه، 1975م).

# التعدين في مرحلة ما بعد عصر النهضة

يعتبر الكثيرون أن التعدين الحديث يعود تاريخه إلى عام 1556م عندما نشر جورجيوس أجريكولا (جورج باور)، طبيب المدينة في كيمنتس، ساكسونيا (ألمانيا)، دراسته الشهيرة، دي ري ميتاليكا (أجريكولا 1950)، والتي وثقت ممارسات التعدين المعاصرة في إرزغيبرجه. مناجم («جبال الخام») في ولاية ساكسونيا. لقد سهّل إدخال البارود عملية تكسير الصخور، لكن العملية ظلت بطيئة وخطيرة. تم سكب المسحوق يدويًا في فتحات الانفجار ويمكن اشتعاله بواسطة شرارة. اختراعات صمام الأمان من قبل ويليام بيكفورد في عام 1831م والديناميت من قبل ألفريد نوبل في عام 1867م فعلت الكثير لتحسين سلامة كسر الصخور. أدى إدخال المثاقب التي تعمل بالبخار والهواء المضغوط في ستينات القرن التاسع عشر إلى زيادة الإنتاجية بشكل كبير. التحسينات في فولاذ الحفر والقطع وتطوير معدات التحميل والنقل الآلية أوصلتنا إلى الحاضر.

لقد ساهم اندفاع الذهب في الولايات المتحدة في كاليفورنيا ولاحقًا في كولورادو في انفتاح الغرب الأمريكي مثلما فعلت السكك الحديدية أو الزراعة. علاوة على ذلك، فإن مدن مثل ديدوود، داكوتا الجنوبية، وتومبستون، أريزونا، والتي اشتهرت بفضل روايات المتاجر الدايمية ثم الأفلام في وقت لاحق، كانت في الواقع مدن تعدين. تم فتح غرب أفريقيا وجنوبها عن طريق تجارة الرقيق، ثم المبشرين المسيحيين، ثم ملاك الأراضي الزراعية. ومع ذلك، فإن صناعة التعدين والزراعة هي التي دعمت هذه المناطق منذ ذلك الحين.

في الواقع، هذه هي طبيعة المناجم العميقة جدًا في جنوب إفريقيا، حتى اليوم يعتبر مهندسو التعدين في هذا البلد الرواد الحقيقيين عندما يتعلق الأمر بحل المشكلات المرتبطة بالتعدين العميق المستوى. ومع ذلك، فإن أمريكا اللاتينية،

التـي تعتبـر في كثيـر مـن الأحيـان متأخـرة نسـبيا في السـعي وراء الثـروة المعدنيـة، سـاهمت بشـكل كبيـر في ثـروات العالـم.

في الواقـع، بعـد الحـرب العالميـة الأولـى مباشـرة، كانـت الأرجنتيـن ثالـث أغنـى دولـة في العالـم (بعـد الولايـات المتحـدة وبريطانيـا العظمـى) وتعتمـد جزئيًـا، كمـا يوحـي اسـمها، علـى تعديـن الفضـة. إن أسـتراليا، وهـي قـارة شاسـعة في حـد ذاتهـا، لـم يطلـق عليهـا «البلـد المحظـوظ» بـدون سـبب، ويرجـع ذلـك جزئيـا إلـى ثروتهـا المعدنيـة الهائلـة. كان التعديـن مسـؤولًا عـن فتـح جـزء كبيـر مـن المناطـق الداخليـة الشاسـعة في أسـتراليا وكذلـك محطـات الأغنـام والماشـية.

بـدأ تعديـن النحـاس في أربعينـات القـرن التاسـع عشـر في مـدن مونتـا وكادينـا ووالارو بجنـوب أسـتراليا. شـهدت خمسـينات القـرن التاسـع عشـر حمـى الذهـب في بـالارات وبنديجـو، وكلاهمـا في فيكتوريـا. تم اعتمـاد التعـويم مبكـرًا في بروكـن هيـل، نيـو سـاوث ويلـز؛ وكان جبـل عيسـى في كوينزلانـد مسـؤولًا عـن العديـد مـن الابتـكارات في مجـال التعديـن تحـت الأرض.

وحتـى اليـوم، بعـد مـرور مـا يقـرب مـن قرنـين مـن الزمـان منـذ الاسـتيطان الأولـي في خليـج بوتانـي، نيـو سـاوث ويلـز، في عـام 1770م، لا يـزال التعديـن يسـاهم كثيـرًا في ثـروات البـلاد، فضـلًا عـن التوسـع الاقتصـادي والصناعـي للعديـد مـن جيرانهـا الآسـيويين.

# تأثير علم المعـــادن العربي على أوروبـــا

اعترافاً بتأثير علم المعادن العربي على أوروبا قال المؤرخ آدمز: «كان لعلم المعادن العربي أثرٌ مهم في تطور علم المعادن في أوربا في وقت لاحق». فقد اســـــتفاد من أعمال العرب في علـــم المعـــادن كلٌّ من الألماني ألبرت الكبير Albert the Great (تـوفي 1280م) والإيطالـــــي رســـتورو داريـزو R. d'Arezzo (كـــــان حياً في القرن 13م) في كتابه (طبيعة العالم) الذي ألفه عام 1282م، من أعمال ابن سينا والفرغانـــي وابن رشـــــد، خصـــــوصاً الترجمات اللاتينيـــة (حسـن والنقـاش، 1980م).

مـن ناحيـــــة أخـرى فـإنّ التيفاشـي قـد سـبق كلاً مـن إيراسـموس سـتيلا E. Stella (تـوفي 1521م) الـذي يعـد أول مـن درس المعـادن والأحجـار مـن الأوربيـين عـن طريـق فحـص خصائصهـا الفيزيائيـة، وكاميلـوس أيونـاردوس K. Eonardos الـذي صنَّـف المعـادن حسـب ألوانهـا، كمـا سـبق الألمانـي جـورج أغريكـولا G. Agricola (تـوفي 1555م) الـذي يدعـى «بأبـي علـم المعـادن» (حسـن والنقـاش، 1980م). ونـرى بضـرورة أن يعـاد النظـر بهـذه الأبـوّة بعـد أن تأكـد لنـا في هـذا العمـل أسـبقية العـرب والمسـلمين عليـه في تأسـيس علـم المعـادن.

بعد أغريكـــــولا يأتي الروســـــــي ميخائيل لومونوسوف M. Lomonosov (تـوفي 1765م) الـذي قـال بهجـرة المعـادن مـن مكـان إلـى آخـر، أو مـا يسـمى بالـدورة الجيوكيميائيـة للعناصـر والمعـادن، بعدهـا قـام السـويدي جـون جاكـوب بيرزيليـوس J. J. Berzelius (تـوفي 1848م) بتحليـل المعـادن كيميائيـاً وتصنيفهـا، وتـوّج عمـل الاثنـين ديميتـري منديليـف D. Mendeleev (تـوفي 1907م) بوضعـه عـام 1869م للجـدول الـدور للعناصـر الـذي أتـاح إمكانيـة استكشـاف عناصـر لـم تكـن معروفـةً للبشـرية من قبل (عوض اللّه، 1980م). لقد بيّن شيارا كريسياني Chiara Criscini

بشكلٍ جلي، أنّ المعرفة العربية العلمية في الكيمياء تعتبر بالنسبة للغرب مجالاً جديداً يعد بالكثير من القيام بالتطبيقات في القرون الوسطى. حيث إنها تكمّل المعرفة عن عالم المواد المعدنية التي ورثها عن إيزيدور الإشبيلي وبليني الأكبر (هالو، 2005م).

## تقنيات التعدين في الحضارة الإسلامية

لا شك بأنّ العرب ورثوا ما تعلموه من مبادئ وتقنيات في مجال التعدين عن الحضارات السابقة الأقدم منهم، فقد تعلم الأنباط كيفية استغلال مناجم الحديد والنحاس الموجودة في منطقة (أدوم)، والأنباط هم القبائل العربية التي هاجرت من شبه الجزيرة العربية منذ القرن 6 ق.م واستوطنوا البادية التي تقع شرقي الأردن حالياً، وقد اتخذوا من البتراء عاصمةً لهم التي بلغت ذرة ازدهارها في القرن 4 ق.م، ولبراعتهم في الصناعات المعدنية انتقلت مصنوعاتهم النحاسية والحديدية، إضافة إلى المصنوعات اليونانية والشامية إلى اليمن (سوسة، 1981م). سنورد فيما يأتي أهم مصادر المعرفة العربية بعلم المعادن والتعدين:

تكلم ديسقوريدس Discorides (توفي 60م) في (كتاب الحشائش) على أكثر من 600 مادة. وقد خصص منها 100 معدن (في المقالة الخامسة) (قنواتي، 2017م) ذات منافع طبية، منها الكبريت والريالغار والأوربيمنت والزئبق والرصاص والزنك والنحاس والحديد (الفضلي، والسبتي، 1984م).

- كتاب (المعادن) لجابر بن حيان (توفي 200هـ/ 815م)، الذي نُسب خطأً إلى جاردلانديوس، وقد صحح يوليوس روسكا ذلك ضمن تحقيق كتاب (الزاج والأملاح) الذي نشره في برلين عام 1935م.

- للكندي (توفي260هـ/ 873م). رسائل عن المعادن ومعالجتها (الأهواني، 1964م):
  - رسالة في أنواع السيوف والحديد.
  - رسالة فيما يُطرح على الحديد والسيوف حتى لا تثلم ولا تكلّ.

رسالة الكندي (في أنواع السيوف والحديد) مشهورةٌ كثيراً نظراً لكونها أول مرجع عربي يتناول صناعة السيوف في البلاد العربية والإسلامية، وقد اكتشفها ولخصّها البارون بورغستال سنة 1854م، ونشرها في المجلة الآسيوية، ثم حققها ونشرها عبد الرحمن زكي في مجلة كلية الآداب، جامعة فؤاد الأول، عام 1952م (البابا، 2000م).

- كتاب (محن الذهب والفضة)، و(علل المعادن)، **أبو بكر الرازي** (توفي 313هـ / 925م).

- (الجوهرتين العتيقتين المائعتين الصفراء والبيضاء - الذهب والفضة)، **ابن الحائك الهمداني** (توفي 334هـ/ 945م). وقد حققه **كريستوفر تول** وطبع في أوبسالا في السويد عام 1968م. كما أعاد تحقيقه أحمد فؤاد باشا ونشره في القاهرة عام 2009م، مركز تحقيق التراث في دار الكتب والوثائق القومية.

- كتاب (كشف الأسرار العملية في ضرب النقوش المصرية) **منصور بن بعرة الذهبي الكاملي** (عاش في القرن 7هـ/ 13م).

# تقنيـات التعديـن قديماً وحديثاً

في البداية، استخدم عمال المناجم أدوات بدائية للحفر. تم حفر أعمدة التعدين يدويًا أو باستخدام أدوات حجرية، مما يجعل العملية برمتها طويلة جدًا. في نهاية المطاف، تم استبدال المعول والمطرقة بالنار لتنظيف الأنفاق والوصول إلى أعماق أكبر بمعدل أسرع. ومن خلال تكديس كومة من جذوع الأشجار بالقرب من وجه الصخرة وحرقها، ضعفت الصخرة وتكسرت.

قفزت تكنولوجيا التعدين إلى الأمام مرة أخرى في أواخر العصور الوسطى عندما بدأ عمال المناجم في استخدام المتفجرات لتفتيت الصخور الكبيرة. وصل المسحوق الأسود إلى الغرب، على الأرجح من الصين. تم استبدال المسحوق الأسود في النهاية بالديناميت في منتصف القرن التاسع عشر. وفي الوقت نفسه، تم إحراز تقدم في أدوات التعدين الآلية، مثل المثاقب والمصاعد والمضخات التي تعمل بالبخار.

حفزت الثورة الصناعية التحسينات في المتفجرات ومعدات التعدين. أدت المثاقب الميكانيكية التي تعمل بالمكابس، ثم الهواء المضغوط، إلى زيادة كبيرة في قدرة وكفاءة تعدين الصخور الصلبة. حدثت تحسينات في عمليات التعدين الأخرى أيضًا. تم استبدال التحميل والنقل الذي يعمل يدويًا بالناقلات الكهربائية وسيارات المناجم والمركبات. حلت المضخات التي تعمل بالبخار مشكلة تدفق المياه. تم تحسين الشموع ومصابيح الفتيل الزيتي بواسطة مصابيح الغاز، وفي النهاية المصابيح التي تعمل بالبطارية. أدت الميكنة والتكنولوجيا الجديدة إلى تحسينات هائلة في تقنيات التعدين.

في مجتمع اليوم المتقدم تكنولوجياً، تتحسن تقنيات التعدين دائمًا. على سبيل المثال، باستخدام تقنيات التعدين السطحي، أصبحت العديد من عمليات

التعدين قادرة الآن على استخراج أكثر من 85 % من المعادن و 98 % من الخامات المعدنية – دون حفر بئر أو تعريض حياة العمال للخطر. يمكن للآلات المطورة حديثًا المستخدمة في الطحن والسحق استخراج المعادن من الأرض بطاقة أقل من أي وقت مضى. لا يزال عمال المناجم يستخدمون الآلات الثقيلة، مثل المتفجرات والشاحنات والمثاقب والجرافات، خاصة إذا كان عليهم الحفر عميقًا في الأرض. ومع ذلك، فقد سمح التقدم التكنولوجي لعمال المناجم بالتنقيب بدقة أكبر وبضرر أقل للبيئة المحيطة. ويمكن أيضًا استخدام آلات أكثر كفاءة لتقليل استهلاك الطاقة وتحسين عدد المعادن أو الفلزات المستخرجة من العمود.

تاريخ التعدين غني ومعقد. لقد أدى التعدين إلى تقدم كبير للمجتمع، لكن مخاطر التعدين أدت أيضًا إلى وفاة العديد من العمال. ومع استمرار التقدم التكنولوجي، أصبحت تقنيات التعدين أكثر دقة وكفاءة. في المستقبل، قد تلغي التقنيات الثورية الحاجة إلى المشاركة العملية من عمال المناجم تمامًا.

# التعديـــن الهيدروليـــكي

طور الرومانيون تقنية التعدين المثيرة للاهتمام، وقد أطلق عليها **بليني** (تحطيم الجبل) Ruina Montium وقد استندت إلى استخدام الماء المضغوط. لتقييم فوائد هذه الطريقة، يجب أن نتذكر أنّ استخراج الذهب من خاماته يصبح مجدياً اقتصادياً عندما يتجاوز تركيز المعدن 0.5 جزء في المليون (أي 0.5 غرام/ طن)، وهذا يعني أنّ الكشف عن صخرة بحجم متر مكعب واحد، ذات قساوة وثبات مختلفين ومن ثم تقطيعها بدقة للحصول على الأكثر على 2.5 غرام من الذهب، وهي قطعة بالكاد تكون أكبر من رأس عود ثقاب. فإذا أخذنا بعين الاعتبار أيضاً الحقيقة بأنّ الصخرة يجب كسرها يدوياً، باستعمال الأزاميل والمطارق الخشبية، وسحبها إلى قيعان الآبار، ومن ثم رفعها عالياً ما لا يزيد عن 30 كيلوغرامات أو نحو ذلك في المرة الواحدة، يمكن للمرء أن يفهم التباطؤ الشديد للتعدين الذي كان في عهدهم، وهناك تصوير واقعي لهذا النشاط تركه لنا ديودوروس الصقلي Diodorus Siculus (توفي 30 ق.م) في الكتاب الثالث [lib. III].

على أطراف مصر وفي الأرض المتاخمة بين شبه الجزيرة العربية وأثيوبيا، توجد منطقة تحوي على الكثير من مناجم الذهب الكبيرة، حيث يستخرج الذهب بكميات كبيرة مع الكثير من العمل وبنفقة كبيرة. لأن الأرض مظلمة بطبيعتها وتحوي على ترسبات وعروق من الرخام الأبيض البرَّاق على نحو استثنائي، ومن هنا يقوم المشرفون على المناجم بالحصول على الذهب بمساعدة الكثير من العُمَّال. في الواقع، كان ملوك مصر يحكمون بتعدين الذهب على من تثبت إدانته بجريمةٍ ما وأسرى الحرب بالإضافة إلى أولئك الذين اتهموا بغير وجه حقٍ وألقي بهم في السجن بسبب غضب الملوك، بالإضافة إلى أن مثل هؤلاء الأشخاص - ومن حين إلى آخر - كانوا يأخذون جميع أقاربهم أيضاً، وبهذه الطريقة لا يوقعون العقاب على المجرمين فحسب بل في الوقت ذاته يضمنون عائداتٍ ضخمةٍ من عملهم، أولئك الذين أنزل بهم هذا العقاب، وعدد كبير

وكلهم مقيدون بالسلاسل، يعملون بلا توقف ليلاً ونهاراً، دون استراحة ولا مجال للهرب، يراقبهم الحُرَّاس المختارين من بين جنود البرابرة الذين يتكلمون لغة مختلفة حتى لا يتمكن أحد منهم، من خلال المحادثة أو الاتصال الودي، أن يفسد الحُرَّاس للتعاطف معه.

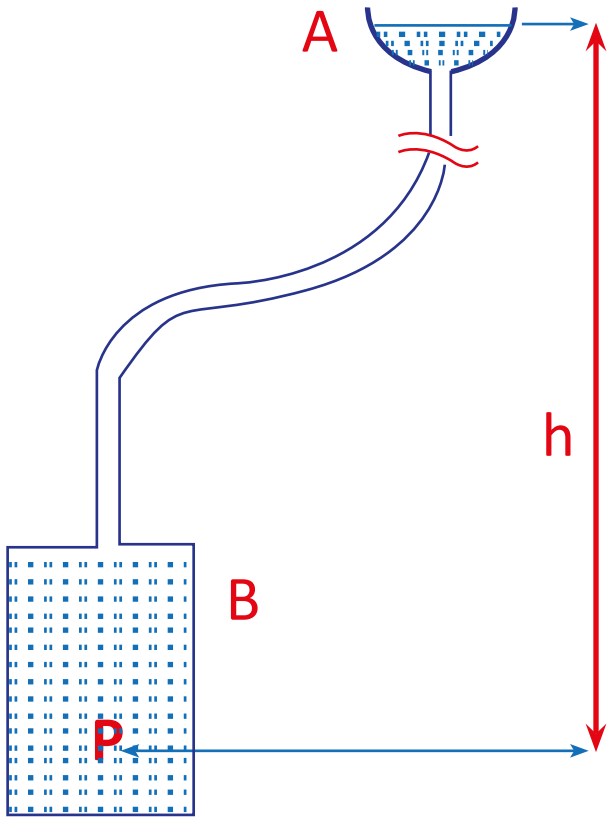
يؤخذ الذهب من الأرض الصلبة في بادئ الأمر عن طريق حرق الأرض بالنار وبعد تفتيتها، يواصلون العمل على الأرض بأيديهم، تسحق الصخرة الطرية التي يمكن جمعها بالقليل من الجهد والتي يهشمها عشرات الآلاف من البؤساء التعساء بالمطارق الثقيلة. يشرف على العملية بأكملها عاملٌ ماهرٌ يميز الحجر ويخرجه إلى الخارج، من بين أولئك المخصصين لهذا العمل في المقالع، أولئك الأقوياء الذين يكسرون الصخر بمطارق حديدية، لا يستخدمون أي مهارةٍ سوى القوة فقط، كما يقومون بحفر الأنفاق في الحجر، ليس بخط مستقيم ولكن أينما تقودهم الصخرة اللامعة. حالياً هؤلاء الرجال، الذين يعملون في الظلام، وبسبب ضيق والتفاف الممرات فإنهم يحملون المصابيح المثبتة على رؤوسهم، في معظم الوقت يغيرون وضع الجسم ليتبعوا خاصية معينة من الصخر، ويرمون بكتل الحجارة إلى الأرض كلما قطعوها، إنهم يعملون في هذه المهام بشكلٍ متواصلٍ ودون توقفٍ، وتحت الجهد وضربات المراقبين. أولئك الذين لم يبلغوا سن الرشد بعد، بحيث يدخلون الأنفاق والدهاليز المتشكلة بفعل إزالة الصخر، يجمعون بشكلٍ مرهقٍ قطع الصخر ويحضرونها للخارج في الفسحة أمام المدخل، ثم يأخذ من هم تحت عمر الثلاثين هذه الحجارة ويسحقونها بمدقات الحديد الهاون بكميات محددة إلى أن يجعلوها أصغر من حجم حبة البِيقِيَةُ Vicia (مثل الفول)، ثم يستلم العجائز من النساء والرجال الصخور الصغيرة ويضعونها في المطاحن، التي يوجد عددٌ كبيرٌ منها موضوعة على التوالي، ويأخذون مواقعهم في مجموعات تتألف من اثنين أو ثلاثة عند مقبض كل طاحونة، يطحنون كمية الحجارة المعطاة إليهم حتى تصبح باتساق من أجود أنواع الطحين. وبما أنه

ليس لديهم فرصة ليعتنوا بأجسامهم، وليس لديهم ملابس يستروا بها أنفسهم، لا يمكن لرجل أن ينظر إلى هؤلاء البائسين دون أن يشعر بالشفقة عليهم، بسبب القسوة الكبيرة التي يعانونها. في الواقع، لا رحمة ولا احترام يمكن تقديمها لأيّ رجلٍ مريضٍ أو عاجزٍ أو مسنٍ ولا حتى إلى أيّ امرأة حامل، بيد أنهم وبدون استثناء كانوا مكرهين بالضرب ليستمروا بعملهم، إلى أن يموتوا من المعاملة السيئة في وسط تعذيبهم؛ ونتيجةً لذلك، يعتقد الفقراء والتعساء بأنّ عقابهم قاسٍ جداً في الحاضر، ولا يمكن أن يكون المستقبل أكثر خوفاً من الحاضر ولذلك فإنهم ينظرون إلى الموت كشيءٍ يرغبون به أكثر من الحياة بحد ذاتها.

في نهاية العملية، يتلقى العُمَّال المهرة الحجارة التي طُحنت وتحولت إلى مسحوق ويكملون معالجتها، إنهم ينخلون الرخام على منضدة مائلة، ويصبون الماء أثناء العمل؛ وعندما يتدفق التراب بعيداً بفعل جريان الماء على مستوٍ مائل، فإن ما يحويه من الذهب يبقى على الخشب بسبب وزنه. ثم يفركون الحجر بأيديهم عدة مرات، ومن ثم يضغطون برفق بالإسفنج ليزيلوا به أي مادة مسامية أو ترابية، ولا يتبقى سوى تبر الذهب الخالص. أخيراً، يأخذ عامل ماهر آخر ما يُجمع ويضعه بمقياس ثابت ويزنه في جرار طينية، ويمزج معه كمية من الرصاص تتناسب مع الكتلة، وحبيبات ملح والرصاص، أخيراً يضيفون حب الشعير، وبعدئذٍ يوضع غطاء فوق الآنية ومن ثم تُختم بالطين، ومن ثم يطبخ هذا في فرن لمدة خمسة أيام وخمس ليالٍ وفي نهاية هذا الفترة، عندما تبرد الجرار، لا يبقى أي أثر للمادة الأخرى موجود، وإنما يتبقى الذهب الخالص، مع القليل من النفايات». بغض النظر عن القسوة الواضحة للعمل الجبري في وصف الصقلي، كان هناك مستوىً متدنٍ جداً في الإنتاجية، وهي تفاصيلٌ توحي بالفكر العقلاني للرومان الذين ينقلون النشاط من الأنفاق إلى الهواء الطلق، وهكذا أصبح من الضروري أن يكون الانهيار الجبلي الحامل للذهب تحت ثقله، أو الانفجار الداخلي، وذلك باستعمال وسائل خطرة جداً في حروب الحصار: مثل الألغام، ومن الواضح أنّها ليست متفجرة (Rossi et al., 2009).

## تقنيـــــة «تحطـــيم الجبـــل»

تُعـرف هـذه التقنيـة أيضـاً ببرميـل باسـكال، ويبـين الشـكل مخطـط عملهـا باختصـار، إذا كان الخـزان العلـوي A، عنـد الضغـط الجـوي، مرتبطـاً بالخـزان السـفلي B بواسطة صمـام، والضغط المائـي في الخزان السفلي B هو $P = h \times d \times g$ ، حيث h هـو فـرق الارتفـاع بـين الخـزان العلـوي والخـزان السـفلي، و d هـي الكتلـة لـكل وحـدة حجـم مـن السـائل، و g هـي تسـارع الجاذبيـة.




مبدأ تقنية برميل باسكال (Rossi et al., 2009)

قد تبدو الظاهرة متناقضة: فإذا كان الخزان السفلي برميلاً، أمكن كسره بسهولة عن طريق أنبوب صغير (بغض النظر عن قطره لكن يهمنا طوله فقط)، ومتوضّع بشكلٍ عمودي، ومرتبطٌ به ومليءٌ بالماء.

يمكن وصف استخدام تقنية «تحطيم الجبل» عملياً كما يأتي: يحفر عمال المناجم العديد من الأنفاق الضيقة جداً والمتقاربة في موقع واحد حيث إنهم يحفرون أيضاً تجويفاً كبيراً. كانت سمة هذا التجويف أنّ أحد جدرانه الطويلة كان قريباً بما يكفي من السطح الخارجي للجبل، ربما عشرة أمتار على الأكثر، وعلى ارتفاعٍ معتدلٍ عن سفح الجبل. مع انتهاء الأعمال، التي استعادوا من خلالها أيضاً المعدن المستخرج، (أي عمل التنقيب الذي ينتج ربحاً) وشرعوا في فتح مصارف الحوض العلوي الكبير الذي مُلئ باستعمال أنابيب ماء مركبة مسبقاً والتي توجه لاستخدامها مرات عديدة ولا تزال، للقيام بإجراءات أخرى. كانت الأنابيب، التي يتراوح طولها بين 1 إلى 2 متر مربع ومائلةً قليلاً، وهي تشبه (مع أنها أغلظ كثيراً من) الأقنية الرومانية، مع وجود بعض الأقسام في الدهاليز وأخرى على الجسور التي تجري على طول جانبي الجبال القريبة أحياناً حتى مئات الكيلومترات.

عندما تكون سدادات الماء مفتوحة، يتدفق الماء إلى التجويف ويملأه بسرعة. عندما يمتلئ، يتسبب الفرق في المستوى بين ارتفاع المقدمة والتجويف بأن يكون الضغط متساوياً في جميع نقاط التجويف. بعبارةٍ أخرى، إذا كان الفرق في المستوى بالكاد 10 أمتار، فإنّه يحدث ضغطاً متوسطاً داخل التجويف بشكل تقريبي $10^5$ باسكال، أي أنّ كل متر مربع لسطح التجويف سيكون له قوة تقريبية تعادل $10^5$ نيوتن. بالنظر لسهولة الحساب في تجويف مكعب يبلغ طول ضلعه 10 أمتار لكل جانب يساوي مساحة سطح قدرها 600 متر مربع، فإنّ الدفع الكلي

هو 60 ميغا **نيوتن** (6000 طن)، وهي قوة كانت أكثر من كافية لكسر جدار صخري بسماكة 10 أمتار، ممزقةً إياه كل ممزق وجاعلةً إياه يتناثر في الهواء. كانت كتلٌ كبيرةٌ من الحجر، وبسمك متساوٍ إلى القوة المطبقة تنطلق مثل سدادة الفلين، مما يجعل الجبل بأكمله يفقد استقراره وينهار بطريقة مشابهة جداً إلى التأثيرات التي يسببها المنجم (Rossi et al., 2009).

كان بليني الأكبر، غايوس بلينيوس سيكوندوس Gaius Plinius Secundus (توفي 79م)، وكيل إسبانيا السابق، وهي منطقةٌ غنيةٌ بالمعادن، قدم الوصف الآتي نحو منتصف القرن الأول للميلاد (21, bk. XXXIII): «الطريقة الثالثة للحصول على الذهب تتفوق على عمالقة العُمَّال، حيث تُحفر الجبال التي نُقّب عنها على ضوء المشاعل، وكان تحديد أوقات الاستراحة والعمل لعدة شهور لا يرون ضوء النهار، هذه التنقيبات تدعى الغطاء Aarrugie. حيث تسقط أنفاقها غالباً ويُدفن المنقبين إلى درجة أنها أقل خطراً من البحث عن اللآلئ في قاع البحر، ولكننا جعلنا الأرض خطرة جداً. غالباً ما تترك الأعمدة السميكة لدعم الجبل المغطّى. في التعدين إما عن طريق العمود أو الدهليز، وعوائق السيليكا المجتمعة، التي يجب أن تتحطم باستعمال النار أو الخلّ، لكن في كثيرٍ من الأحيان، بما أنّ الأدخنة والأبخرة قد تخنق المنقبين في مداخل المناجم تلك، تكسّر هذه التشكيلات باستخدام مطارق حديدية تزن 150 رطلاً [45 كغ] وتحمل الشظايا على أكتاف العُمَّال، كلّ رجلٍ يمررها على جاره في الظلام، حتى تصل عند ذاك الواقف في النهاية الذي يرى الضوء. وإذا كان التشكيل طويلاً جداً، فإنهم يكسرونه من الجوانب ويحفرون حوله. ومع ذلك، يُعتبر التنقيب في هذه الصخور أيسر. في الواقع، يوجد نوع من التراب، ونوع من الطين الممتزج بالحصى (يدعى الفطر الأبيض) يكاد يكون من المستحيل كسره، حيث إنه يدكّ

بأسافين من الحديد والمطارق، ويُعتقد أنه لا يوجد شيء أقسى منه ربما ما عدا الطمع بالذهب. عندما ينتهي العمل، فإنهم يدمرون الأعمدة، ويبدؤون بالأخير. السقوط القادم يدركه الحارس الذي يراقب في قمة الجبل. وعن طريق الصوت والإشارات يأمر عُمَّال المناجم بأن يتركوا الأنفاق ويلوذوا بالفرار وينجون بأنفسهم. ينهار انشقاق الجبل تحت وطأة وزنه مع تحطم وحركة الهواء التي لا يمكن لعقل بشري أن يتخيلها. يحملق عُمَّال المناجم إلى هذا الانهيار في الطبيعة كشاهدين. مع هذا، لا يوجد ذهب، ولا يعرفون إن كان يوجد عندما كانوا يحفرون. لتدارك مثل هذه الأخطار كان يكفي أن يكون لديهم أملٌ بالحصول على ما يرمون إليه».

كان الحل المثالي هو استعمال الألغام المتفجرة. وقد وفّر ضغط الماء هذه الإمكانية، لأنّه باستخدامها بشكلٍ صحيح، أصبح الماء في الحقيقة يُعرف بالألغام المائية. كانت هضبة لاس ميدولاسً في إسبانيا ذات طبيعة جيولوجية خاصة ومثالية لممارسة هذه الطريقة الخاصة. كان من الواضح أنّ نسبة الذهب أقلّ من الكمية المذكورة في البداية، مما أدى إلى إحباط أيّ إمكانيةٍ للعمل في النفق، هذا من ناحية، ومن ناحية أخرى، فإنّ الصلابة النسبية للصخر كانت ستعزز من نتائج الألغام المائية. كل ما كان مطلوب هو إحضار كمياتٍ كبيرةٍ من الماء إلى الارتفاع الصحيح. لقد قدم **بليني** وصفاً دقيقاً لهذه التقنية التي تزودنا بتفسيرٍ مفصّلٍ عن أصل المشهد القمري الطبيعي للاس ميدولاس (21, bk.XXXIII): «يوجد عملٌ آخر مساوٍ لهذا العمل يستلزم نفقات أكبر، لأنّه لتحقيق هذا الخراب في الجبال، يجب عليهم أن يجلبوا الأنهار من مرتفعات الجبال لجرف الحطام، وغالباً من مئات الأميال».

بدأت تظهر أقنية التغذية التي تكلم عنها **بليني**، وهو شاهدٌ موثوقٌ، في بعض الأحيان امتدّ لأكثر من 100 كم. وحقيقةً كان من المستحيل العثور على

الماء في مثل هذه المنطقة المعدنية الجافة والمجدبة. «تدعى هذه Corrughi، أعتقد أنها مأخوذة من كلمة Corrivatio (أعمال الأرض)، وبالتأكيد تتطلب عملاً كبيراً، يجب أن يكون السقوط شديد الانحدار حتى يترسّب الماء بحيث يمكنه إزالة الحطام من أعلى النقاط ارتفاعاً». في إشارته لوزن السقوط، قدم **بليني** مفهوم ضغط الماء بشكلٍ غير مناسبٍ، ولكنه ليس مخطئً. بكلمات أخرى، كان عليهم أولاً أن يقيموا ضغط الماء، أو الفرق في المستوى، ومن ثم المضي نحو إنشاء شبكات القنوات المطلوبة لجلب الماء. لو كانت هناك وديان أو أخاديد، لكانوا رفدوها بالقنوات التي حفروها. في بعض الأماكن كان عليهم أن يقطعوا الصخور لإفساح المجال من أجل الأنابيب أو القنوات، وقد أُنجز ذلك بتعليق العُمَّال بالحبال، وأي أحد يراهم من بعيد يعتقد أنهم كانوا يشبهون الطيور. وبالتالي، فإنّهم كانوا يعلقون ليأخذوا المقاييس وخطوط تتبع مسار الماء حتى عندما يكون هناك موطئٌ لأقدامهم.

كان الطريق يُدرس بعنايةٍ ولأسبابٍ جليةٍ يمتد على طول جوانب الجبال التي أقيمَ عليها، فقد كان أقرب بكثيرٍ لقممها من المنحدرات، لا يمكن لعمل الفرق أن يستمر قدماً إلا بتسخير الرجال. وهكذا يتعقبون الاتجاهات التي يجب اتباعها، ومع الميل المناسب وإعداد المخططات على الموقع. «كانوا يختبرون التربة بأيدهم لمعرفة ما إذا كانت ناعمة أو صلبة بما يكفي لدعمها بالعوارض. هذا النوع من التربة يدعى اليوريوم Urium. كانوا يحملون الماء فوق الحجارة والحصباء ويتجنبون اليوريوم. يصنعون عند قمة السقوط خزانات هائلة عند حافة الجبل تماماً، يبلغ طولها مئتي قدم طولاً وعرضاً [60× 60 متر] وبعمق عشرة أقدام، ثلاثة أقدام [إجمالي سعة مكعب تبلغ 5.400 سم]. وكانوا يضعون في هذه الخزانات خمسة سدود، نحو ثلاثة أقدام مربعة ويفتحون بوابات المياه

مجـرّد امتـلاء الخـزان، حيـث ينسـكب المـاء خارجـاً بهـذه القـوة مدحرجـاً شـظايا الحجـارة ... وبسـبب هـذا حققـت إسـبانيا فوائـد جمَّـة».

كان التفسـير الـذي قدمـه **بليني** نموذجيـاً رومانيـاً وقريبـاً جـداً، السـمة الأكثـر وضوحـاً هـي بالتأكيـد صحيحـة: كان مـن المسـتحيل عـدم رؤيـة تلـك الأحـواض الهائلـة، التـي تتجـاوز مسـاحتها 6000 متـر مربـع تقريبـاً، وتغذيهـا شـبكة قنـوات طويلـة جـداً. ولكـن عندمـا تُفتـح الصمامـات، أيـن يذهـب المـاء؟ بالتأكيـد ليـس أسـفل منحـدرات التـل، حيـث يكـون عنيفـاً كمـا لـو أنـه لـم يسـبب حطـام كبيـر، ولا يُصـرّف في شـبكة الأقنيـة المفتوحـة، وفي هـذه الحالـة وفي غضـون بضـع سـاعات قليلـة كان كل شـيء قـد عـاد كمـا كان مـن قبـل. لقـد ذهـب في الدهاليـز التـي حُفـرت سـابقاً، وكلهـا تتجـه نحـو جانـب الجبـل ولكـن دون مخـارج. الدهاليـز التـي لا مخـارج فيهـا والتـي انتهـت بنـوع مـن غـرف التجميـع، كانـت القـوة المائيـة تعـادل حجـم غرفـة الاحتـراق في المناجـم. هـذه الغرفـة، التـي يمكـن أن تكـون دهليـزاً يسـير علـى التـوازي بجانـب الجبـل، لكـن يمتلـئ داخلـه بنحـو 10 أمتـار، بسـرعة بالمـاء مجـرّد فتـح السـدود، ليصـل إلـى الضغـط ذاتـه مـع فـرقٍ في المسـتوى، وعندمـا يصبـح الهـواء مضغوطـاً لأنـه لـم يعـد يتدفـق خارجـاً، وعندمـا يصـل الضغـط علـى الجـدار الداخلـي للغرفـة إلـى قيمـة أعلـى تمامـاً مـن مقاومـة الصخـر، يتشـقق الصخـر بعنـف علـى الفـور، هادمـاً المنحـدر فـوق دعائمـه. تسـبب وزنـه في تلـك المرحلـة في انهيـار المنحـدر، ونظـراً للمقاومـة الضعيفـة لسـحب الصخـر، المتزامنـة مـع سـحبٍ عمـودي، وبالتالـي منـح القطـع خصائصـه العموديـة التـي يمكـن تمييزهـا بسـهولة، في هـذه الحالـة كان الضجيـج الهائـل وحركـة الهـواء التـي أثبتهـا بليني بالفعـل أكبـر. عندمـا انهـار الجبـل، طُـرد الهـواء المضغـوط ضمـن التجويـف علـى الفـور، بالتزامـن مـع حركـة الهـواء الناتجـة عـن الكتـل الصخريـة المنهـارة، الأمـر الـذي تسـبب بتلـك العاصفـة العنيفـة التـي ذكرهـا **بليني**.

نظراً لأنّه كان هناك حاجة إلى جزء متواضع فقط من نحو 6000 متر مربع من الماء المتجمع لإنتاج انفجار داخلي، مجرد أن ينفتح جانب الجبل، فإن بقية المياه تتدفق بعنف من الدهاليز نحو الخارج، وهي تسحب بشكل مهول كل قطع الصخر المكسورة. وعندما تضرب هذه القطع الجدران فإنها تسبب تآكلها بشكلٍ أكبر، مما يجعلها أوسع، وهي تسحب نحو الأسفل كتلة كبيرة من الصخر الممزقة أكبر من تلك الناجمة عن الانفجار. يحدث الأمر كله خلال بضع دقائق، وتتراكم هناك كمية من الصخر تحتاج عدة سنوات من العمل والنشاط، وفي تلك المرحلة يقتصر الأمر على الطحن والانتقاء. أهملت هذه التقنية خلال عصر النهضة. على سبيل المثال: نُفذت أعمال الهدم لفتح الفجوات في جدران العدو عن طريق حفر تجاويف تحت الأرض، وهي التي دُعمت فيما بعد. كان الانهيار ببساطة سببه إشعال النار في الدعائم الخشبية.

تصوّر مارينو دي جاكوبو Mariano di Jacopo والمعروف بتاكولا Taccola، وصمّم استعمال براميل البارود الموجودة أسفل الدهليز. بعد سنواتٍ قليلةٍ، طبق جيورجيو مارتيني (توفي 1501م) Giorgio Martini هذا المفهوم للهجوم على جناح قلعة كاستيلنوفو، التي تدعى أيضاً: «ماساشيو أنجيونو» في نابولي نحو عام 1494م. من ذلك اليوم فصاعداً أصبحت كلمة الألغام مرادفة للانفجار (Rossi et al., 2009).

# الفصل الثاني

# المعادن والخامات الاقتصادية

| | |
|---|---|
| تصنيف المعادن | المعادن المكونة للصخور وخصائصها |
| تصنيف الخامات الاقتصادية | الأحجار الكريمة |
| الأهمية الاقتصادية للخامات | صناعة وهندسة المعادن |
| أنواع العمليات المعدنية | التنقيب واستكشاف المعادن |

# المعـادن والخامـات الاقتصاديـة

## مُقَدِّمَة

من المعروف أن 99.5 % من القشرة الأرضية يتكون من ثلاثة عشر عنصراً فقط وهي: الأكسجين، السيليكون، الألمنيوم، الحديد، الكالسيوم، الصوديوم، البوتاسيوم، المغنيسيوم، التيتانيوم، الهيدروجين، الفسفور، المنجنيز، الفلور. والمتبقي من هذه النسبة ( 0.5 %) تشتمل على عناصر كثيرة لكن أهمها ما يأتي: الذهب، الفضة، البلاتين، النحاس، الرصاص، الزنك، القصدير، النيكل. وهذه هي المعادن الاقتصادية الأساسية التي يقوم عليها اقتصاد الدول.

يوجد في القشرة الأرضية نحو ألفي معدن تدخل في تكوين أغلب الصخور. والمعدن هو الوحدة البنائية للصخور. فالصخر يتكون من معدن واحد أو أكثر. ومن أمثلة الصخور التي تتكون من معدن واحد الحجر الجيري المكون من الكالسيت ($CaCO_3$). والمادة يجب أن توجد في الطبيعة حتى يطلق عليها اسم معدن فكبريتات الكالسيوم مثلا الموجودة في المادة الطبيعية تعرف باسم معدن الأنهيدريت ($CaSO_4$) وإذا احتوت ماء في تركيبها فتعرف باسم الجبس ($CaSO_4\,2H_2O$). والتركيب الكيميائي وحده لا يعتبر مميزا للمعادن فقد يتفق معدنان في التركيب الكيميائي ولكنهما يختلفان في الصفات الفيزيائية أو التركيب البلوري (معادن متعددة الشكلية مثل الكالسيت والاراجونايت).

**المعـــادن Minerals** عبارة عن مواد صلبة متجانسة، ولها هياكل منتظمة غير عضوية تتشكل طبيعياً في قشرة الأرض، وداخل الصخور التي تتعرض لعمليات جيولوجية مختلفة، بفعل المياه الجوفية والسطحية، وعادةً ما تتواجد

المعادن في الطبيعة على هيئة مواد خام، كما تكون هذه المعادن مرتبطة مع بعضها البعض ومع عناصر أخرى. وتُعرّف المعادن من الناحية الكيميائيّة بأنّها مواد تتمتّع بعدة خصائص منها؛ الموصلية للكهرباء واللمعان، وتُصنّف المعادن بالاعتماد على خصائصها إلى معادن فلزية ومعادن غير فلزية.

**المعادن الفلزية Metals** هي جميع العناصر الكيميائية التي تفقد الإلكترونات خلال التفاعلات الكيميائية، ويُستثنى منها غاز الهيدروجين، والمعادن الفلزية من أنواع المعادن الموصلة للكهرباء. تنتشر الفلزات في قشرة الأرض وفي المياه والغلاف الجوي ومن الأمثلة عليها؛ الألومنيوم، والحديد، والكالسيوم، والصوديوم، والمغنيسوم، والمنغنيز.

**المعادن غير الفلزية أو اللافلزية Non-metals** هي أنواع المعادن التي تمتلك خصائص فيزيائية لا تمكنّها من توصيل الكهرباء، وبذلك فهي تختلف تماماً عن الفلزات في خصائصها واستخداماتها، وعموماً تُعد نسبة وجود اللافلزات أقل بكثير مقارنة مع الفلزات. تتواجد في الطبيعة على هيئة غازات أو سوائل أو مواد صلبة، ومن خصائصها؛ أنها من الموصلات التي لا تتمتع بخاصية اللمعان، وقوامها هشٌّ، وموصليتها للحرارة والكهرباء ضعيفة نسبياً باستثناء مادة الجرافيت، وتنتشر في الطبيعة، وجسم الانسان، والنباتات، ومن الأمثلة عليها الكربون، و الكبريت، والأكسجين، والنيتروجين.

المعادن عبارة عن مواد صلبة متجانسة، ولها هياكل منتظمة غير عضوية

# تصنيـف المعـــادن

أمكن التعرف حتى الآن على ما يقرب من الـ 2000 معدن في قشرة الأرض. الكثير منها نادر أو قليل الوجود، والقليل منها - ما يقرب من المائتين شائع الوجود. تصنف المعادن كيميائياً (على أساس الشق الحامضي) وبلورياً (على أساس البناء الذري) إلى ثماني طوائف Classes على النحو التالي:

| الطائفة | المعادن التابعة لها |
|---|---|
| طائفة المعادن العنصرية<br>Native elements | • الفلزات العنصرية: الذهب، الفضة، النحاس، البلاتين، الحديد<br>• أشباه الفلزات العنصرية: الزرنيخ، البزموث<br>• اللافلزات العنصرية: الكبريت، الألماس، الجرافيت |
| طائفة الكبريتيدات Sulfides<br>والأملاح الكبريتية Suffocates | ارجنتيت – سنبار – كالكوسات – ريالجار– بورنايت – أوربمنت – جالينا – ستبنايت – سفاليرايت – بايرايت – كالكوبايرايت |
| طائفة الأكاسيد Oxides<br>والهيدروكسيدات Hydroxides | كوبرايت – إلمنايت – بيريكليز– روتايل – زنكايت – بيرولوسايت – كورندوم –كاسيترايت – هيمتايت – يورانيتايت – مجنيتايت |
| طائفة الهاليدات Halides | هاليت – فلورايت – أتاكامايت – كريوليت |
| طائفة الكربونات Carbonates<br>النترات Nitrates، البورات Borates | كالسايت – دولومايت – رودوكروزيت – كانزيت – سترونشيانيت – ويذيريت – سيديرايت – ملاكايت – أزورايت |

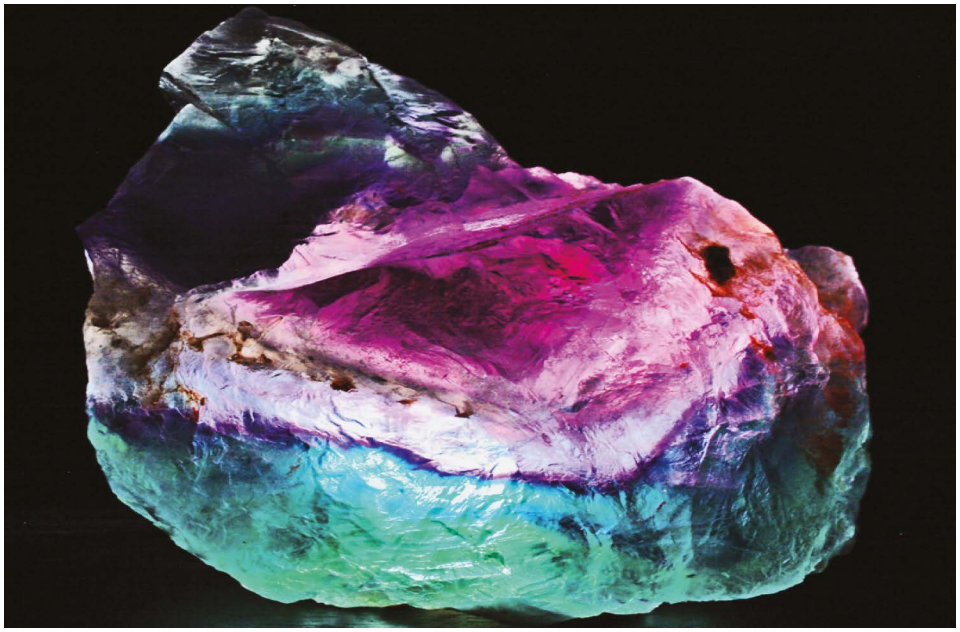
| الطائفـــة | المعـــادن التابعـــة لها |
|---|---|
| طائفة الكبريتات Sulfates، الكرومات Chromates، المولبدات Molybdates، التنجستات Tungstates | أنهيدرايت – انجليزايت – بارايت – جبس – سلستايت – إبسومايت – كروكويت |
| طائفة الفوسفات Phosphates، الزرنيخات Arsenates، الفانادات Vanadates | أبتايت، مونزايت |
| طائفة السيليكات Silicates | أوليفين – الزركون – جارنت – تورمالين – والبورون – بيريل – أوجايت – هورنبلند – بايوتيت – مسكوفايت – تلك – أرثوكليز – ميكروكلين – البلاجيوكليز– نيفيلين – لوسايت |

الذهب Au من طائفة الفلزات العنصرية

الجرفايت C من طائفة اللافلزات العنصرية

الكالكوبيريت CuFeS2 من طائفة الكبريتيدات

إلمنايت $FeTiO_8$ من طائفة الأكاسيد



فلورايت $CaF_2$ من طائفة الهاليدات

الكالسايت $CaCO_3$ من طائفة الكربونات

الانهيدرايت $CaSO_4$ من طائفة الكبريتات

الأباتيت $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ من طائفة الفوسفات

الجارنت $X_3Y_2(SiO_4)_3$ من طائفة السيليكات

# كيـــف تتكـــون المعـــادن

توجد عدة طرق مختلفة تتكون بواسطتها المعادن الموجودة في القشرة الأرضية وهي كالتالي:

- **التبلور المباشر من الصهارة Direct Crystallization from Magma**

عندما تخرج الصهارة من باطن الأرض فإنها تكون هذه المعادن التى تتبلور من الصهارة والتي تؤدي إلى تكون الصخور النارية Igneous Rocks.

- **التبلور من محاليل مائية Crystallization from Aqueous Solutions**

هذا النوع من المعادن تتكون من المحاليل المائية الموجودة على سطح القشرة الأرضية، والتى تكون الغلاف المائي، فالمعادن التى تتبلور من هذه المحاليل تكون الصخور الرسوبية الكيميائية، وإذا كان للكائنات الحية نصيب فى تبلور هذه المعادن فتتكون الصخور الرسوبية العضوية.

- **إعادة ترتيب ذرات المعادن Re-arrangment of Minerals Atoms**

بعض المعادن يمكن أن تتكون نتيجة لإعادة ترتيب الذرات فى بلورات المعادن السابقة التكوين، حيث من الممكن أن يصحب إعادة هذا الترتيب إزالة أو إضافة بعض الذرات عند تكون المعدن الجديد. كما أن المحاليل التى تتخلل الشقوق الموجودة فى الصخور تساعد فى هذا التغير من معدن إلى معدن جديد.

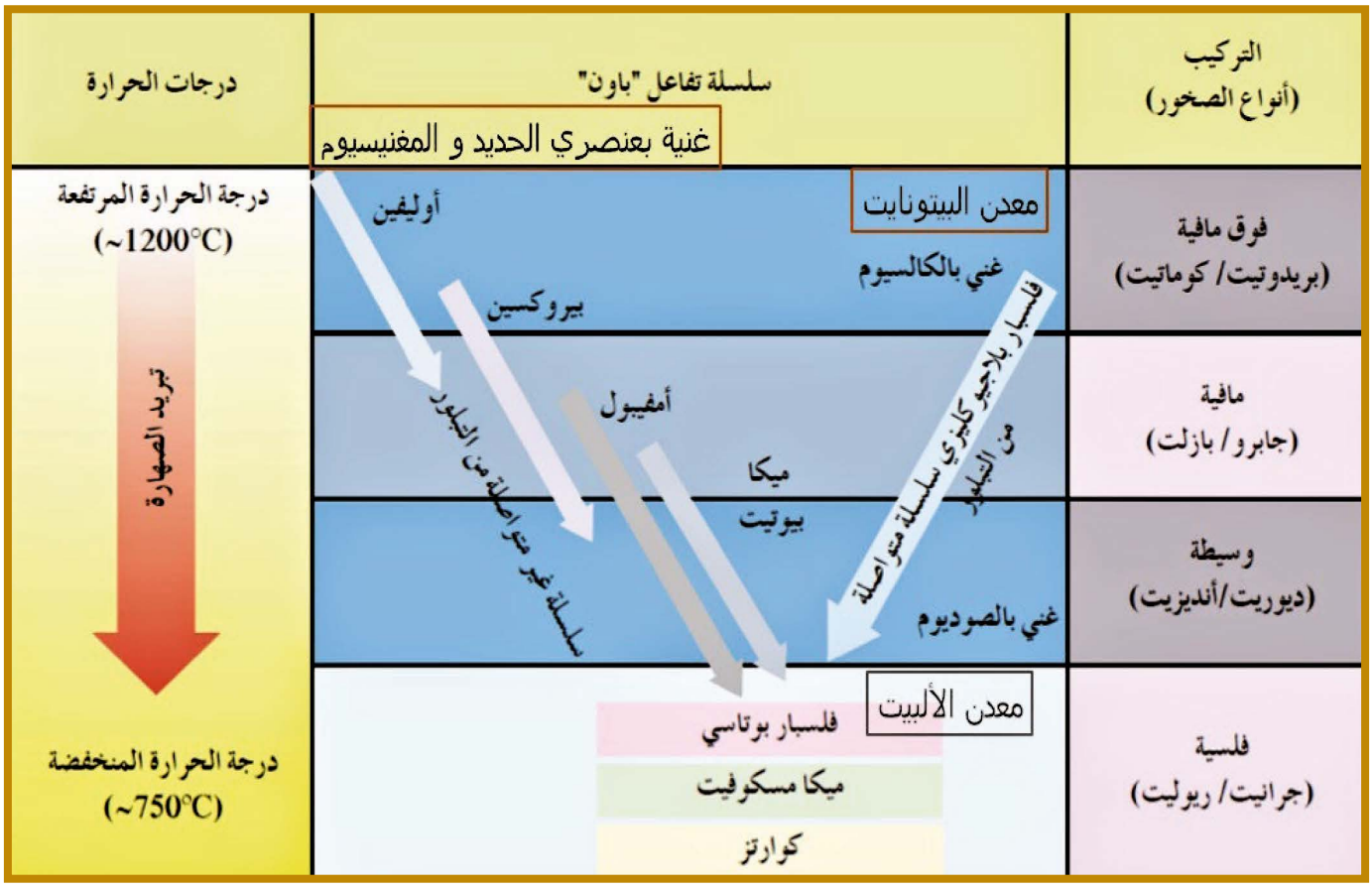
عندما تبدأ الصهارة فى التجمد فإن الأطوار الجامدة تتكون فى درجات حرارة مختلفة، ولذلك تتدرج هذه الأطوار فى تركيبها البلوري (المعدني). وقد وضع العالم بوين تبلور الصهارة المتدرج بما أسماه التتابعات التفاعلية فى الصخور النارية. وقد قسم هذه التتابعات الى قسمين:

## • سلسلة التفاعل المتصلة Continuous Reaction Series

وهـو يخـص تتابـع التبلـور فـى مجموعـة البلاجيوكليـز إذ أن التبلـور يبـدأ بالانورثيـت وينتهـي بالالبيـت. ويسـمى هـذا التتابـع التفاعلـي تتابعـا تفاعليـا متواصـلا، لأن المعـادن التـى تتبلـور هنـا تكـون مراحـل مختلفـة فـى سلسـلة مـن المحاليـل الصلبـة بترتيـب بلـوري معـين وثابـت وهـو ترتيـب البلاجيوكليـز، حيـث أن في هـذه السلسـلة يتحـول التركيـب الكيميائـي للمعـادن، التـي تتبلـور مبكـرا، تدريجيـا وذلـك بالتبـادل الأيونـي بـين عنصـر واحـد في المعـدن (Ca) وعنصـر في الصهـارة (Na) . تعتبـر مجموعـة معـادن البلاجيوكليـز مثـال علـى هـذه السلسـلة.

## • سلسلة التفاعل غير المتصلة Discontinuous Reaction Series

وهـو يخـص تتابـع التبلـور لمجاميـع معـادن الأوليفـين والبيروكسـين والامفيبـول والميـكا. وفـى هـذا التتابـع يكـون التركيـب البلـوري للمعـادن المتتاليـة مختلفـا، ولذلـك يسـمى تتابعـا متقطعـا. وتضـم هـذه السلسـلة مجموعـة المعـادن المافيـه، حيـث يتفاعـل معـدن الأوليفـين، الـذي يتكـون مبكـرا، مـع بقيـة الصهـارة ليكـون معـدن جديـد ذو تركيـب كيميائـي مختلـف




سلسلة تفاعلات باون

# المعـــادن المكونـــة للصخـــور

يلاحظ أن عنصري الأوكسجين ($O_2$) والسيليكون (Si) أكثر العناصر الكيميائية تواجدا الموجودة في القشرة الأرضية، كما أن ثاني أكسيد السيليكون ($SiO_2$) هو من أكثر الأكاسيد ك أنيون (Anion) المكونة لمعادن الصخور النارية و المتحولة. وعلى هذا الأساس تم تقسيم المعادن الحاوية له إلى مجموعة معادن السيليكات، وهى تكون ما نسبته 92 % من معادن القشرة الأرضية . كما أن بقية المعادن تم تقسيمها إلى معادن غير سيليكية أيضا باستخدام الشق الأيوني لمعدلاتها الكيميائية، كأكاسيد المعادن ، والكبريتيدات والفوسفات والكربونات والكبريتات، و البرومات، و النتريدات)، وتتمثل هذه في ثماني مجموعات معدنية، تتكون من لمجموعات معادن غير سليكاتية، ويشكل الباقي مجموعة المعادن السليكاتية.

## • المعـــادن السيليكاتيـــة Silicate Minerals

### ■ الكـــوارتـــز Quartz ($SiO_2$)

يعتبر معدن الكوارتز من أشهر المعادن تواجدا في معظم الصخور المعروفة، وهو يلي مجموعة معادن المايكا البيضاء في التبلور من الصهارة النارية، ليسود في الصخور النارية الفلسية (Felsic Rocks- Granite) ، ويتواجد أيضا من ضمن المعادن السائدة في الصخور الرسوبية الرملية. يتكون معدن الكوارتز النقى من ثاني أكسيد السليكون ($SiO_2$)، وله أشكال رباعية الأوجه (Tetrahedral – $SiO_4$) متشابكة في جميع الاتجاهات (أي في الاتجاهات الثلاثة التي تحدد الفراغ الهندسي لبنية التتراهيدرال) ، وهذا المعدن لا يعد من مجموعة الأكاسيد، ويصنف من مجموعات المعادن السليكاتية لأنه متكون من السليكون. وعلية فهو من المعادن (الكوارتز) السليكاتية الوحيدة الذى لا يتأثر بعوامل التجوية الكيميائية ولا يتغير إلي معادن طينية.

## • مجموعة معادن الفلسبارات Feldspars

تتواجد هذه المعادن في صخور القشرة الأرضية بنسبة تتراوح من 51 إلى 60 %، وتشابه فى تركيبها الداخلي الكوارتز، ولكنها تختلف عن الكوارتز بوجود أيونات من الألومنيوم تحل محل السليكون فى داخل الأشكال الرباعية الأسطح، ولذلك يتكون بها شق قاعدي ليتوازن مع أيونات الشحنات السالبة في المعادلة الكيميائية للمعدن، والتي تتكون من ذرات الأكسجين نتيجة لاستبدال السليكون بالألومنيوم.

تنقسم معادن الفلسبار إلى قسمين هما البلاجيوكليز (Plagioclase) ويعرف بالفلسبار الصودى، لاحتوائه على عنصري الصوديوم، والآخر يعرف بالفلسبار الحاوي لعنصر الكالسيوم، ويتميز بوجود حزات (التوأمية- Twinning) في بلورات ، والتي بواسطتها يمكننا التعرف أو تميز مجموعة معادن البلاجيوكليز عن مجموعة معادن الفلسبارات البوتاسية المتكونة من معدن الأرثوكليز ($KAlSi_3O_8$- Orthoclase)، ومعدن الميكروكلين ($KAlSi_3O_8$- Microcline). وتتمثل معادن البلاجيوكليز في معدني الألبايت ($NaAlSi_3O_8$- Albite) والأنورثيت ($CaAl_2Si2O_8$- Anorthite)، وهما يتميزان بانعكاس الضوء من أسطحها البلورية.

## • مجموعة معادن الأوليفين Olivines

وهذا النوع من المعادن يتكون من أورثوسيلكات الحديد والماغنسيوم $(Mg,Fe)_2SiO_4$)، ووتتضمن هذه المجموعة فورستيايت ($Mg_2SiO_4$- Forsterite) الغني بعنصر الماغنيسيوم ، ومعدن فيالايت ($Fe_2Si\ O_4$- Fayalite) الغني بعنصر الحديد وكلاهما نهايتي المحلول الكيميائي الصلب لمجموعة الأولفين، وهى أول المعادن السيليكاتية التى تتبلور من الصهير فى درجات حرارة عالية، لذلك فهي شائعة فى نطاق الوشاح العلوي (Lithosphere)، وتتميز باللون الأسود إلى الأخضر الزيتوني.

## • مجموعة معادن البيروكسين Pyroxenes

تتكون هذه المعادن من التركيب لسيليكات المغنيسيوم والحديد والكالسيوم مع أيونات التتراهيدرال الرباعية الأوجه ($SiO_4$) كشق حامضي (الأنيون) ومن بين هذه المعادن معدن الأوجيت ($(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)Si_2O_6$) المعدن الشائع فى هده المجموعة الذي يتميز بلونه الداكن الأسود المخضر، او البني الغامق اللون. وكذلك معدن الهيبرسين (Hypersthene) الذي يرمز له كيميائيا بالمعادلة $(Fe,Mg)Si_2O_6$. وتنقسم مجموعة معادن الباريوكسين إلى مجموعتين، المجموعة هي عبارة عن مجموعة كلينوبايروكسين (Clinopyroxene) والمجموعة الأخرى تمثل مجموعة معادن الأرثوبايروكسن (Orthorhopyroxene). وتعد معادن مجموعة اليايروكسن من أكثر المعادن الأساسية انتشارا في كثير من الصخور النارية والصخور المتحولة.

## • مجموعة معادن الأمفيبول Amphiboles

مجموعة هذه المعادن ذات اللون الغامق تلي مجموعة معادن البيروكسين في النشأة والتبلور ضمن التفاعلات الكيميائية للمعادن السليكاتية المتقطعة في سلسلة بوين، ويكوِن الشق الحمضي لمجموعة معادن الأمفيبول سلسلة مضاعفة (مزدوجة) من أشكال التتراهيدرال الرباعية الأسطح، الممثلة بالتركيب الكيميائي $(Si_4O_{11})$-6. وهذه المعادن تشبه معادن البيروكسين لدرجة يصعب أحيانا التفريق بينهما، إلا أنها تحتوي على سلسلة مزدوجة من السيليكات وأيون الهيدروكسيل. يعتبر معدن الهورنبلند (Hornblende) ذي اللون الأسود والذي يرمز له بالرمز $(CaMg)(FeAl)Si_8O_{22}(OH)_2$ هو أحد معادن الأمفيبول.

## • مجموعة معادن المايكا Mica Group

ومجموعة هذه المعادن تلي معادن الأمفيبول فى التبلور من الصهارة. ويشكل الشق الحمضي لمعادن الميكا صفحة من الأشكال الرباعية الأوجه، ويمكن تمثيل التركيب الجزيئى لهذه الصفحة بالرمز $(Si_4O_{10})$-4. تتكون هذه المعادن من سيليكات الألومنيوم والبوتاسيوم والمغنيسيوم والحديد مع أيون الهيدروكسيل والفلور، والصفة المميزة للمايكا هى أنها تتواجد على شكل صفائح رقيقة جدا، ولها انعكاس ضوئي عالي. ومن أهم معادن الميكا المايكا معدن البايوتيت $K_2(Mg,Fe)_2(SiAl)O_{10}(OH)_2$. (biotite) ذات اللون الأسود، وهو يشتمل على بوتاسيوم ومغنسيوم وحديد في شقه القاعدي. أما المعدن الثاني والرئيسي في مجموعة الميكا هو معدن المسكوفايت ($KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ ،Muscovite) الفاتح اللون ويشتمل على بوتاسيوم وألومنيوم في شقة القاعدي.

### ■ معادن الفلسباثويد Feldspathoids

وهذه المعادن تشبه معادن الفلسبار إلا أن نسبة السيليكا فيها أقل، ومن أهم هذه المعادن معدن اللوسايت ($KAlSi_2O_6$ ،Leucite ).

### ■ المعادن الطينية Clay Minerals

وهى معادن لا تتبلور مباشرة من الصهير كالمعادن السابقة، ولكنها تتكون نتيجة لعوامل التعرية الكيميائية على معادن السليكات المختلفة. ويتكون الشق الحمضي للسيليكات فى المعادن الطينية من السليكون والأكسجين فقط، أما ألالومنيوم فيشكل جزءاً من شقها القاعدي. ويدخل فى تركيب المعادن الطينية أيضا نسبة من الهيدروكسيل (OH)، وهى تتواجد على هيئة صخور رسوبية ومن أهم أنواعها المعدنية البنتونيت ($Ba\ TiSi_3O_9$) والكاولينيت ($Al_2Si_2O_5(OH)_4.2H2O$).

## • المعادن غير السيليكية

هـذه المعـادن لا تدخـل السـليكات الرباعيـة في تركيبهـا ، وتعـد هـذه المعـادن مـن أقـل المعـادن انتشـار في الكـرة الأرضيـة، مقارنـة بالمعـادن السـليكاتية، و تشـكل فقـط 8 % مـن إجمالـي معـادن القشـرة الأرضيـة. وهـذه المعـادن توجـد إمـا منفـردة كالذهـب والنحـاس، أو معـادن (خامـات معدنيـة حـال كونهـا ذات جـودة اقتصاديـة) علـى هيئـة أكاسـيد وكبريتيـدات وكبريتـات وهاليـدات وفوسـفات نوجزهـا كمـا يلـي :

### ■ أكاسيد المعادن Mineral Oxides

تشـكل أكاسـيد الحديـد الجـزء الأكبـر مـن الأكاسـيد الفلزيـة فـى الطبيعـة، ومـن أهـم هـذه المعـادن معـدن الهيماتيـت (Hematite) ذا اللـون الأحمـر، ومكـون ويتكوّن مـن أكاسـيد الحديـد المؤكسـد الـذي يحمـل ثـلاث شـحنات موجبـة Fe+++ (أيـون حديديـك) وتركيبـه الكيميائـي $Fe_2O_3$، ومعـدن الليمونيـت (limonite ،FeO.$(OH.nH_2O$) الـذي يحتـوى علـى عـدة جزيئـات مـن المـاء فـى تركيبـه البلـوري ولونـه يتـراوح بـين الأصفـر والبنـي. وهنـاك أيضـا معـدن الماجنتيـت (Magnetite $Fe_3O_4$)، الأسـود اللـون، وهـو يتبلـور مـن الصهـارة فـى درجـات عاليـة مـن الحـرارة والضغـط الشـديد . ويحتـوى جـزئ الماجنتيـت علـى أيـون مـن الحديـد الثنائـي التكافـؤ Fe++ وأيونـين مـن الحديـد الثلاثـي التكافـؤ وتركيبـه الكيميائـي $Fe_3O_4$ وهـو يتأثـر وينجـذب مغناطيسـيا.

## • مجموعة الكبريتيدات Sulfides

يعتبـر مـن أكثـر المعـادن الفلزيـة الاقتصاديـة ضمـن هـذه المجموعـة. معـدن البيريـت (Pyrite) ذات اللـون الذهبـى ، ويطلـق عليـه الذهـب الـكاذب وهـو يتكـون مـن كبريتيـد الحديـدوز (Iron sulfide ($FeS_2$). وهنـاك أيضـا معـدن الكالكوبيريـت Chalcopyrite الـذى يحتـوى أيضـا علـى عنصـري النحـاس والحديـد ($CuFeS_2$)، ومـن معـادن هـذه المجموعـة أيضـا معـدن الجالينـا Galena الـذى يحتـوى علـى

الرصاص (PbS)، ومعدن السفاليريت Sphalerite الذى يحتوى على الزنك ZnS، تتبلور أو تتكون جميع معادن هذه المجموعة بفعل المحاليل الحارة Hydrothermal Solution.

### ■ معادن المتبخرات (الكبريتات Sulfates)

تتكون هذه المعادن من تبخر محاليل مائية فوق سطح الأرض، مثل معدن الجبس ذا التركيب الكيميائي الممثل لكبريتات الكالسيوم المائية الحاوية على جزيئي من الماء ($CaSO_4.2H_2O$ Gypsum), ومعدن الأنهيدريت الذي يماثل معدن الجبس في التركيب الكيميائي إلا أنه يفتقر أو لا يحوي الجزيئات المائية ($CaSO_4$ - Anhydrite).

### ■ معادن الكربونات Carbonates Minerals

تتكون معادن الكربونات من محاليل مائية فوق سطح الأرض مكونة صخورا رسوبية كيميائية وعضوية، مثل معدن الكالسيت ($CaCO_3$ - Calcite)، ومعدن الدولوميت ($CaMg(CO_3)_2$ – Dolomite)

## • مجموعة معادن الهاليدات Halides

مجموعة معادن الهاليدات تتكون عند إرتباط عناصر الهالجينات الفلورايد (F-) وكلورايد (Cl-)، بروماید (Br-)، الأيوداید (I-) وغيرها مع العناصر الكيميائية الفلزية كالصوديوم لتكون معد الهاليت ملح الطعام (Halite – NaCl)، و معدن h الفلورايت ($CaF_2$ Fluorite)، عليه فإن هذه المعادن تتكون من إتحاد الهالوجينات مع العناصر الفلزية من المحاليل مائية.

## • مجموعة معادن الفوسفات Phosphates Minerals

تتكون معادن الفوسفات من رواسب عضوية من تراكم هياكل الفقاريات، ومن أشهرها معدن الأباتيت $Ca_5(PO_4)_3$ . (F,Cl,OH) Apatite

# خصائص المعادن

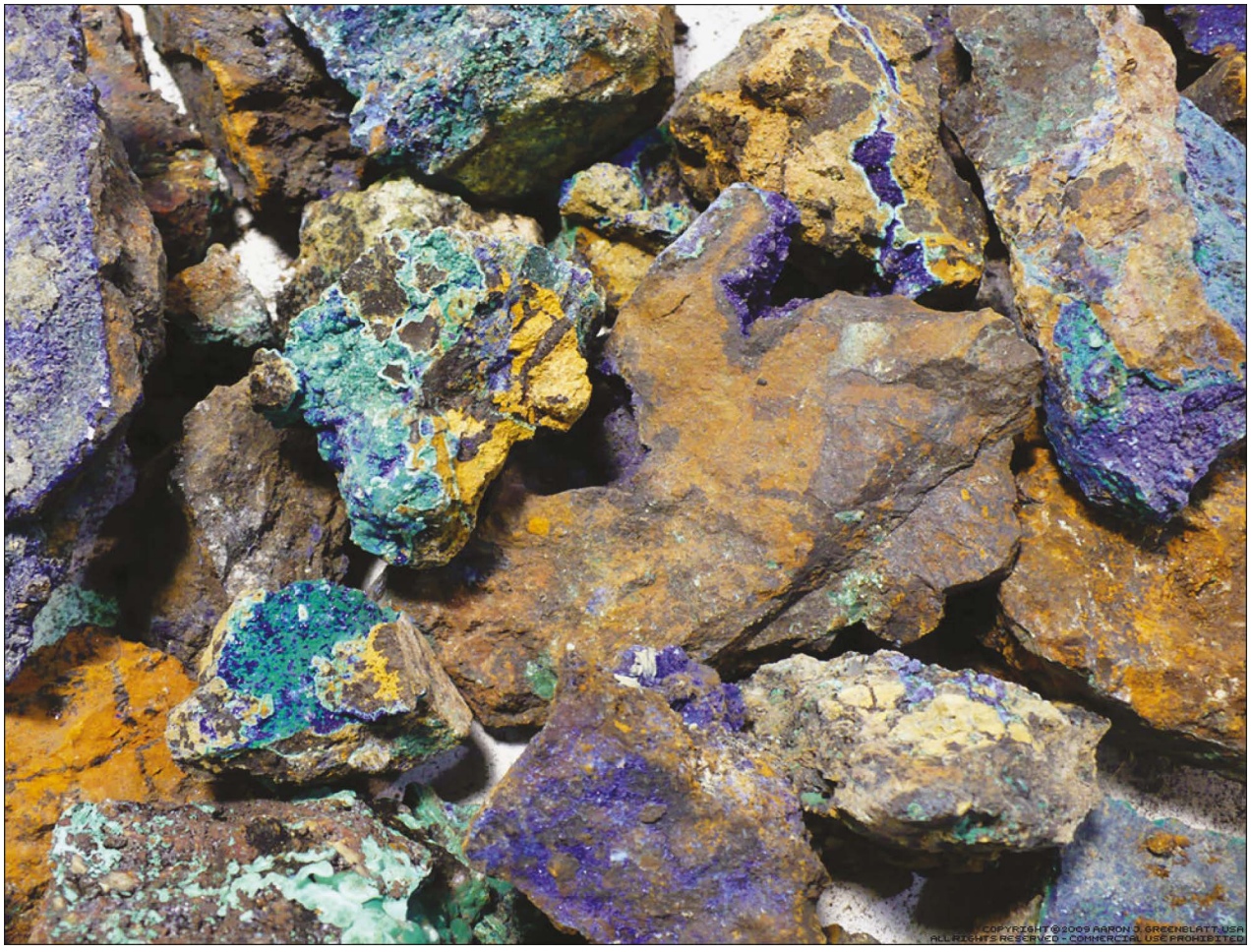
تُعتبر المعادن الفلزية من أنواع المعادن الموصلة للكهرباء، ولديها العديد من الخصائص والاستخدامات المفيدة في حياتنا، من أبرز الأمثلة عليها الذهب، والفضة، والنحاس، والحديد، والزئبق. تتميز المعادن الفلزية بالعديد من الخصائص الكيميائية والفيزيائية، فمن خصائصها الكيميائية أنها تفقد الإلكترونات خلال التفاعلات الكيميائية، وفيما يأتي أبرز **خصائص المعادن الفلزية**.

جميع المعادن الفلزية صلبة في درجة حرارة الغرفة باستثناء الزئبق، فهو المعدن الفلزي الوحيد السائل في درجة حرارة الغرفة. تمتلك جميع المعادن الفلزية لمعاناً مميزاً، كما يُمكن صقلها وتشكيلها. يُمكن تشكيل المعادن الفلزية بسهولة، ويمكن أيضاً تحويلها إلى أسلاك. تُعد المعادن الفلزية موصلات ممتازة للكهرباء، وذلك لاحتوائها على الأيونات الحرة. جميع المعادن صلبة ما عدا البوتاسيوم والصوديوم. تمتلك المعادن الفلزية درجة انصهار وغليان عالية مقارنة مع المعادن الأخرى. **خصائص المعادن غير الفلزية** تختلف خصائص اللافلزات تماماً عن الفلزات، وفيما يأتي أبرز خصائصها الكيميائية والفيزيائية. لا توصل اللافلزات الطاقة الكهربائية، وهذا يعني أنّها من العوازل الكهربائية. يُمكن أن تتواجد اللافلزات في الطبيعة بحالتها الصلبة، والسائلة، أو الغازية في درجة حرارة الغرفة. يُمكن أن تكون الفلزات شفافة أو ملونة، هشَّة أو صلبة. تُقسم اللافلزات من الناحية الكيميائية إلى مواد تساهمية ومواد أيونية. يُمكن أن تكون اللافلزات من الأيونات أحادية الذرات أو أيونات متعددة الذرات. تمتلك اللافلزات شحنة سالبة، وهذا معناه أنها تكسب الإلكترونات خلال التفاعلات الكيميائية.

# الخـــامـــــات

**الخام Ore** نـوع مـن أنـواع الصخـور التـي تحتـوي في تركيبهـا وبُنيتهـا علـى المعـادن، شـرط أن تكـون هـذه المعـادن تحتـوي علـى فلـزّات، حيـثُ إنّـه مـن المُمكـن الحصـول علـى مثـل هـذه الخامـات عـن طريـق القيـام بعمليّـة التعديـن في باطـن الأرض أو على السطح. قد يُسمّى **المعدن خاماً** إذا كان يحتوي على كمّيّات كافيّة ومفيدة من المواد التي يمكن استثمارها، حيث يتمّ معالجة الخام بعد استخراجه مُباشرةً حتى يتمّ الحصول على المعدن أو العنصر المطلوب. كان التعريف الأقدم يقيد استخدام كلمة خام على الرواسب المعدنية، ولكن المصطلح قد توسع في بعض الحالات ليشمل المواد غير المعدنية. جميع الخامات هي المعادن، ولكن ليس كل المعادن هي الخامات.

**الخامات المعدنيّة:** هي عبارة عن مجموعة من العناصر المعدنيّة التي ترتبط بعناصر أخرى ارتباطاً كيميائياً، حيث يؤدي هذا الارتباط إلى تكوين وتشكيل تكتُّلات معدنيّة تختلط هذه التكتُّلات مع المكوِّنات الصخريّة أو مع المعادن اللَّافلزيّة حيث يتمّ تسمية هذه المواد أو المكوّنات بالشوائب، كما تُعدّ هذه التكتُّلات ذات أهميّة اقتصاديّة وثروة معدنيّة يتم الحصول عليها بعد الانتهاء من عمليّة استخلاص المعادن. كما أنّ المعادن التي تحتوي على كمّيّات كافية من **الفلزِّ** حتى يتم استخراجه بسهولة ويُسْر تُسمّى **بالمعدن الخام**. ومن الجدير بالذكر أنّه يجب أن يتركَّز الفلزُّ بشكل كافٍ في المعدن حتى يتم تكوين الخام، كما أنّ هذا المعدن يجب أن يتركَّز بشكل كافٍ في الأرض.




يعتبر الخام نوع من أنواع الصخور

بشكل عام، يمكن تقسيم الخام إلى ثلاثة أنواع: خام الكبريتيد، وخام الحديد، وخام الذهب. يتكون خام الكبريتيد من مركبات الكبريت. معدن الكبريتيد هو معدن يتكون من مركبات الكبريت. وتشمل هذه المركبات ذات الأهمية الاقتصادية مزيج الزنك، ونظرة الرصاص وكالكوبايرايت. يتم استخراج العديد من المعادن الأساسية، مثل الزنك والرصاص والنحاس والنيكل، من خامات الكبريتيد. حتى الذهب والفضة يمكن استخراجهما كمنتجات ثانوية. نظراً لأن خام الكبريتيد يحتوي على كميات كبيرة من معادن الكبريتيد، فغالباً ما ترتبط بمخاطر بيئية أكبر من العديد من الخامات الأخرى. وذلك لأن جميع معادن الكبريتيد تتجدد أو تتحلل بسرعة عند ملامستها للأكسجين. غالباً ما يكون الحديد هو الوحيد الذي يتم استخراجه من خام الحديد، ولكن يمكن أن يكون هناك معادن ومواد أخرى في الخام. هناك عدة أنواع من معادن خام الحديد، أهمها خام المغنتيت وخام الهيماتيت.

## عموماً تتكون الخامات المعدنية بواسطة طريقتين رئيسيتين هما:

- **الطريقة الميكانيكية**: وتتلخص في عمليات التجوية والتعرية الميكانيكية التي تفتت الصخور وتكون الرواسب المختلفة التي بإمكان عوامل النقل حملها، ثم ترسيبها، وبالنهاية تتكون الصخور الرسوبية الميكانيكية ضمن بيئاتها المختلفة، والرواسب الحصوية والمعدنية ضمن الأنهار وعلى ضفاف الأنهار بواسطة الفيضانات.

- **الطريقة الكيميائية**: وهذه العملية تشمل ثلاث طرق رئيسية:

  - تتكون الخامات المعدنية بواسطة طرق كيميائية عن طريق التفاعل بين الكائنات الحية والماء السطحي أي الترسيب الكيميائي العضوي،

بالإضافة إلى الترسيب المباشر من مياه البحار والبحيرات بسبب عملية التبخر الناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة. جميع الصخور الرسوبية الكيميائية والكيميائية العضوية تندرج ضمن هذا النوع من الخامات.

- تتكون الخامات الاقتصادية بواسطة طرق كيميائية ضمن الصخور المختلفة، هنا بإمكان العمليات المختلفة زيادة تركيز المعادن المكونة للصخر أو إضافة معدن جديد لا يعتبر من مكونات الصخر الأساسية. زيادة التركيز تحدث بواسطة عمليات التجوية والتعرية وبواسطة الترسيب من المياه الجوفية وأيضاً بواسطة عملية التحول خاصة التماسي والإقليمي القليل الدرجة أما إضافة معادن جديدة يمكن أن تحدث دون التعرض للماجما أي بواسطة المياه الجوفية أو التعرية والتجوية، أو يمكن لها أن تحدث بواسطة تعرض الصخور للمحاليل الساخنة أو الأبخرة أو الحارة المصاحبة للماجما.

- تتكون الخامات المعدنية بواسطة التبلور من الماجما إما على سطح الأرض إما على أعماق متفاوتة من سطح الأرض، ويتكون منها الصخور النارية المختلفة وهي تعرف بمعادن صهارية، أو معادن البجماتيت إذا كان الصخر يحتوي على نسيج بجماتيتي.

# تصنـيف الخـــامات المعدنيـــــة

**تصنف الخامات المعدنية:** إلى قسمين أساسيين هما:

- **خامات معدنيّة مُعاصرة Syngenetic** : ينتـج هـذا النـوع مـن الخامـات في نفس الوقت الذي يتكوّن فيه الصخر الحاوي على هذا الخام، مثال ذلك: الصخـور الرمليّـة المُتكوّنـة مـن الكوارتـز، لذلـك يُعتبـر الكوارتـز خـام معدنـيّ مُعاصـر ضمـن هـذه الصخـور الرمليّـة.

- **خامات معدنيّة لاحقة Epigenetic** : تتكـوّن هـذه الخامـات بعـد أن يتـمّ الانتهـاء مـن تكويـن الصخـر الحـاوي عليهـا؛ حيث تتكوّن بفعل عمليّات التّرسيب الناتجة من المحاليل السّاخنة، التي بقيت من تبلور الصخور المصهورة، كما أنّ هـذه الخامـات لا تتعـرّض لعمليّات التعرية حيث يتمّ استخلاصها من نفس الصخـر الحـاوي عليهـا ولكـن بعـد أن يتكوّن هـذا الصخـر.

**وتصنف الخامات المعدنيّة بالاعتماد على العوامل الخارجية** التي تؤثّر عليها إلى:

- **خامات أولية:** تتكوّن هـذه الخامـات في أثنـاء تكوّن الصخـر الحـاوي عليهـا، كمـا أنّـه مـن المُمكـن أن يتـم اسـتخلاصها مـن نفـس الصخـر الـذي يحتـوي عليهـا، كمـا أنّ هـذه الخامـات لـم تتعـرَّض لعوامـل التَّجويّة والتَّعريّة ومـن الأمثلة عليها الكوارتـز والبايرايـت.

- **خامات ثانويّة:** يتم استخلاص هـذه الخامـات مـن الصخـور، بعـد أن تعرّضـت للتجوية الكيمائيّـة أو الفيزيائيّـة، حيـث يمكـن تحديـد مـا إذا كان المعـدن أوليّ النشـأة أو ثانـويّ عـن طريـق دراسـة أنـواع مُختلفـة ومُتعـدّدة مـن المعـادن، فمثـلاً يُعـدّ كبريتيـد الحديـد مـن الخامـات الأوليّـة ولكنـهُ بعـد تعرّضـه للتَّجوية تكوّن خـام ثانـويّ يُسـمّى أكسـيد الحديـد المائـي. يمكـن تقسـيم الخامـات أو الرواسـب المعدنيـة إلـى فلزيـة ولا فلزيـة.

| الرواسب المعدنية الفلزية | الرواسب المعدنية اللافلزية |
|---|---|
| **الفلزات النفيسة**: الذهب والفضة ومجموعة البلاتين | **المواد الخزفية**: الصلصال والفلسبار |
| **الفلزات غير الحديدية**: النحاس، الزنك، الرصاص، القصدير، الألمنيوم، الحديد | **أحجار الزينة**: الجرانيت والجابرو والرخام والحجر الجيري |
| **الفلزات الحديدية**: الحديد، المنجنيز، النيكل، الكروم، التنجستن، المولبدنيوم، الفناديوم، الكوبالت | **المواد الميتالوجينية والمقاومة للصهر**: الفلورايت، الجرافيت، الجير والحجر الجيري، المغنزايت |
| **الفلزات ضئيلة المصدر واللافلزات المصاحبة**: التنتالم والنيوبيوم، التيتانيوم، العناصر الأرضية النادرة، اليورانيوم، الزركونيوم، البريليوم، المغنسيوم، الإنتيمون، البزموث، الكادميوم، الزئبق. | **معادن الصناعة الكيميائية**: الفوسفات، الملح الصخري، الكبريت، أملاح البوتاسيوم<br>**المواد الصناعية**: الميكا، التلك، الأسبستوس، البارايت، الكبريت<br>**مواد البناء**: الجبس والمواد الركامية |
| | **معادن الزينة**: الألماس والياقوت والفيروز |

دورة تنميـــــة
الموارد المعدنية
الثـــروات
الأرضية
المتوفـرة
الاستكشـــاف
التقييم البيئي
والاعتمـــاد
التشـــييد
العمليـــــة
القفـــــل
الاستصلاح والمراقبة

# الأحجـــار الكريمـــة

- **الأحجار الكريمة** Gemstones هـي إحـدى أنـواع المعـادن أو الصخـور التـي صُنّفت بأنّها كريمة ونبيلة نظراً لأنّها جميلة، وذات قدرة كبيرة على التحمل، ونادرة، وتستخدم في صنع المجوهرات والزينة.

- **الأحجار الكريمة** هي نوع من المعادن النادرة، تشكّلت منذ ملايين السنين في باطن الأرض، وتتكوّن هذه المعادن من مادة السيليكا، وهناك العديد من أنواع الأحجار الكريمة إذ يبلُغ عددها ما يقارب أربعة آلاف نوع، وهذه الأحجار منها ما هو نفيس أو نصف نفيس ويتحدد ذلك بالاعتماد على مكوناتها الفيزيائية والكيميائية، إلى جانب الظروف الطبيعية التي تكوّنت فيها هذه الأحجار، وتجدّر الإشارة هنا إلى أنّ الأحجار النفيسة عددها قليل جداً أفضلها 16 معدناً هي: البريل، الكريزوبيريل، الكوراندون، الألماس، الفلسبار، العقيق، اليشم، اللازورييت، الزبرجد الزيتوني، الأوبال، الكوارتز، الإسبنيل، التوباز، التورمالين، الفيروز، والزركون، تحتوي بعض منها على أنواع فرعية أيضاً، أي أن الأحجار الكريمة هي المعادن التي صُنّفت نظراً لجماليتها وقوة تحملها، واستُخدمت بعد صقلها وقصها وتشكيلها كزينة للإنسان.

- **تمتاز الأحجار الكريمة** بأربعة خصائص وتُصنّف بناءً عليها هي: النمط أو الشكل، اللون، الوضوح، القيراط، وتعد ميّزة اللون هي الأهم، حيث تُقسّم درجات الألوان إلى ثلاثة فئات هي: تدرج اللون، درجة اللون، والتشبع، فتدرج اللون يعني اللون الأصلي للحجر ونقاء هذه الدرجة، أما درجة اللون فتعني قوّة هذا اللون فمثلاً إن كان الحجر أخضرَ، هل هو أخضر فاتح أم أخضر غامق، أما تشبّع اللون فتعني قوة لون الحجر الأساسي مقابل الألوان القاتمة التي قد تظهر في الحجر كالبني أو الرمادي.

تختلف الألوان تبعاً لطريقة تشكّلها فأحياناً تختلط مع شوائب أو معادن أخرى تظهر كالعيوب أو البقع الصغيرة داخل الحجر، تُعطي لمحة للباحث عن كيفية تكوّن الحجر والبيئة الجيولوجية التي تشكّل فيها وأصله، كما أن هذه الشوائب تُبين إن كان الحجر صناعي أم طبيعي، ولكن هذه الشوائب غير متواجدة في كافة الأحجار كالأكوامارين الخالي من الشوائب.

تتكوّن الأحجار الكريمة على أعماق مختلفة تحت الأرض، وتُسمى الأحجار التي تُستخرج من باطن الأرض بالأحجار المعدنية، وقد تتكوّن هذه الأحجار من عنصر واحد، أو تتشكّل بفعل اندماجها مع عناصر أخرى، فعلى سبيل المثال يتكوّن كل من الألماس والزمرد والياقوت من الحمم البركانية والزلازل، وتتواجد على عمق 160 متراً تقريباً في باطن الأرض، أما المرجان واللؤلؤ فيتشكلان في قاع البحر، ويُعتبران من الأحجار التي تتشكّل في المملكة الحيوانية، أما المملكة النباتية فيتكوّن فيها أحد أنواع الأحجار الكريمة أصفر اللون ويُسمى الكهرمان الأصفر.

# تشكل الأحجار الكريمة

تتشكل معظم الأحجار الكريمة المعروفة في طبقات القشرة الأرضية على عمقٍ يتراوح بين 5 إلى 40 كم تحت سطح الأرض. وقد يصل بعضها الى أعمق من ذلك.

### ◆ من الصخور البركانية:

- تتشكّل نتيجة تبلور وبرودة مادة **الماغما** (Magma) البركانية تحت سطح الأرض، كما يمكن أيضاً أن تتشكل تحت الأرض من مادة اللافا (Lava) البركانية.
- أما نوع الأحجار المتشكلة فيعتمد على العناصر المعدنية الموجودة في المادة البركانية، بالإضافة لزمن التبريد وطبيعة البيئة الحاضنة للمادة، وبشكلٍ عام كلما كانت البيئة عميقةً داخل القشرة الأرضية، وكان التبريد أبطأ كلما حصلنا على أحجار كريمة أكبر من حيث الحجم.
- توجد العديد من الأنواع التي يمكن أن توجد أو تتشكل في البيئات البركانية مثل:

❖ **الكوارتز** (Quartz).

❖ **العقيق** (Garnet).

❖ **حجر القمر** (Moonstone).

❖ **الأباتيت** (Apatite).

❖ **الألماس** (Diamond).

### ◆ من الصخور الرسوبية:

- يعود أصل هذا النمط من الأحجار الكريمة إلى **الصخور الرسوبية** التي تتشكل من قطع الصخور بعد جرفها سواءً بالماء عبر الأنهار أو بالرياح، وبعد أن تستقر داخل الأرض وتتعرض للضغط الكبير خلال الزمن تولد الأحجار الكريمة.

- من أشهر الأحجار الكريمة الرسوبية نجد اليشب (Jasper)، والملكايت (Malachite)، والأوبال وهو نوعٌ من العقيق (Opal)، والزركون (Zircon).

◆ **من الصخور المتحولة:**

- النوع الثالث من الأحجار الكريمة هي الأحجار المتشكلة من الصخور المتحولة، التي تتشكل نتيجة تغيرات الحرارة العالية تحت الأرض أو بسبب الضغط.
- من الأنواع المتشكلة بهذه الطريقة اللازورد (Lapis Lazuli)، والفيروز (Turquoise) والياقوت (Ruby).

## • أشـــهر الأحجـــار الكريمـــة

### ■ الألمـــــاس Diamond

يتكون الألماس من ذرات الكربون، ويعتبر أقسى مادة اكتشفها الإنسان على سطح الكرة الأرضية، لكن من المثير معرفة أن الكربون أيضاً هو المكون الرئيسي للفحم، فما الذي يحول الفحم الأسود إلى ألماس؟ يتشكل الألماس نتيجة الضغط العالي الذي يتعرض له الكربون في أعماق القشرة الأرضية، كما أنه نادرٌ فهو موجودٌ في عددٍ محددٍ من الأماكن في العالم.

# ألـــــوان الألمـــاس

## ■ اليـــاقـــوت Ruby

يتكون الياقوت من خليطٍ معدنيٍّ يسمى خليط الكورونـدوم (Corundum) الذي يتكون بشكلٍ أساسيٍّ من أكسيد الألمنيوم بالإضافة لبعض المعادن الأخرى، مثل: الحديد والتيتانيوم والكروم، التي تتفاوت نسبها من قطعة ياقوتٍ إلى أخرى مسببةً بذلك تفاوت ألوان الياقوت وتنوعها، أما اللون الأحمر الذي يعرف به الياقوت فهو ناتجٌ بشكلٍ أساسيٍّ من عنصر الكروم.

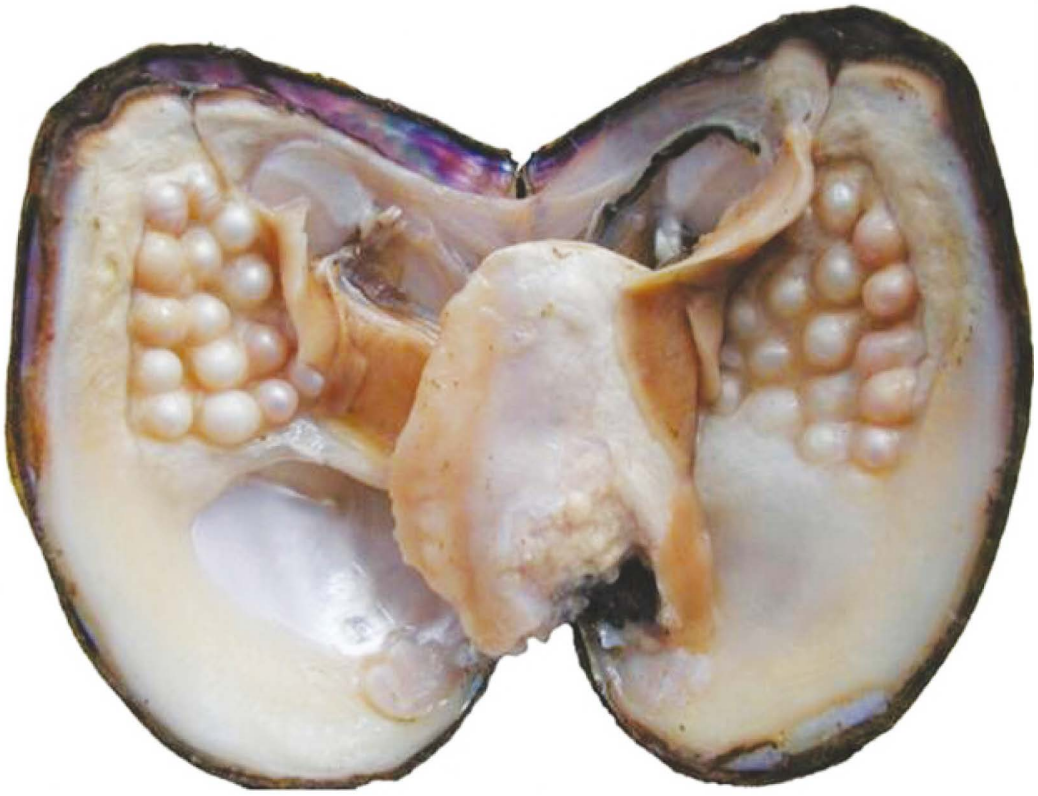
# أحجـــار الياقـــــوت

## ■ الزمـــــرد Emerald

أما الزمرد؛ فيتكون من خليطٍ معدنيٍّ يطلق عليه اسم البريل (Beryl) الذي يتألف بدوره من عدة عناصر، هي: الألمنيوم والسيليكون والبريليوم بالإضافة للأكسجين، أما لون الزمرد فينتج الكروم والفاناديوم.

## اللـــــــــؤلـــــؤ

تتكون اللآلئ في أصداف المحاريات، التي تكونها كدفاع طبيعي ضد أي جسم دخيل مثل : حبيبات الرملية الخشنة، و يبدأ المحار بإفراز طبقات من الأرجونايت تعرف باسم عرق اللؤلؤ حول جسمه فتتكون حوله لؤلؤة صلبة، وتعكس هذه الطبقات المتراكمة بريقاً مميزاً يعرف باسم لؤلؤة الشرق وبالنسبة لزراعة اللؤلؤ فهي تتم بإدخال أي جسم غريب داخل الصدفة لحثها على تكوين اللؤلؤ، وفي اللؤلؤ المزروع ذات النواة نجد أنهم يستخدمون الخرز الصغير كنواة يفرز عليها طبقة من الصدف، وتتدرج اللآلئ في ألوانها من الأبيض الناصع إلى الأبيض الذي يحوي لوناً ورديا إلى اللون البني أو الأسود، ويتعمد ذلك على نوع الرخويات وعلى المياه نفسها، واللآلئ حساسة للأحماض والجفاف والرطوبة لذلك فهي تدوم فترة أقل من الأحجار النفسية الأخرى.



# أحجـــــار اللـــؤلـــؤ

## المرجـــــــان

المصنوع من هياكل الحيوانات البحرية، ويطلق عليها زوائد مرجانية، وهذه المخلوقات الدقيقة تعيش في مستعمرات وتكون أثناء نموها تركيبات وبناءات متفرعة، وسطح تفرعات المرجان لها شكل مميز، ومعظم المرجانيات تتكون من كربونات الكالسيوم، أما مرجان الأسود الذهبي فهو مكون من مادة تشبه المواد القرنية، وهي يطلق عليها اسم كونكولين، وهو أكثر قيمة و قد تم استخدامه في المجوهرات في آلاف من السنين، وقبل صقله يكون المرجان عكر اللون، وبعد عملية الصقل يكون له بريق زجاجي، ولكنه حسَّاس للحرارة.

# أحجـــار المرجـــان

## • أهميـــــة الأحجـــــار الكريمـــة

لقد استخدم العرب القدامى الأحجار الكريمة لعلاج العديد من الأمراض العضويّة والنفسية أيضاً، ولا زالت الدراسات تُجرى في هذا الخصوص لمعرفة ما إذا كانت الأحجار الكريمة يُمكن اعتبارها أحد أنواع الطب البديل أم لا، حيث لم يثبُت علمياً مدى فعاليتها في علاج الأمراض حتى الآن، ويرى فريق من الأطباء أنّ مدى نجاح هذا العلاج يتوقف على مدى تقبُّل الجسم للعلاج، ومدى التوافق ما بين الموجات الكهرومغناطيسية التي يُصدرها جسم الإنسان مع الموجات الصادرة عن الأحجار الكريمة، وعلى الرغم من أنّ الأبحاث العلميّة لا زالت جاريةً إلا أنّ هناك ما يُؤكّد أنّ لبعض أنواع الأحجار الكريمة النادرة خواص علاجية ومن أمثلة ذلك الكهرمان الذي يتشكّل من الصمغ الذي تُنتجه أشجار الصنوبر، وقد كان يُستخدم من قِبل الإغريق والفراعنة لعلاج التقرّحات الجلديّة وذلك بعض سحقه وخلطه ببعض المواد ومنها الكُركم، وقد أكدت دراسة حديثة أُجريت في السويد صحة هذه الفائدة العلاجيّة.

# أنـــواع الأحجـــار الكريمـــة

تتعـدد أنـواع الأحجـار كريمـة مـن ناحيـة الشـكل واللـون والمكونـات، صنّـف الباحثون أنواعها اعتماداً على كيفية تكوينها والمواد الخام الأصلية، أي في حال تكونت من مواد معدنية، أو من مواد عضوية، أو من مواد غير عضوية، أو من صخور، أو من خليط يجمع المعادن والبلورات والصخور، والآتي توضيح لهذه الأنواع:

**الأحجار الكريمة المعدنية:** وهي المجموعة التي تحتوي أكثر عدد من الأحجار الكريمة، نظراً لأنها تضم أكثر من 130 معدناً مختلفاً تفاعل مع الماء لتكوين الأحجار المتنوعة، ومن أهمها: الألماس، والياقوت، والزمرد، والكوارتز، الياقوت الطبيعي.

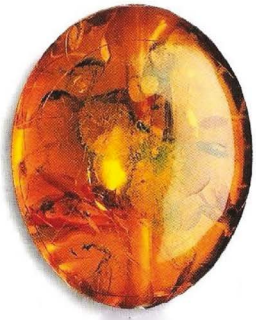
**الأحجار الكريمة العضوية:** تحتوي هذه المجموعة على الأحجار الكريمة التي تألفت من تفاعل الوقود الأحفوري مثل: العنبر، بالإضافة للأنواع التي تشكّلت بفعل الكائنات الحية مثل: اللؤلؤ الذي يتشكّل في الصدف، والعاج، وتعد أنواع هذه المجموعة أكثر استخداماً في المنحوتات، والمنحوتات المزخرفة، واختير هذا النوع نظراً لأنها قوية الهيكل مثل العاج، أو حسَّاسة ولامعة اللون كاللؤلؤ.

**الأحجار الكريمة غير العضوية:** وهذه المجموعة تحتوي على نوعين فقط هما: العقيق، والسجاد، وهي عبارة عن زجاج بركاني لونه أسود يتشكّل بفعل الانفجارات البركانية، وتحتوي داخلها على شوائب بيضاء تُشبه حبات الثلج الصغيرة، بالإضافة للأوبال الذي يصنّف كمادة غير طبيعية إذ إنه عبارة عن أشكال غير متبلورة من السيليكا، قد يكون صلباً وقد يكون سائلاً.

**الأحجار الكريمة الصخرية**: تتشكّل هذه الأحجار من الجرانيت الوردي، والأخضر، والأبيض، ومن بينها حجر اللازورد الذي يمتاز بلونه الأزرق أحياناً وقد يكون ذهبي أو أبيض.

**الأحجار الكريمة الاصطناعية**: تتشكّل هذه الأنواع بفعل البشر، تُصنع لتُحاكي الأحجار الكريمة الطبيعية نظراً لندرة الأحجار الطبيعية، لكنها تمتاز بثمنها البسيط، ومن أمثلتها الزركونيا المكعبة.

كورنربين


عَنبر

كروم دايوبسَايد

عقيق يماني

فلورايت

حَجَر الأوبال

أمثيست

عقيق أحمر

# أنواع الأحجار الكريمة الصخرية

# أنواع الأحجار الكريمة الاصطناعية

# الأهمية الاقتصادية للخامات

**تصنيف الخامات المعدنية اعتماداً على أهميتها الاقتصادية إلى:**

## أولاً: الخامات المعدنية الفلزية: Metallic Mineral Ores

### ♦ الخامات الفلزية الثمينة

الذهب، الفضة، البلاتين: وهي المعادن التي توجد في صورة نادرة وتستخدم بصورة أساسية كمقياس لتحديد قوة الأنظمة النقدية العالمية خاصة الذهب حيث تحرص معظم دول العالم على الاحتفاظ باحتياطي من الذهب على شكل سبائك أو نقود.

- **الذهـــب:** يستخدم الذهب عملة، وصناعة الحلي، ويسبك مع الفضة أو البلاتين أو النيكل ليعطي ذهباً أبيضَ ويسبك مع الكادميوم ليعطي ذهباً أخضرَ، ومع النحاس ليعطي ذهباً أحمرَ، ومع الألمونيوم ليعطي ذهباً ورديا، ويعتبر الذهب الحر أهم خامات الذهب لكن في كثير من الأحيان يوجد مختلط مع الفضة، بالإضافة إلى وجود خامات معدنية نادرة للذهب وهي التيلوريد والكالافريات.
- **الفضـــة:** الفضة تعتبر أيضاً من الخامات الفلزية الثمينة وهو يستخدم خاصة في صناعة الحلية وصك النقود، بالإضافة إلى الصناعات الكهربائية والكيميائية والطبية والفوتوغرافية والهندسية، وإنتاج سبائك اللحم. أهم خامات الفضة هو أرجنتيت بالإضافة إلى وجوده على هيئة فضة حرة في الطبيعة.

- **البلاتـــــين:** هـو ثالـث الخامـات الفلزيـة الثمينـة. ويسـتخدم في صناعـة الحلي، وهـو عامل مسـاعد في التفاعـلات الكيميائيـة، صناعـة أوانـي المختبرات المقاومـة للحـرارة، صناعـة المتفجـرات، حشـو الأسـنان، ويوجـد في الطبيعـة على هيئـة عنصريـة حـرة. يمكـن الحصـول علـى المعـادن الثمينـة (الذهـب، الفضـة، البلاتين) بالحالـــة العنصريـــة كرواســـب حصوية أو دقيقة وضمن عروق الذهـب، (Placer Sediments) ضمـن الرواسـب النهريـة أو الدلتـا.

## ♦ خامات معدنية فلزية لصناعة السبائك

وهـي المعـادن التـي بإمكانهـا أن تسـتخدم في صناعـة السـبائك المختلفـة التـي تقـوم عليهـا الصناعـات العالميـة، وتصنـف إلـى:

- **خامات السبائك اللاحديدية**

وهـي السـبائك التـي لا يدخـل الحديـد في تصنيعهـا، وتشـمل العناصـر المعدنيـة الآتيـة:

**النحاس - الرصاص - الزنك - القصدير- الألمنيوم - الزئبق**

# خامات السبائك الحديدية

## يوجد نوعان من السبائك الحديدية

- **النـوع الأول:** يتكـون مـن الحديـد فقـط ويكـون إمـا بإضافـة الكربـون إمـا غـاز ثانـي أكسـيد الكربـون لـه بحيـث لا تتعـدى الـذي تسـتخدم في كثيـر مـن الصناعـات المتقدمـة وصناعـة الأوانـي 1% (Steel) لتحويلـه إلـى سـبائك السـتيل المعروفـة بالسـينلس سـتيل أي الحديـد الـذي لا يصـدأ، أو تنقيتـه مـن الشـوائب الموجـودة معـه بحيـث تتكـون سـبائك وهـي سـبائك شـديدة الصـلادة وتتميـز بالمرونـة الكبيـرة كمـا تتميـز بسـهولة عمليـة (Wrought Iron) الحديـد المطـاوع الطـرق والسـحب والتشـكيل، لذلـك تسـتخدم في صناعـة الأسـلاك والسلاسـل وأدوات الحـدادة.

- **النـوع الثانـي:** يعـرف بخامـات السـبائك الحديديـة وهـي الفلـزات التـي تسـتخدم في عمليـة تحويـل الحديـد إلـى صلـب وتشـتمل علـى المنجنيـز، الكـروم، النيـكل، الموليبدينـوم، التنجسـتن، الفانديـوم، الكوبالـت. ويسـتخلص الحديـد مـن الخامـات المعدنيـة التاليـة: البايرايـت، الماجنيتيـت، الهيماتيـت، الليمونايـت، السـيداريت.

- **النوع الثالث: خامات الفلزات النادرة**

هـي الخامـات الموجـودة بنسـب قليلـة في الطبيعـة وعـادة تكـون مختلطـة مـع خامـات اقتصاديـة أخـرى، وهـي مهمـة جداً لبعـض الصناعـات. ومنهـا الانتيمونـي – الزرنيـخ – البريليـوم – البيسـموث الكادميـوم – الليثيـوم – المغنيسـيوم – الزيركونيـوم – التيتانيـوم.

### ♦ النوع الرابع: الخامات الفلزية المشعة

تضم الفلزات المشعة العناصر الفلزية الموجودة في القشرة الأرضية التي تتميز بنشاط إشعاعي، أي بإمكانية تكوين طاقة هائلة من تفجير وتفتيت ذاتها. وتشمل اليورانيوم، والكوبالت، والثوريوم، والراديوم والبلوتونيوم. وتستخدم الفلزات المشعة في السلم وذلك لإنتاج الكهرباء والحرارة (أي موارد للطاقة) وأيضاً في الطب وتحلية المياه البحرية وتسيير البواخر والغواصات وقياس أعمار الصخور، كما تستخدم في الأغراض الحربية لإنتاج القنابل النووية، ورؤوس الصواريخ والقذائف التي تخترق المدرعات وأيضاً صناعة الآليات المدرعة. يستخلص، Carnotite الكارنوتايت، Uraninite اليورانينيت، Pitchblende اليورانيوم من الخامات التالية: البتشبلند ويستخلص الراديوم من معدن المونازيات ويستخلص الثوريوم من رمال المونازيات والأوتونايت.

## ثانياً: الخامات اللافلزية Nonmetallic Ores

هذه الخامات موجودة بصورة أوسع وكميات أكبر من المعادن أو الخامات الفلزية الأخرى، وتستخدم في صناعات كثيرة، ويعتمد سعر هذه الخامات على تكلفة النقل و الغرض الذي من أجله استخلصت هذه الخامات. معظم هذه الخامات تستخدم عادة على هيئتها الطبيعية الأصلية، لكن القليل منها الذي يجزأ ويستخلص منه معادن أو مشتقات أخرى. تقسم أنواعها إلى ما يأتي: خامات الوقود - خامات الخزف - خامات البناء - خامات مقاومة للحرارة - خامات التعدين والمقاومة - خامات كيميائية - خامات الصناعة والتصنيع - خامات الصنفرة- الأحجار الكريمة

وتشمل: الألماس، الياقوت، الزمرد، الزبرجد، الفيروز، العقيق، التوباز، اللازورد، اللؤلؤ.

# صناعة وهندسة المعادن

يجمع علم هندسة المعادن Metallurgy بين علم وتكنولوجيا المعادن ويشارك في العديد من جوانب مجتمعنا الحديث. يتضمن علم هندسة المعادن في جوهره قيام العلماء بفحص البنية المجهرية للمعدن، مما يسمح بتحديد الخواص الميكانيكية للمعدن، ويمكّن المهندسين من استخدام هذا المعدن لأغراض مختلفة مثل اللحام أو تشغيل المعادن. تابع القراءة للتعرف على أساسيات علم المعادن وكيفية ارتباطه بصناعة التعدين.

أفضل وصف لعلم هندسة المعادن هو أنه مجال علوم وهندسة المواد الذي يدرس السلوكيات الفيزيائية والكيميائية للعناصر المعدنية. يدرس علم هندسة المعادن أيضًا المركبات البين فلزية وكيفية خلطها. اتخذ البشر الأوائل خطوة أساسية نحو العصر المعدني عندما اكتشفوا أن المعادن مثل النحاس يمكن صهرها وصبها في قوالب لتشكيل أشكال جديدة. بالإضافة إلى ذلك، اكتشفوا إمكانية فصل المعادن عن المعادن الحاملة للمعادن. وفي نهاية المطاف، اكتشف أسلافنا أنهم بحاجة إلى إضافة أكسيد الحديد إلى عملية صهر النحاس للحفاظ على فصل العنصر عن المعادن الأخرى المرتبطة به. وهكذا اكتشفوا التدفق، الذي يعرفه ليكسيكو بأنه «مادة ممزوجة بمادة صلبة لخفض درجة انصهارها، وتستخدم بشكل خاص في لحام المعادن أو تعزيز التزجيج في الزجاج أو السيراميك».

تضمنت هذه المراحل المبكرة من علم المعادن في المقام الأول العمل بالنحاس والذهب والبرونز والحديد والنحاس والمعادن الثمينة الأخرى. وقد أتاحت هذه المواد للرجال الأوائل صناعة الأسلحة وحتى المجوهرات، مما سمح للشعوب المتعاقبة بخلق الحضارات التي نعرفها اليوم. في العقود الأخيرة، تطور علم المعادن ليركز في المقام الأول على إنتاج المعادن للاستخدام التجاري. يبدأ إنتاج المعادن باستخراج المعادن من الخامات من خلال معالجة المعادن، وفي كثير من الأحيان يتضمن خلط المعادن لإنتاج السبائك.

# أنواع العمليات المعدنية

يمكن تقسيم علم المعادن إلى فئتين، التعدين الاستخراجي والفيزيائي. بعد استخراج المعادن ومعالجتها، يمكن استخدامها في الإنتاج. يتضمن علم المعادن الاستخراجي فصل المعدن عن الخام أو أشكال المركبات الكيميائية الأخرى، مما يسمح بمعالجة المعادن وتنقيتها. علم المعادن الاستخراجي Extractive Metallurgy هو ممارسة الحصول على معادن ثمينة من خام ثم تنقية المعادن الخام المستخرجة إلى شكل نقي. للقيام بذلك، يجب تقسيم الخام فيزيائيًا أو كيميائيًا أو كهربائيًا.

تعد المعالجة الحرارية Pyrometallurgy للمعادن نوعًا خاصًا من استخلاص المعادن الذي يتضمن المعالجة الحرارية للمعادن والخامات المعدنية. وذلك بهدف إحداث تحول فيزيائي أو كيميائي للمواد مما يعني أنه يمكن استرداد المعادن الثمينة. يعد التحميص والصهر والتحويل من أكثر عمليات معالجة المعادن الحرارية شيوعًا. تتطلب العمليات المعدنية الحرارية بالطبع مدخلات طاقة كبيرة للوصول إلى درجات الحرارة العالية المطلوبة أثناء العملية. يتم توفير هذه الطاقة عادةً عن طريق الاحتراق أو التفاعل الطارد للحرارة للمادة أو الحرارة الكهربائية.

يتضمن علم المعادن المائي Hydrometallurgy استخدام السوائل ذات الأساس المائي للحصول على المعادن أو المركبات من خاماتها. وتشمل هذه العمليات الترشيح، وترسيب المركبات غير القابلة للذوبان وتقليل الضغط.

أما علم المعادن الفيزيائي فانه يتعامل مع عمليات صنع منتجات مفيدة من السبائك المعدنية وتطويرها لأغراض التصنيع والبناء. يدرس علم المعادن الفيزيائي الهياكل البلورية المعدنية، والخواص الميكانيكية، والخواص الكهربائية، والخواص المغناطيسية، والخواص الكيميائية للمعادن.

## • علـم المعـادن الكيميائـي

يتناول هذا الموضوع جميع الخواص الكيميائية للمعادن، بما في ذلك اتحاد المعادن المختلفة مع بعضها البعض لتكوين السبائك، ولكن جزء كبير جدًا منها يتعلق بتفاعلات الأكسدة والاختزال للمعادن، وذلك لسببين عمليين رئيسيين.

**أولًا**، تتواجد معظم المعادن في الطبيعة كأكاسيد وكبريتيدات وكلوريدات وكربونات وما إلى ذلك، والخطوة الحاسمة في تحويل هذه الخامات إلى معادن، أي في استخلاص المعادن، هي عملية الاختزال الكيميائي. التفاعلات الكيميائية الأساسية غالبًا ما تكون بسيطة؛ التحدي العلمي في هذا الجزء من الموضوع هو تحقيق هذه التفاعلات على نطاق واسع اقتصاديا.

**ثانيًا**، عندما تدخل القطعة المعدنية النهائية في الخدمة بعد ذلك وتتعرض للبيئة، فإن هذه التفاعلات الكيميائية نفسها تميل إلى الحدوث تلقائيًا في الاتجاه المعاكس. وبذلك يعود المعدن من الحالة المعدنية إلى الحالة المؤكسدة، أي أنه يصدأ أو يتآكل. وبالتالي فإن المهام الرئيسية لعالم المعادن الكيميائية هي إدخال المعادن إلى الحالة المعدنية ثم الاحتفاظ بها هناك.

كان النحاس والرصاص والقصدير من بين المعادن الأولى التي تم تصنيعها بعملية الصهر منذ أكثر من 5000 عام. في سن مبكرة جدًا، كانت سبائك البرونز، التي تتكون عادةً من نحو 10 أجزاء من النحاس إلى جزء واحد من القصدير، تُصنع عن طريق صهر خامات مختلطة من المعدنين معًا وكانت ذات قيمة كبيرة بسبب صلابتها الكبيرة ولأنه يمكن صبها عند صهرها. بسهولة إلى أشكال معقدة عن طريق تركها تتصلب في ثقوب في قوالب الطين أو الرمل.

تم تصنيع النحاس الأصفر المبكر بالمثل عن طريق صهر خامات النحاس والزنك المختلطة. تم تطوير الطريقة الحديثة لصنع السبائك عن طريق خلط

المعادن لاحقًا. يتم أيضًا تقليل خامات الحديد بسهولة ولكن نقطة الانصهار العالية للمعدن تمنع إنتاج الحديد في صورة سائلة. وبدلًا من ذلك، تم إنتاج كتلة مسامية من الحديد الإسفنجي ممزوجة بالخبث (زجاج خام يحوي على أكاسيد وسيليكات غير مختزلة)، وكان لا بد من ضغطها، وهي ساخنة وناعمة، عن طريق ضربها أو تشكيلها بالمطارق، فتصنع شيئًا يشبه الحديد المطاوع. أدت الحاجة إلى درجات حرارة أعلى لتحقيق مخرجات أكبر إلى التطور التدريجي لموقد صناعة الحديد المبكر إلى فرن الصهر، مع توجيه نفخة هوائية إلى المنطقة الساخنة فوق الموقد ومكدس طويل مغلق أعلاه، حيث ينتقل الخام ووقود الفحم إلى الأسفل.

حدث تقدم كبير في القرن الرابع عشر. أصبحت درجات الحرارة مرتفعة بما يكفي لإنتاج الحديد السائل. يمكن بعد ذلك تشغيل الفرن العالي بشكل مستمر، حيث يتم «استغلاله» بشكل دوري لتصريف مجموعة الحديد المنصهر في الأسفل، مما يؤدي إلى زيادة إنتاجه بشكل كبير. ويحوي الحديد الخام السائل المنتج بهذه الطريقة على نحو 4 % بالوزن من الكربون المذاب، الملتقط من وقود الفرن. أدى هذا الكربون إلى خفض درجة الانصهار بشكل كبير، مما جعل من السهل إعادة صهر المعدن وصبه في قوالب. ومع ذلك، كان هذا الحديد الزهر هشًا بسبب الكربون، الذي يشكل كربيد الحديد الهش، والشوائب الأخرى، وبالتالي لا يمكن استخدامه لنفس أغراض الحديد الإسفنجي المطروق.

تم حل مشكلة تحويل الحديد الخام إلى شكل مطاوع عن طريق تنقية الكربون على يد كورت في القرن الثامن عشر من خلال عملية التوحل الخاصة به لصنع الحديد المطاوع. وبقي هذان الشكلان من الحديد، المطاوع والمصبوب، من مواد البناء الحديدية الأساسية حتى الجزء الأخير من القرن التاسع عشر.

كان التحكم الدقيق في الكربون المطلوب لصنع الفولاذ الطري (نحو 0.25% بالوزن من الكربون) خارج نطاق علم المعادن في تلك الأيام. من المسلم به أن نوعًا من الأدوات الفولاذية المستخدمة في السيوف وأدوات القطع، والتي تحوي على نحو 1 % بالوزن من الكربون والتي يمكن تصليبها بالتبريد، الساخنة جدًا، في الماء البارد، تم تصنيعها منذ العصور المبكرة جدًا من خلال عملية التدعيم التي يتم فيها التطريق تم تسخين الحديد الإسفنجي في الفحم. لكن اكتشاف إمكانية تصنيع الفولاذ الرخيص منخفض الكربون على نطاق واسع للاستخدامات الإنشائية لم يأت إلا في منتصف القرن التاسع عشر، عندما اخترع بسمر عملية المحول الخاصة به. وأعقب ذلك بعد بضع سنوات عملية صناعة الفولاذ بالموقد المفتوح، ثم بدأ العصر الحديث للصلب. تلعب الكهرباء دورًا كبيرًا في العديد من عمليات الاستخراج الحديثة. وكانت الخطوة الحاسمة هي عملية هول هيرولت للإنتاج التجاري للألمنيوم، والتي تم الإعلان عنها في عام 1886. يتم أيضًا إنتاج العديد من المعادن الأخرى مثل المغنيسيوم والصوديوم والكالسيوم كهربائيًا، وهذه المعادن بدورها تستخدم الآن لإنتاج معادن C الحديثة مثل التيتانيوم والزركونيوم واليورانيوم والنيوبيوم.

لقد تطور علم استخراج المعادن بسرعة في السنوات الأخيرة، مع تطبيق الديناميكا الحرارية ونظرية حركية التفاعل على مشاكله. لقد أصبحت الديناميكا الحرارية للتفاعلات المعدنية الآن راسخة ولكن هناك العديد من الفرص لمزيد من التقدم، العلمي والتكنولوجي، في دراسة معدلات التفاعل والتحكم فيها. العديد من أحدث عمليات الاستخراج، مثل صناعة الفولاذ بالأكسجين، والتحميص السريع، والتكرير بالرش، وعملية فرن الزنك العالي، تعتمد بشكل حاسم على حركية التفاعل.

## • علـم المعـــادن الميكانيكـــي

علـم المعـادن هـو فـرع مـن موضـوع أوسـع، يعـرف بعلـوم وهندسـة المـواد، والـذي يتعامـل مـع جميـع المـواد، علـى سـبيل المثـال. المعـادن والسـيراميك والزجـاج والبلاسـتيك العضـوي والبوليمـرات والخشـب والحجـر. إن السـبب وراء وقـوف علـم المعـادن في حـد ذاتـه كموضـوع كبيـر ومكتـفٍ بذاتـه هـو، بطبيعـة الحـال، الأهميـة البـارزة للمعـادن كمـواد بنـاء. المجتمـع كمـا نعرفـه سـيكون مسـتحيلًا بـدون المعـادن. حيـث يمثـل إنتـاج المعـادن والسـلع المعدنيـة نحـو خمـس النـاتج القومـي الإجمالـي في الدولـة الصناعيـة الحديثـة.

تديـن المعـادن بأهميتهـا لخصائصهـا الميكانيكيـة الفريـدة، والجمـع بـين القـوة العاليـة والقـدرة علـى تغييـر الشـكل اللـدن (الـذي يجمـع بـين الليونـة Ductility والمرونـة Malleability). هـذه اللدونـة تمكنهـا مـن التشـكيل، علـى سـبيل المثـال. في أجسـام السـيارات وعلـب الصفيـح والعـوارض، مـن خـلال عمليـات التشـغيل الميكانيكيـة مثـل الضغـط والسـحب والدرفلـة والحـدادة. والأهـم مـن ذلـك، أن هـذه اللدونـة نفسـها تمنـح المعـادن القويـة صلابتهـا غيـر العاديـة، والقـدرة علـى تحمـل جميـع الضربـات والصدمـات الناتجـة عـن الخدمـة القاسـية الطويلـة دون أن تتكسـر أو تنهـار.

يتعامـل علـم المعـادن الميكانيكـي مـع كل هـذه الجوانـب مـن الموضـوع؛ وخاصـة فيمـا يتعلـق بالعمـل الميكانيكـي، واختبـار الخـواص الميكانيكيـة، والعلاقـات بـين هـذه الخـواص والتصميـم الهندسـي واختيـار المـواد، وأداء المعـادن في الخدمـة. إنـه أقـدم جـزء مـن علـم المعـادن. تـم العثـور علـى أقـدم المعـادن المعروفـة، وهـي النحـاس والفضـة والذهـب، في شـكل شـذرات معدنيـة. لقـد كانـت النيـازك مصـدرًا لسـبائك الحديـد والنيـكل. جميـع هـذه المعـادن الموجـودة في الطبيعـة قابلـة للطـرق، ومنـذ

الأيام الأولى، تم تشكيلها على شكل زخارف وأدوات وأسلحة عن طريق الطرق. أصبح تشكيل المعادن راسخًا على نطاق واسع بمجرد أن بدأ استخراج المعادن في توفير النحاس والبرونز والحديد الإسفنجي والمعادن الأخرى بكميات أكبر. استخدم الرومان على نطاق واسع ألواح الرصاص والأنابيب في أنظمة إمدادات المياه. العملات المعدنية، وهي وضع مسافة بادئة لتصميم على سطح معدني باستخدام أداة الثقب والقالب، تم تطويرها في سن مبكرة.

كما تم تحقيق مزايا العمل الميكانيكي في درجات حرارة مختلفة؛ العمل على البارد؛ لأنه يزيد من صلابة وقوة المعادن مثل النحاس والحديد؛ العمل على الساخن، خاصة الحديد الإسفنجي، لأن المعادن أثبتت أنها أكثر ليونة وأكثر مرونة عند درجات الحرارة المرتفعة وأيضًا لأنه يمكن ربطها عن طريق اللحام بالضغط إذا تم طرقها معًا وهي ساخنة. ظلت الأعمال الميكانيكية للمعادن صناعة يدوية إلى حد كبير، تميزت بحدادة الحدادة، لعدة قرون. أدت الحاجة إلى مطروقات أكبر وظهور الطاقة المائية في النهاية إلى ظهور المطرقة التي تعمل بالطاقة ومكبس الحدادة. كان التطور الرئيسي هو مطحنة الدرفلة، والتي بدأ استخدامها على نطاق واسع لأول مرة في القرن الثامن عشر. كما تطورت تدريجيًا عمليات أخرى، مثل السحب والتصنيع والبثق. لقد تم تطوير العديد من العمليات الجديدة مؤخرًا، بما في ذلك تشكيل الفولاذ على البارد، باستخدام مواد التشحيم عالية الضغط، والتشكيل المتفجر حيث يتم دفع المعدن ضد القالب بقوة الانفجار. يبدو أن التشكيل الهيدروستاتيكي، حيث يتم عمل المعدن تحت ضغط هيدروستاتيكي كبير لمنع التشقق، من المرجح أن يفتح مرحلة جديدة تمامًا من علم المعادن الميكانيكي من خلال تمكين معالجة المعادن والسبائك الأكثر هشاشة.

يتكون علم المعادن الميكانيكية من ثلاثة أجزاء رئيسية وثيقة الصلة ببعضها البعض. أولًا، يجب تفسير الخواص الميكانيكية الأساسية من خلال النظرية الذرية للمعادن، المشابهة للنظرية الحركية للغازات. هنا يتحد علم المعادن الميكانيكي مع علم المعادن الفيزيائي. ومن ثم، بدءًا من هذه الخصائص الأساسية، يجب فهم سلوك المعادن في عمليات العمل الميكانيكية والتحكم فيه. أدى الاهتمام بهذه المشكلة إلى ظهور فرع جديد من الميكانيكا التطبيقية، وهو نظرية اللدونة.

ثالثًا، مرة أخرى فيما يتعلق بالخصائص الأساسية، يجب فهم وتحسين السلوك الميكانيكي للمعادن المستخدمة لتجنب الأعطال الناجمة عن انهيار البلاستيك، والتشقق الهش، وتعب المعدن، وما إلى ذلك. وتوفير أساس عقلاني للتصميم الهندسي والاستخدام الفعال والآمن للمواد. وهذا جزء نشط جدًا من الموضوع في الوقت الحاضر.

## • علم المعادن الفيزيائي

قليل من الأشياء في الطبيعة تبدو أكثر جمادًا من قطعة المعدن. لا يرى المراقب العادي سوى انعكاس صورته في سطحه المشرق الساكن، ولا يرى شيئًا من عالمه بداخله. ومع ذلك، فإن هذا العالم الداخلي هو مكان للنشاط المتواصل. تندفع الإلكترونات من النهاية إلى النهاية بسرعات هائلة. كما أن الذرات نفسها تتحرك وتتبادل أماكنها، حتى عندما يكون المعدن صلبًا تمامًا. يمكن أن تؤدي التغيرات في درجة الحرارة إلى إعادة ترتيب الذرات فجأة إلى نمط تنظيمي مختلف جذريًا. في الفولاذ المسقي، يمكن أن يحدث هذا خلال بضع ثوانٍ قليلة، حتى في درجات حرارة أقل بكثير من درجة حرارة الغرفة. يحدث التشوه اللدن من خلال مرور الصدوع، التي تسمى الانخلاعات، والتي

تتحرك بسرعة كبيرة عبر المعدن وتسبب انزلاقات واسعة النطاق بين كتل هائلة من الذرات. يمكن أن تصبح حركة الاضطرابات كثيفة جدًا. تتراكم اختناقات مرورية ضخمة، مما يؤدي إلى هدوء الاضطرابات ويجعل المعدن صلبًا. عندما يتم تسخين هذا المعدن المتصلب بالعمل (التليين)، فإنه يخلص نفسه من هذه الاضطرابات في موجة من إعادة تنظيم النمط الذري بأكمله (وهو ما يسمى بإعادة البلورة).

يمكن إنتاج أنماط ذرية جديدة تمامًا عن طريق صناعة السبائك، ويمكن تغييرها بدورها عن طريق المعالجة الحرارية. على سبيل المثال، عندما يتم وضع سبيكة الألومنيوم في درجة حرارة الغرفة، بعد التبريد، تتحرك ذرات السبائك عبر المادة الصلبة لتتجمع معًا في مجموعات صغيرة، مثل قطرات الماء في الضباب، وهذه المجموعات تجعل المعدن صلبًا عن طريق إعاقة الاضطرابات (مثل تصلب الأمطار). تنتمي دراسة مثل هذه التأثيرات إلى مجال علم المعادن الفيزيائي، وهو الجزء الذي يتناول بُنى المعادن والسبائك بهدف تصميم وإنتاج تلك البُنى التي تعطي أفضل الخصائص.

يرتبط علم المعادن الفيزيائي بروابط واضحة مع علم المعادن الميكانيكي؛ ولكن لها أيضًا روابط وثيقة مع علم المعادن الكيميائي، خاصة فيما يتعلق بصب المعادن، وتكوين السبائك، والتآكل، وتأثيرات الشوائب العديدة على بُنى وخصائص المعادن والسبائك. إنه الجزء الأحدث من علم المعادن على الرغم من أن عمليات التبريد والتلطيف والتصلب والتليين وصناعة السبائك تم اكتشافها واستخدامها بطريقة تجريبية تمامًا في العصور القديمة.

جرت محاولات كبيرة لبناء نظرية للمعادن، بما في ذلك الفكرة الأساسية القائلة بأن المعادن الصلبة قد تكون بلورية، أي أن ذراتها مرتبة في أنماط منظمة، تمت في القرنين السابع عشر والثامن عشر. ومع ذلك، لم تكن هناك

طريقة لوضع هذه الأفكار قيد الاختبار التجريبي في تلك الأيام، واختار معظم العلماء بدلًا من ذلك العمل في مجالات مثل الميكانيكا وعلم الفلك والكهرباء والكيمياء حيث كان التقدم أسهل. وهكذا تطور النمط الكلاسيكي لتاريخ العلم.

كان الإنجاز الحاسم في علم المعادن الفيزيائي هو تطوير سوربي، في النصف الثاني من القرن التاسع عشر، لتقنية علم المعادن لمراقبة بنى المعادن والسبائك باستخدام المجهر الضوئي العاكس. حيث تم أخيرًا اختراق الحاجز الكبير للمرآة السطحية، من خلال عملية التلميع والحفر الكيميائي، للكشف عن البنية الداخلية تحته. وما شوهد بعد ذلك هو البنية الحبيبية للمعادن، وهي عبارة عن مجموعة من البلورات المتشابكة الدقيقة. وقد لوحظ أن التغيرات الكبيرة في هذه البنية المجهرية قد حدثت عن طريق صناعة السبائك والعمل والمعالجة الحرارية.

وقد تبلورت الأفكار حول طبيعة هذه التغيرات بسرعة بمجرد أن أصبح من الممكن إخضاعها لاختبار الملاحظة. وفي الوقت نفسه تقريبًا، كانت نظرية الديناميكا الحرارية توضح فهم ما يحدث عندما يتم مزج مواد مختلفة معًا، وقد وفر هذا أساسًا علميًا لدراسة صناعة السبائك.

إن الجمع بين الأبحاث المنهجية للسبائك مع الفحص المجهري الضوئي قد فتح معظم الأبواب أمام علم المعادن الفيزيائي. يمكن فهم تأثيرات الكربون في الفولاذ إلى حد كبير، بالإضافة إلى عمليات التقسية والتلطيف؛ يمكن ترشيد بُنى وخصائص السبائك القديمة، مثل النحاس والبرونز؛ وأخيرًا توافرت طريقة للتطوير المنهجي للسبائك المصممة عمدًا لتكون لها خصائص معينة.

لا يزال المجهر المعدني هو الأداة الأكثر فائدة للأغراض العامة المتاحة لعالم المعادن الفيزيائية. وكان على الدليل المباشر أن ينتظر حتى اكتشاف طريقة حيود الأشعة السينية، والتي كان تطبيقها إيذانًا بمرحلة رئيسية ثانية من علم

المعادن الفيزيائي في عشرينات القرن العشرين. كما نمت بلورات مفردة من المعادن في هذا الوقت تقريبًا وألقت بخواصها الميكانيكية الكثير من الضوء على عمليات التشوه المرن.

وكانت التطورات الكبيرة التالية نظرية. بحلول أوائل ثلاثينات القرن العشرين، أصبحت نظرية الكم للإلكترونات والذرات قوية بما يكفي لتوفير نظرية حقيقية للحالة المعدنية، والتي يمكن أن تفسر ماهية المعدن حقًا وكيف يوصل الكهرباء. ويمكن بعد ذلك فهم القوى التي تربط ذرات المعدن ببعضها البعض والبدء في نظرية السبائك. كان يُنظر إلى التآكل (وتم إثباته تجريبيًا) على أنه عملية كهربائية بقدر ما هو عملية كيميائية، وتم تفسير حركة الذرات في المعادن من حيث بعض العيوب المحددة جيدًا في البنية البلورية (الاضطرابات والشواغر).

لقد اضطر علم المعادن النظري إلى المضي قدمًا في السنوات التي تلت الحرب العالمية الثانية مباشرة بسبب الحاجة إلى تطوير المعادن والسبائك التي من شأنها أن تقاوم درجات الحرارة العالية للمحركات النفاثة، أو التي من شأنها أن تقاوم الإشعاعات النووية الضارة في المفاعلات النووية؛ والطلب على المواد الخاصة لاستخدامها في الصناعة الكهربائية.

وفي الآونة الأخيرة، أخذت التجربة زمام المبادرة مرة أخرى، وذلك بسبب تطوير المجهر الإلكتروني القوي جدًا وتقنيات المجهر الأيوني الميداني، والتي تسمح بملاحظة بنية المعادن وصولًا إلى المقياس الذري. لقد أصبحت دراسة الاضطرابات والتركيبات الذرية في المعادن الآن علمًا تجريبيًا بشكل أساسي. وقد تمكن مجهر المسح النفقي المتطور والحديث جدًا في القرن الحادي والعشرين من تقديم دليل مباشر على الترتيبات الذرية البلورية في المعادن، وبذلك لم يعد هناك مجالًا كبيرًا للشك حول البنية الذرية للمادة.

إن التطورات التي لا حصر لها التي حدثت في العلوم الأساسية للمعادن في السنوات الأخيرة قد تركت مشكلة كبيرة تتمثل في استيعابها جميعًا وتحويلها إلى تطورات مقابلة في الجوانب التطبيقية. ومع ذلك، يمكننا حاليًا أن نرى بوضوح كيفية تصميم البُنى المجهرية للمعادن والسبائك وذلك لتطوير الخصائص الأساسية لتحقيق أفضل النتائج. تختلف بعض البُنى المجهرية الجديدة المقترحة كثيرًا عن البُنى التقليدية، وهناك تحدٍ تكنولوجي كبير لتحقيقها تجاريًا على نطاق واسع. فيما يتعلق بالعلوم الأساسية، لا تزال هناك العديد من المجالات التي لا تزال فيها مشاكل أساسية، خاصة فيما يتعلق بنظرية السبائك والمعادن السائلة والخواص الميكانيكية الأكثر تعقيدًا مثل إجهاد المعادن.

## • علم المعادن والصناعة

علم المعادن اليوم هو علم تطبيقي. يكمن سحره في التحدي المتمثل في استخدام العلم لتزويد البشرية بأفضل المواد الهندسية التي تسمح بها قوانين الطبيعة والموارد الطبيعية للأرض. غالبًا ما يتم التغاضي عن هذه الحقيقة البسيطة أو نسيانها. ويرجع ذلك جزئيًا إلى حقيقة أن علم المعادن الصناعي كان لآلاف السنين فنًا تجريبيًا يتم فيه تعلم «الطريقة الصحيحة» للقيام بالأشياء من خلال الخبرة الصعبة.

ومع ذلك، هذا هو التاريخ والعلم حاليًا معنا. ولكن مع بناء هذا العلم، بدا علم المعادن الأكاديمي أحيانًا وكأنه علم بحت، لا علاقة له بالصناعة. ومن المؤكد أن تفسير خصائص المعادن من ناحية البنية المجهرية وتطوير نظرية السبائك يمكن أن يكون في حد ذاته مساهمات في العلم البحت. ولكن لا ينبغي

الخلط بين الوسائل والغايات. لقد كان الهدف طويل المدى لهذا العمل هو توفير قاعدة علمية لمزيد من التقدم العملي. ومن الأمثلة الجيدة على ذلك تاريخ الموصلية الفائقة. لسنوات عديدة، أصبحت الموصلية الفائقة فرعًا من الفيزياء البحتة، على الفور موضوعًا لاهتمام تعديني مكثف بمجرد أن أصبحت إمكانية صنع أجهزة مفيدة فائقة التوصيل أمرًا واضحًا. يرتبط علم المعادن التطبيقي بالصناعات المعدنية. ولا يتم الحفاظ على هذا الارتباط وتعزيزه إلا من خلال العناية والاهتمام المتعمدين، فهناك دائمًا ميل للجانبين العلمي والصناعي إلى الابتعاد عن بعضهما بعضًا.

ومع ذلك، يجب مقاومة هذا الاتجاه بشكل كبير؛ لأنه بدون الهدف العملي يصبح العلم في النهاية عديم الفائدة وتافهًا، وبدون الحافز العلمي ستصاب الصناعة بالركود الفني ولن تتمكن من البقاء إلا من خلال العمالة الرخيصة والمحاسبة الذكية. ولا ينبغي الاستهانة بصعوبة هذه المشكلة. إن الصفات التي تساعد في تكوين باحث علمي جيد - القدرة على تركيز الاهتمام على مشكلة علمية واحدة مع استبعاد كل شيء آخر وتعليق الحكم بصبر حتى تصبح الحقائق واضحة تمامًا - ليست مناسبة تمامًا لعضو في التصميم أو فريق الإنتاج حيث يعد اتساع المعرفة والاستجابة السريعة والحكم البديهي الجيد أمرًا في غاية الأهمية. لن يتمكن سوى عدد قليل من الأشخاص من المساهمة بشكل كامل في الجانبين العلمي والعملي للموضوع، على الأقل ليس في المراحل نفسها من حياتهم المهنية.

علاوة على ذلك، فإن الصفات التي تجعل التجربة جيدة الاختيار الجيد للظروف الخاصة والمواد التجريبية لعرض التأثيرات الحاسمة بأكبر قدر ممكن

من الوضوح والبساطة، والتحكم الصارم في جميع المتغيرات غير المرغوب فيها غالبًا ما تقود التجربة بعيدًا عن المشكلة الصناعية التي قد تواجهها تم تصميمها لإلقاء الضوء. يجب على عالم المعادن الباحث أن يبحث عن مشاكله ويستخرجها بدقة شديدة من قلب الصناعة نفسها، لكن يجب أن تكون مشاكل جيدة من الناحية العلمية أيضًا. حيث إن القدرة على القيام بذلك، والاستمتاع بالقيام به، أمر غريب تمامًا عن التيار الرئيسي للبحث العلمي البحت؛ وربما يكون غرس هذه القدرة والموقف هو المبرر الرئيسي لتدريس علم المعادن كنظام أكاديمي منفصل.

يواجه عالم المعادن الصناعية أيضًا تحدياته. يجب عليه أن يبقى على دراية بالعلم، ومع ذلك يتعين عليه أن يحل مشاكله الملحة بأسرع الطرق، والتي قد تكون في كثير من الأحيان تجريبية إلى حد كبير لأنه لا يوجد وقت للتوقف وملء الخلفية العلمية المفقودة. الحكم البديهي، والقدرة على التصور وتجربة حلول سريعة ومخصصة والمضي قدمًا دون مزيد من اللغط، إذا نجحت هذه الحلول، تعتبر ضرورية هنا. ومع ذلك، فإن الخلفية الجيدة للعلوم التحليلية لها القدر نفسه من الأهمية لتضييق نطاق اختيار الطرق التجريبية الممكنة، ولتنسيق جميع قصاصات المعلومات التي لا حصر لها في صورة متماسكة، ولوضع القيمة والتأكيد على الأجزاء المختلفة من البرنامج، وإظهار أين يمكن تحقيق ذلك. يمكن تغطية الأرض بسرعة وحيث يجب على المرء أن يسير بحذر. هذا النوع من علم المعادن هو أيضًا علم تطبيقي ويتطلب قوى تحليلية كبيرة (Cottrell, 1995).

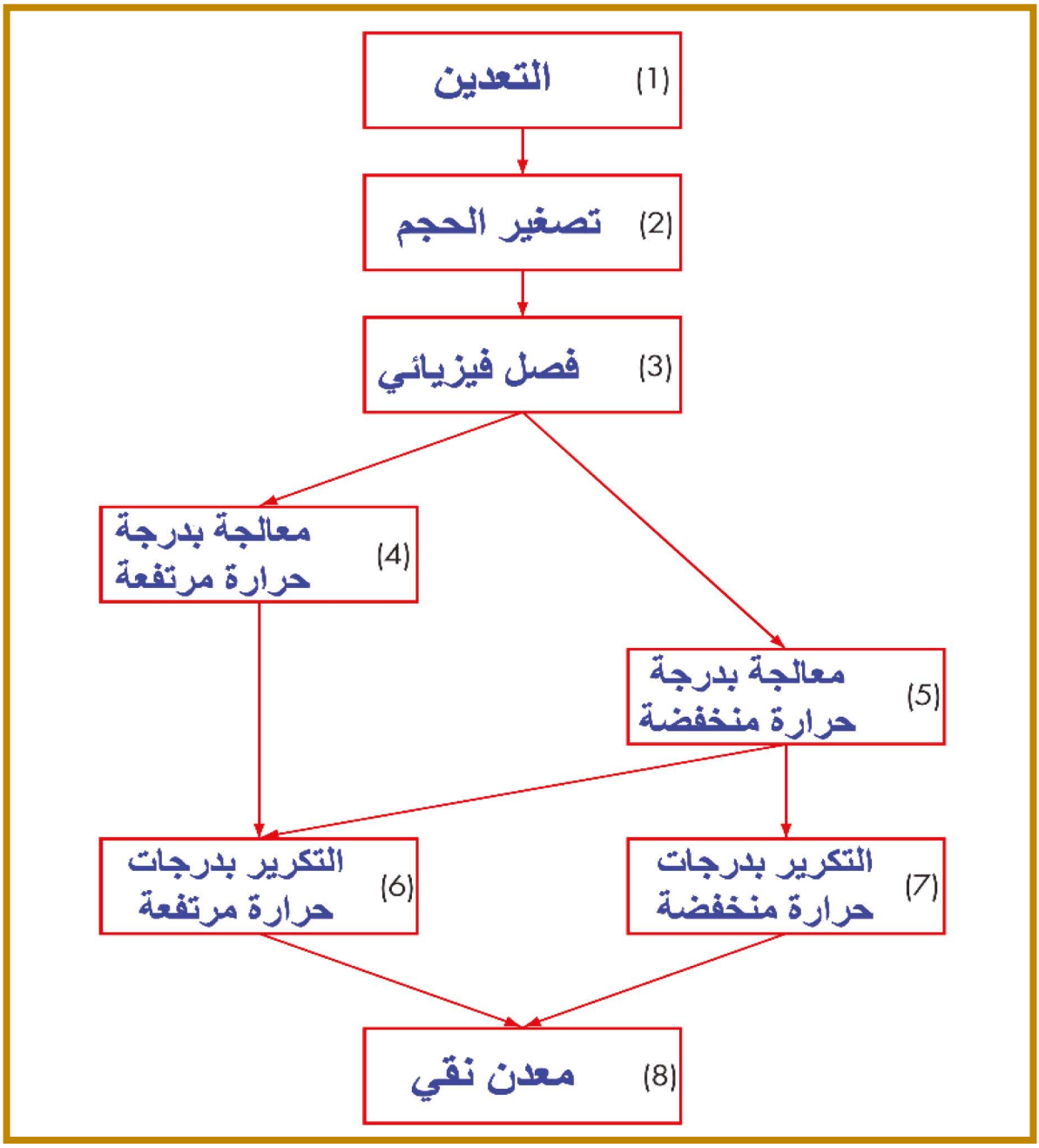
# معالجة المعادن

يستخدم مصطلح معالجة المعادن Mineral Processing بالمعنى الواسع لتحليل ووصف عمليات الوحدة المشاركة في ترقية واستعادة المعادن من الخامات. يعتمد مجال معالجة المعادن على العديد من مجالات العلوم والهندسة. وبالإضافة إلى ذلك، أصبحت العلوم والهندسة البيئية عنصرين لا ينفصلان؛ إن الخطوات المتبعة في معالجة المعادن يجب أن لا تقوم على أسس علمية وتكنولوجية سليمة فحسب، بل على أسس مقبولة بيئيًا أيضًا.

## • أهداف وأساسيات معالجة المعادن

بالمعنى التقليدي، تعتبر معالجة المعادن بمثابة معالجة الخامات أو المواد الأخرى لإنتاج منتجات مركزة. تتضمن معظم العمليات إجراءات التركيز الفيزيائي التي لا تتغير خلالها الطبيعة الكيميائية للمعدن (أو المعادن) المعنية. ومع ذلك، في معالجة المعادن المائية Hydrometallurgy، تحدث تفاعلات كيميائية دائمًا؛ يتم تشغيل هذه الأنظمة في درجات حرارة محيطة أو مرتفعة اعتمادًا على حركية العمليات. الهدف النهائي من استخراج المعادن هو إنتاج المعادن في أنقى صورها. تلعب معالجة المعادن دورًا أساسيًا في تحقيق هذا الهدف.

يوضح الشكل الآتي مخطط تدفقي عام لاستخراج المعادن بعد التعدين (الخطوة 1) من خلال المعالجة الكيميائية. حيث تتضمن الخطوتان 2 و3 المعالجة الفيزيائية، وتتضمن الخطوتان 5 و7 المعالجة الكيميائية في درجات حرارة منخفضة (استخلاص المعادن المائي). تعتبر جميع الخطوات الأربع جزءًا من معالجة المعادن. لاحظ أنه لا يتم تضمين الصهر والتكرير بدرجة حرارة عالية (معالجة المعادن الحرارية)، الخطوتين 4 و 6، تحت عنوان معالجة المعادن.



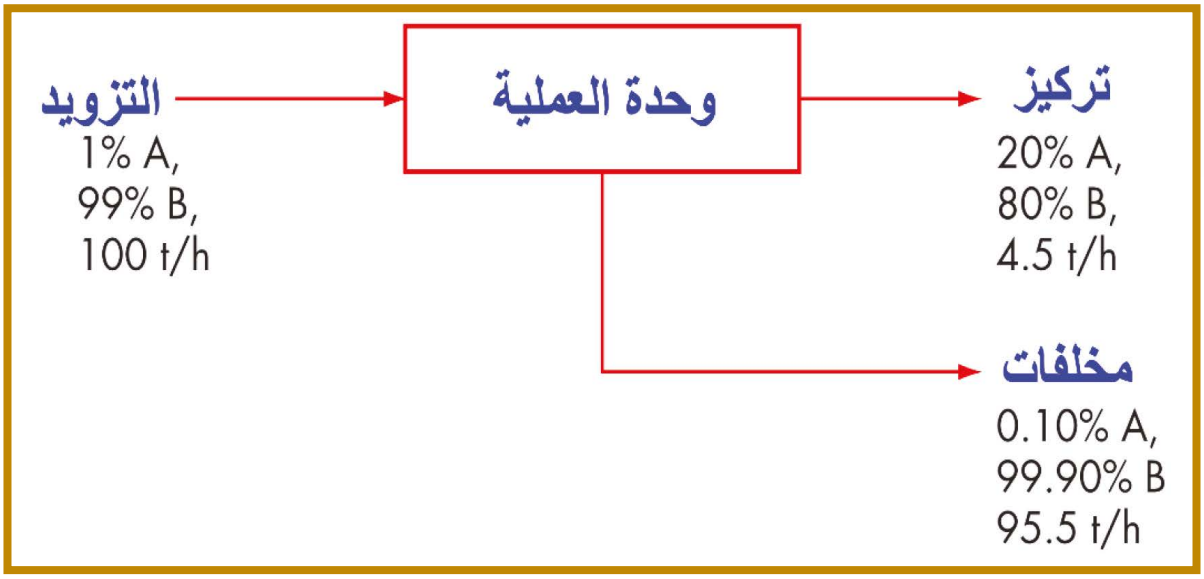

مخطط التدفق المعمم لاستخراج المعادن (Fuerstenau & Han, 2011)

يمكن أن تكون طرق المعالجة مختلفة تمامًا، وقد يكون من الممكن وجود أكثر من طريق واحد للعديد من هذه المعادن. على سبيل المثال، في استخراج النحاس أو الذهب من الخامات منخفضة الجودة، يتم ممارسة الترشيح بالتفريغ بشكل شائع. غالبًا ما يكون اختيار ممارسة الترشيح هذه مدفوعةً بالاقتصاديات العامة للعملية.

نظرًا لأن سحق وطحن الخامات مكلف جدًا، فإن ترشيح الخامات ذات الأحجام الكبيرة يعد أمرًا جذابًا مقارنة بنضح الخامات المطحونة ناعمًا، على الرغم من أن الاسترداد الإجمالي للمعادن من ترشيح الجسيمات الدقيقة أكبر بشكل عام من ذلك الذي يتم الحصول عليه مع جزيئات كبيرة. إن إدخال عملية الترشيح المبتكرة هذه جعل من الممكن استخراج العديد من الرواسب المعدنية التي لا يمكن معالجتها اقتصاديًا من خلال التقنيات التقليدية.

## • الكفـــاءة المعدنيـــة

واحدة من أهم المفاهيم الأساسية في معالجة المعادن هي الكفاءة المعدنية Metallurgical Efficiency. يتم استخدام مصطلحين بشكل شائع لوصف كفاءة العمليات المعدنية: الاسترداد Recovery والدرجة Grade. ويتم توضيح هذه الظواهر في العملية المعممة المعروضة في الشكل الآتي.




**توازن مادي بسيط لتشغيل الوحدة** (Fuerstenau & Han, 2011)

في هذا المثال، يتم تزويد 100 طن متري في الساعة من الخام إلى عملية تركيز تنتج 4.5 طنًا في الساعة من التركيز و95.5 طنًا في الساعة من المخلفات. عند ترقية هذه العملية، يتم إدخال 1.0 طن/ساعة من المادة المرغوبة A في تشغيل الوحدة و0.9 طن/ساعة (4.5 × 0.2) من هذه المادة إلى التركيز، مما يؤدي إلى استرداد 90 % (0.9/ 1.0 × 100).

تم تحسين درجة المعدن A من 1 % إلى 20 %. يشير مصطلح استرداد النسبة المئوية إلى النسبة المئوية للمواد القيمة التي يتم إرسالها إلى المركز مع الإشارة إلى كمية هذه المادة في التغذية. في بعض الأحيان، لا يكون الحصول على أعلى مستوى ممكن من التنقية بالضرورة هو النهج الأفضل في عملية التركيز. سيؤدي الاسترداد العالي بدون درجة مقبولة إلى منتج غير قابل للبيع

وبالتالي فهو غير مرض. يتحمل مهندسو معالجة المعادن مسؤولية تحسين العمليات لتحقيق أعلى مستوى ممكن من الاسترداد بنقاء (درجة) مقبولة للمشترين أو المهندسين الذين سيعالجون هذا التركيز بشكل أكبر لاستخراج القيم المعدنية. ولتحقيق هذا الهدف، لا بد من إجراء تقييمات اقتصادية لجميع البدائل التكنولوجية الممكنة.

## • عمليات الوحدة

هناك العديد من الخطوات، التي تسمى عمليات الوحدة Unit Operations، تشارك في تحقيق هدف استخراج المعادن والفلزات من الخامات في أنقى صورها الممكنة. تتضمن هذه الخطوات تقليل الحجم، وفصل الحجم، والتركيز (تعويم الزبد، وتركيز الجاذبية، والتركيز المغناطيسي والكهروستاتيكي)، ونزح الماء، والذوبان المائي.

### ■ تصغير الحجم

تُعرف عملية طحن الخامات باسم السحق. الغرض من عملية السحق هو ثلاثة أمور: تحرير المعادن الثمينة من مصفوفة الخام، وزيادة مساحة السطح للتفاعل العالي، وتسهيل نقل جزيئات الخام بين عمليات الوحدة.

### ■ الفصل حسب الحجم

تتطلب المنتجات المطحونة والمكسرة بشكل عام التصنيف حسب حجم الجسيمات. يمكن تحقيق التحجيم باستخدام الفرازات، أو الشاشات، أو مصفاة المياه. تستخدم الشاشات لتحجيم الجسيمات الخشنة. يتم استخدام الأعاصير مع الجسيمات الدقيقة.

## ■ التركيـــز

تستخدم الخواص الفيزيائية والكيميائية للمعادن والمواد الصلبة الأخرى في عمليات التركيز. يتم استخدام تعويم الرغوة وتركيز الجاذبية والتركيز المغناطيسي والكهروستاتيكي على نطاق واسع في الصناعة.

### • تعـــويم الرغـــوة

تُستخدم الخصائص السطحية للمعادن (التركيب والشحنة الكهربائية) مع المجمعات، وهي مركبات غير متجانسة تحوي على مكون قطبي ومكون غير قطبي للفصل الانتقائي للمعادن. توفر السلسلة الهيدروكربونية غير القطبية الكارهة للماء للمعادن بعد امتزاز الجزء القطبي من المجمع على السطح.

### • تركيـــز الجاذبيـــة

تُستخدم الاختلافات في كثافة المعادن لإحداث فصل معدن عن الآخر. تشمل المعدات المتوفرة أدوات الخضخضة وطاولات الهز واللوالب. يستخدم الوسط الثقيل أيضًا لتسهيل فصل المعادن الثقيلة عن المعادن الخفيفة.

### • التركيـــز المغناطيسي والكهروســـتاتيكي

يتم استخدام الاختلافات في القابلية المغناطيسية والتوصيل الكهربائي للمعادن في عمليات المعالجة عند الحاجة.

## ■ نـــزح الميـــاه

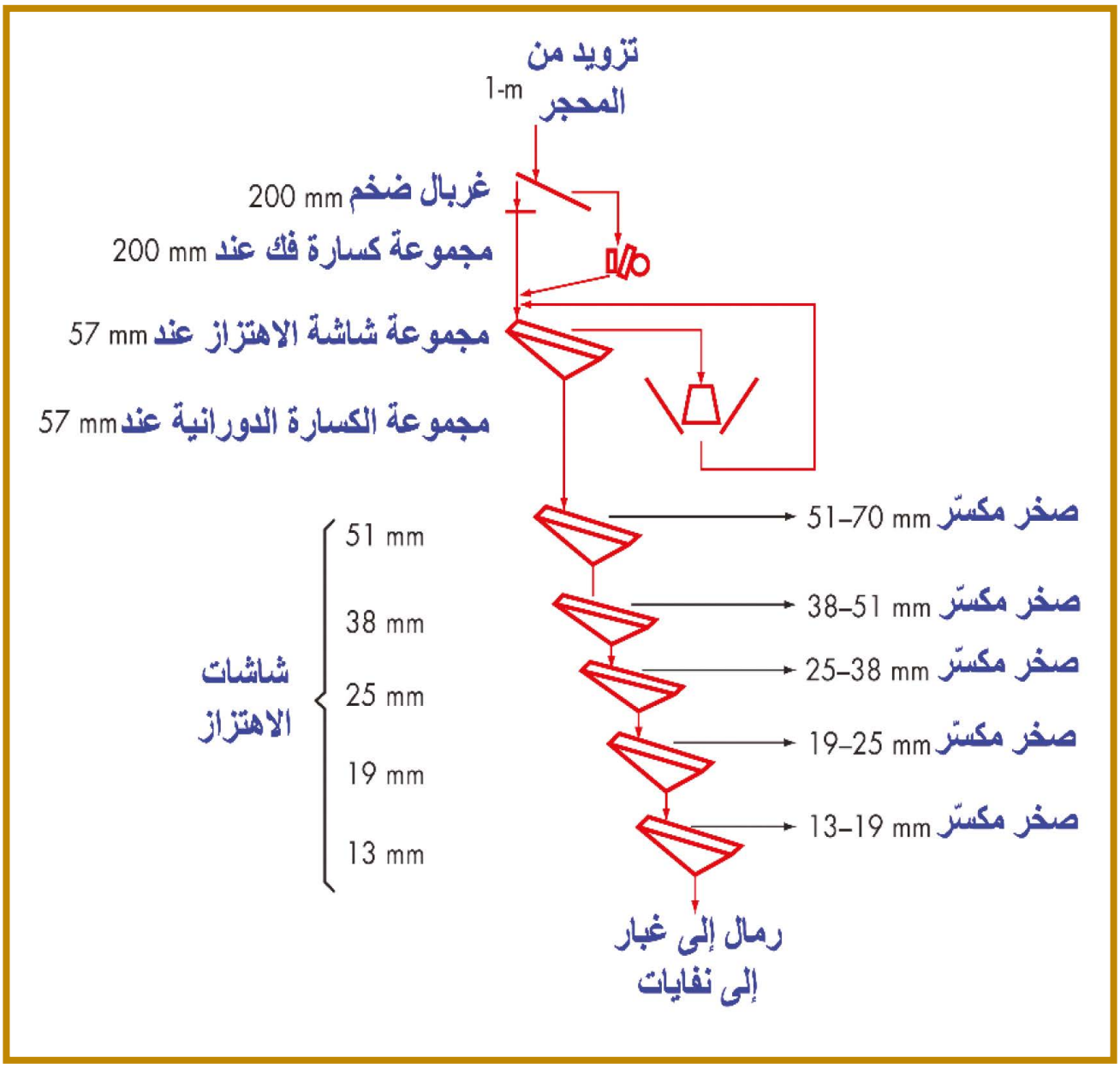
تتم معظم عمليات معالجة المعادن في وجود الماء. يجب فصل المواد الصلبة عن الماء لإنتاج المعادن. يتم تحقيق ذلك باستخدام المكثفات والمرشحات.

### ■ الذوبـــــان المائـــي

يتم استخلاص العديد من المعادن من الخامات عن طريق إذابة المعدن (أو المعادن) المطلوبة - في عملية تسمى الترشيح - مع مواد مسيلة مختلفة في ظل وجود الأكسجين. بعد الترشيح، يمكن تركيز المعادن الذائبة عن طريق امتصاص الكربون، أو التبادل الأيوني، أو استخلاص المذيبات. يمكن استخلاص المعادن المنقاة والمركزة من المحلول باستخدام عدد من تقنيات الاختزال، بما في ذلك التدعيم والاستخلاص الكهربائي.

## • أمثلـــة على عمليات معالجة المعـــادن

يوضح الشكل الآتي مخطط التدفق النموذجي لسحق الصخور وتحجيمها في عملية المحاجر. يمكن أن يوجد خام المناجم على شكل كتل يصل قطرها إلى 1.5 متر. في مثال هذا الشكل، يتم تزويد كتل من الصخور بحجم 1 متر إلى كسارة تعمل على تقليل قطر المادة إلى 200 ملم أو أقل. بعد الغربلة لإزالة الصخور التي يقل حجمها عن 57 ملم، يتم تقليل حجم الصخور التي يتراوح حجمها بين 57 ملم و200 ملم بواسطة الكسارة الدورانية. يتم بعد ذلك تصنيف المنتج من هذه الخطوة عن طريق الغربلة إلى المنتج المطلوب للبيع.



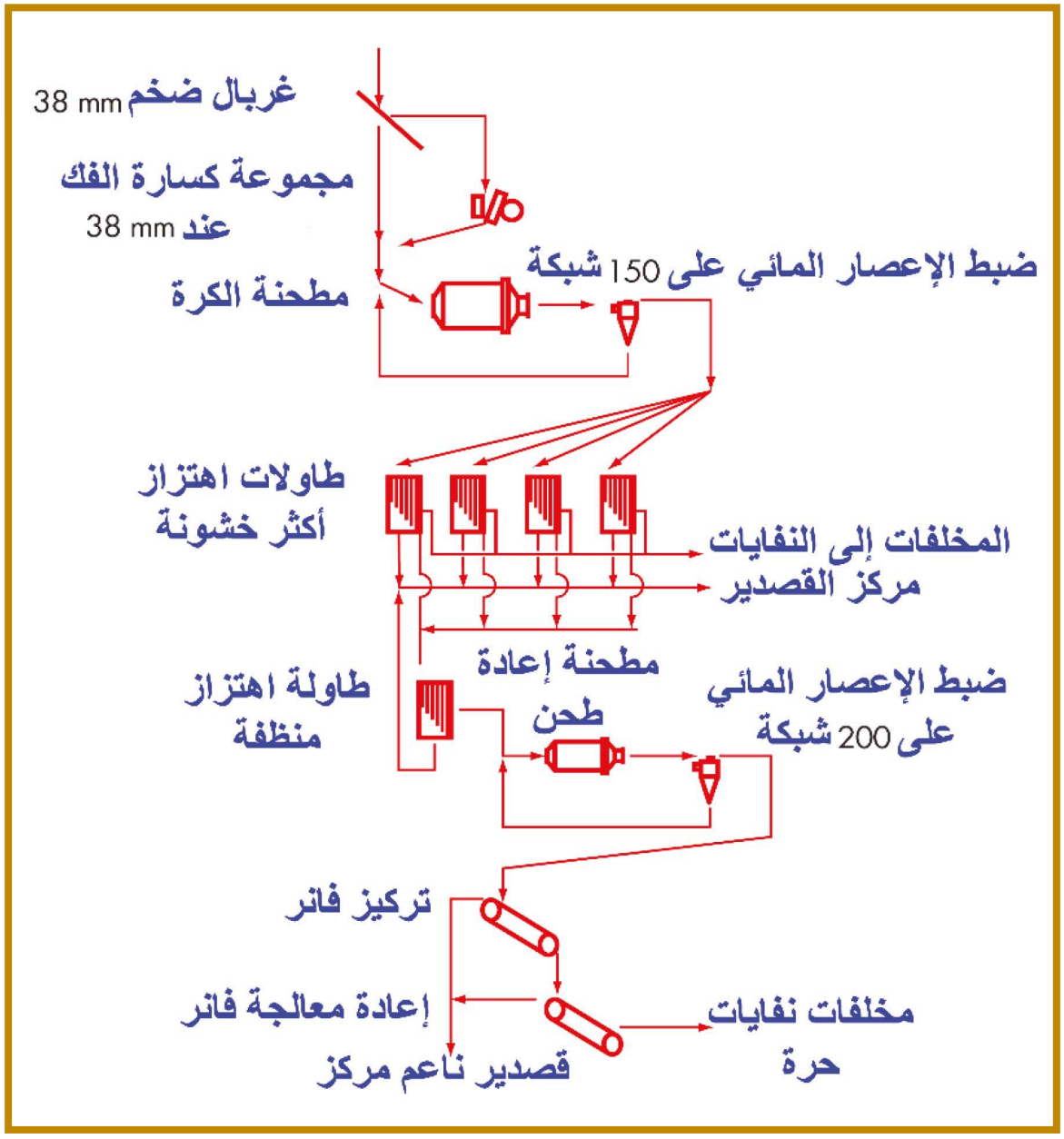

مخطط تدفقي لعملية سحق وفرز الصخور (Fuerstenau & Han, 2011)

كما يوضح الشكل الأول دائرة متكاملة لعملية التكسير والطحن وفصل الحجم وتركيز الجاذبية لخام القصدير. حيث يتم فصل الحجم الأولي عن طريق ضبط الغربال الضخم ذو الأصابع على فتحات 38 ملم. يتم تزويد المواد كبيرة الحجم إلى الكسارة الفكية التي يبلغ قطرها 38 ملم، ثم يتم بعد ذلك تقليل حجم المنتج المسحوق إلى 20 شبكة عن طريق الطحن الكروي. يتم تصنيف المادة ذات 20 شبكة سالبة بواسطة الأعاصير المائية المحددة عند 150 شبكة، ويتم إرسال المادة ذات 150 شبكة سالبة إلى طاولات اهتزاز لتركيز معدن القصدير الثقيل، حجر القصدير. يتلقى الوسطاء في هذه العملية علاجًا إضافيًا. يتم إعادة طحن التركيز الناتج عن هذه العملية وحجمه إلى 200 شبكة.

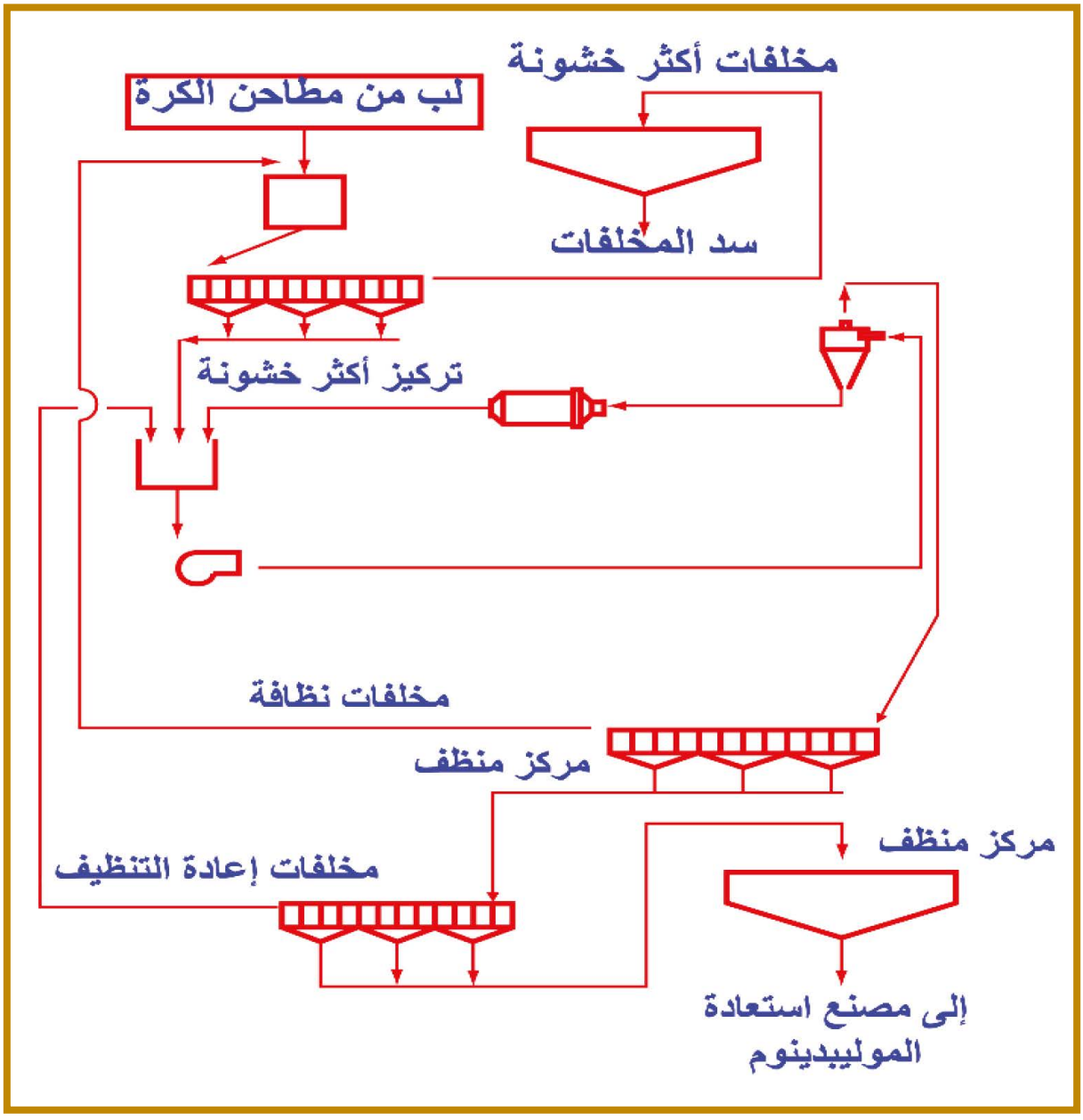
كما يظهر في الشكل الثاني مخطط تدفقي يصف المعالجة بالتعويم لخام النحاس الذي يحوي على الكالكوبايرايت والموليبدينيت. بعد الطحن والتصنيف، تتم توجيه اللب إلى تعويم ليصبح أكثر خشونة. ثم يتم تكثيف المخلفات الأكثر خشونة وإرسالها إلى سد المخلفات.

يتم فرز المُركّز الأكثر خشونة، ويتم إعادة طحن الحبيبات ذات الحجم الكبير. كما يتم تزويد الفائض الإعصاري إلى مرحلة التعويم الأنظف، كما يتم إعادة تنظيف التركيز المنظف. ويتم إعادة تدوير المخلفات النظيفة مرة أخرى إلى تعويم أكثر خشونة، ويتم تكثيف المركز المعاد تنظيفه وإرساله إلى مصنع استعادة الموليبدينوم لمزيد من المعالجة.

في هذه العملية، يحوي التزويد على 0.32 % Cu و 0.03 % Mo. ويحوي المركز الخشن، والمركز المنظف، وتركيز المنظف على 7 % إلى 9 % Cu، و 18 % Cu، و 25 % Cu، على التوالي. يحوي المركز المُعاد للتنظيف أيضًا على 2 % إلى 3 % Mo.

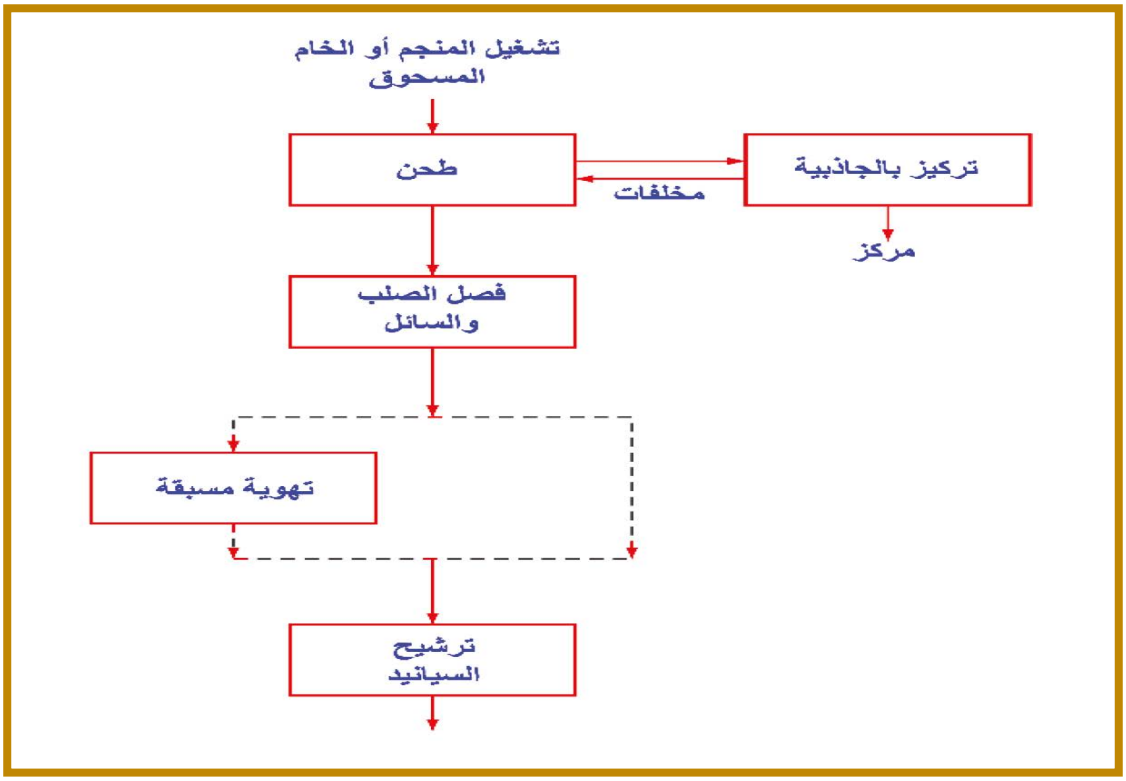



مخطط تدفقي لتركيز الجاذبية لخام القصدير (Fuerstenau & Han, 2011)




مخطط تدفقي لتعويم خام كبريتيد النحاس (Fuerstenau & Han, 2011)

يصور الشكل الآتي مخطط تدفقي لمعالجة خام الذهب المؤكسد بالطحن الحر. حركية ترشيح الذهب بطيئة، وكثيرًا ما يتم طحن خامات الذهب إلى أقل من نحو 76 ملم قبل الترشيح. وحتى في هذه الحالة، عادة ما يتطلب الأمر يومًا واحدًا في خطوة الترشيح. في هذه العملية، يتم سحق الخام الموجود في المنجم وطحنه. يخضع تفريغ مطحنة الكرة لتركيز الجاذبية لاستعادة الجزيئات الأكبر من الذهب الحر. يتم تكثيف المخلفات الناتجة عن هذه العملية، ومن ثم يتم إخضاع التدفق السفلي من المكثفات لترشيح السيانيد. في بعض الحالات، قد تحوي الخامات على معادن مستهلكة للأكسجين، مثل البيروتيت والماركاسيت، ويمكن إجراء خطوة تهوية أولية قبل ترشيح السيانيد.

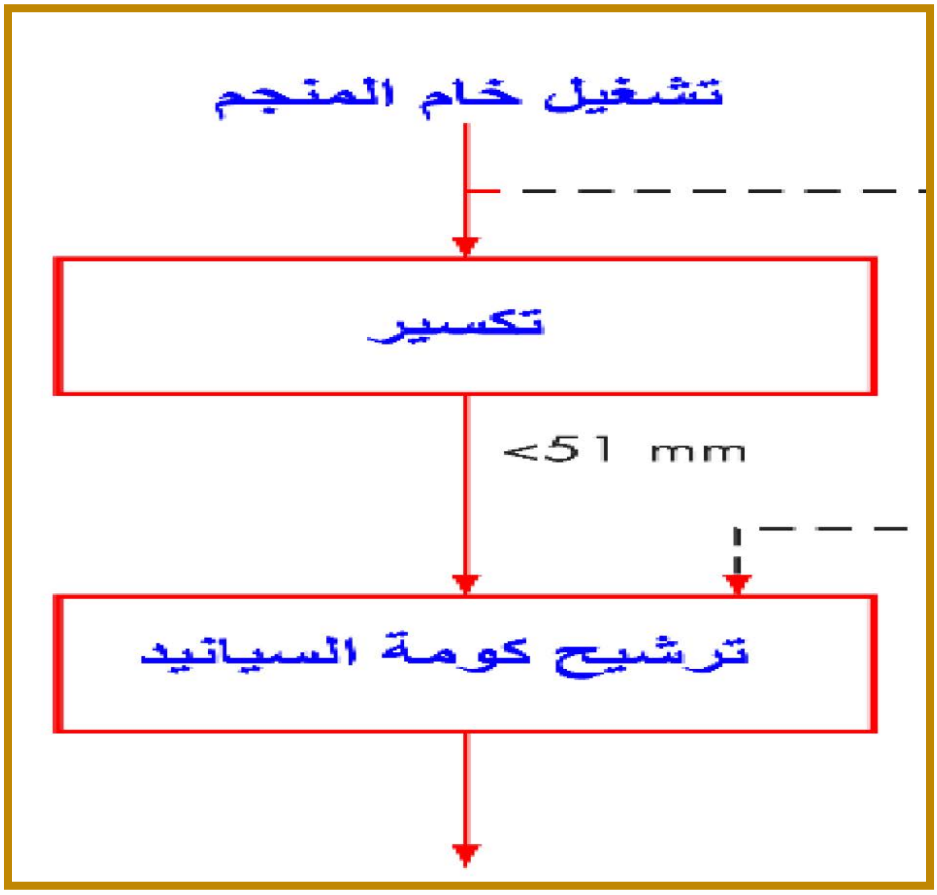



خيارات مخطط التدفق للطحن والترشيح المقلب لخامات الذهب المؤكسدة ذات الطحن الحر.

(Fuerstenau & Han, 2011)

أحدثت عملية ترشيح الكومة ثورة في صناعة تعدين الذهب. يمكن معالجة الخامات المؤكسدة منخفضة الجودة التي تحوي على ما يقرب من 0.933 جرام من الذهب لكل طن متري (0.03 أونصة من الذهب لكل طن قصير) من الخام باستخدام هذه التقنية، في حين لا يمكن معالجتها من خلال التكلفة الأعلى لعملية الطحن/الترشيح بالتحريك.

يعرض الشكل الآتي مخطط تدفقي مبسط لترشيح الكومة. وكما يوضح الشكل، قد يتم أو لا يتم سحق خام المناجم. وإذا تم التكسير، يتم سحق الخام عمومًا إلى أقل من 51 ملم في القطر. (Fuerstenau & Han, 2011)




مخطط تدفقي لترشيح كومة من خامات الذهب المؤكسدة (Fuerstenau & Han, 2011)

# عمليات تنقيب واستكشاف المعـــادن

يغطي التنقيب عن المعادن واستكشافها مجموعة واسعة من تخصصات علوم الأرض بما في ذلك الجيولوجيا والكيمياء الجيولوجية والجيوفيزياء والاستشعار عن بعد (الذي يتضمن صور الأقمار الصناعية وتفسير البيانات متعددة الأطياف). يتم استخدام تقنيات معملية جديدة وأدوات مساعدة بالحاسوب لنمذجة وفهم نشأة رواسب الخام. وسيتم مناقشة هذه القضايا بالتفصيل في هذا الفصل.

## • التنقـــيب

مع أن التنقيب واستكشاف المعادن يعتبران مترادفين على نطاق واسع، إلا أنه لا تزال هناك بعض المناطق في العالم حيث يعتبر التنقيب هو المرحلة الأولية والأكثر بدائية للاستكشاف، والتي تذكرنا بالمنقبين القدماء عن الذهب، ولكن مع إضافة بعض التكنولوجيا الحديثة. ويشير الاستكشاف إلى الدراسات التفصيلية وشبه التفصيلية أو الأكثر تقدمًا. يمكن أن يساعد التنقيب في تحديد المواقع التي قد تؤدي، بعد برنامج استكشاف رسمي، إلى اكتشاف رواسب خام. بدأ التنقيب القديم بالتنقيب في الجداول ومجاري الأنهار واستمر في الاستكشاف المادي للتلال المحيطة. تم تعدين هذه المناطق بسرعة وتم التخلي عنها ولكنها قدمت مؤخرًا أدلة ممتازة لاكتشاف رواسب المصدر.

وفي عمليات التنقيب الحديثة، لا يزال يتم استخدام أجهزة الكشف عن المعادن ومكتشفات المعادن الثقيلة الحرفية. في عمليات التعدين الغرينية الأكثر تقدمًا، يتم استخدام معدات السحب والجاذبية عالية السعة والمغناطيسية والطرد المركزي ومعدات التركيز بنجاح. كما تم طرح جيل جديد من الفواصل المعدنية الضوئية والليزرية.

## • استكشـــاف المعـــادن

الهدف الرئيسي من استكشاف المعادن هو تحديد موقع رواسب الخام، وهي عبارة عن تراكمات شاذة لمعدن واحد أو أكثر يمكن استخراجها بشكل مربح. الحفر هو الأسلوب الأكثر موثوقية والأكثر تكلفة يستخدم لتأكيد أو نفي وجود رواسب خام، ولكن الأساليب والتقنيات الجديدة لا تزال قيد التطوير. لقد تم بالفعل اكتشاف معظم رواسب الخام البارزة، لذلك يجب على المنقب عن المعادن الحديث استخدام علامات أكثر دقة للتعرف على وجود حدث معدني غير طبيعي. تسمح تقنيات التعدين والمعادن الجديدة لصناعة التعدين اليوم بالتطور إلى ما هو أبعد من الإنتاج المحدود عالي الجودة للاستفادة من الاستخراج والمعالجة ذات الجودة المنخفضة والكبيرة الحجم. لقد انتهت أيام المنجم الصغير عمليًا.

الهدف الإضافي للتنقيب عن المعادن اليوم هو العثور على امتدادات كبيرة للرواسب الموجودة مسبقًا والمرتبطة بالمناجم العاملة أو المهجورة. وقد تطرح بعض المناطق التعدينية المعروفة، في ظل الظروف الاقتصادية المتغيرة وتطبيق تقنيات التنقيب الحديثة، فرصًا جديدة لاستخراج المعادن المتبقية منها. إن الفهم المتزايد لنمذجة رواسب الخام باستخدام التحليلات الإحصائية وتكنولوجيا الحاسوب والأساليب المعملية الجديدة يوفر للمستكشف أدوات قوية لاكتشاف رواسب جديدة في باطن الأرض بما في ذلك الرواسب الممتدة من أجسام خام معروفة سابقًا أو مستخرجة جزئيًا. يمكن اعتبار الرواسب الجديدة، المصنفة على نطاق واسع، إما بارزة (سطحية) أو مخفية (تحت السطح). ولا يوجد سوى القليل من المجالات الجديدة التي يمكن استكشافها في البلدان الأكثر تقدمًا، باستثناء المناطق النائية التي يصعب الوصول إليها. يتم البحث عن الرواسب البارزة في المقام الأول في البلدان النامية. في بعض الحالات، قد تكون الرواسب

الناتئة قد دُفنت بسبب التربة الاستوائية أو بسبب حدث آخر بعد التمعدن، وبالتالي يصعب اكتشافها.

يتطلب اكتشاف الرواسب المخفية في الأعماق الضحلة دمج مختلف الأساليب التكنولوجية المتقدمة للتقييم الأولي. تعد طرق الاستكشاف السليم من أكثر الأدوات قيمة بالنسبة لجيولوجي الاستكشاف، الذي يتمثل هدفه الأساسي في تحديد الخصائص الجيولوجية للنظام المتمعدن الذي يمكن أن يؤدي إلى اكتشاف جسم خام. ويجب أن تشمل هذه الخصائص السمات الجيولوجية والكيميائية الصخرية والنظائرية والبتروكيميائية؛ الخصائص الفيزيائية لكل من الصخور المضيفة المتغيرة وغير المتغيرة؛ الإطار الهيكلي والتكتوني. وأي علاقات أخرى ذات صلة بأحداث التمعدن من حيث الزمان والمكان.

يعد تجميع وتحليل البيانات الموجودة مسبقًا أمرًا لا غنى عنه. يجب على جيولوجي الاستكشاف تحديد العوامل المحددة التي تتحكم في التمعدن في منطقة أو مقاطعة، وباستخدام أساليب متعددة التخصصات، رؤية أي غطاء بعد التمعدن لتحديد إمكانية وجود رواسب مخفية. تعتبر المسوحات الجيولوجية، التي تتنوع في التفاصيل والحجم، أساسية لجميع برامج الاستكشاف. ومن المهم التحديد الدقيق لأي سمات جيولوجية للرواسب القريبة والخصائص العامة لموقعها أو موضعها. تعد ميزات المقاطعات المعدنية الموضحة مسبقًا مفيدة جدًا في هذه المرحلة. من بين أهم الميزات التي تم أخذها في الاعتبار خلال عملية الاستكشاف بكاملها هي التوقيعات الجيوكيميائية والجيوفيزيائية والاستشعار عن بعد؛ والنماذج الترسيبية؛ وتغيير المعادن؛ وتقسيم المناطق؛ وغيرها من الأدلة المعدنية. يمكن تعديل التفاصيل وإعادة تعريفها بشكل أكثر دقة مع تقدم البرنامج واكتشاف مؤشرات جديدة.

يجب أن يعتمد التفسير الجيولوجي على تقنيات وتخصصات إضافية مثل رسم الخرائط الميدانية، والجيولوجيا الهيكلية والتكتونية، والجيومورفولوجيا، وعلم الصخور، وعلم الرواسب والطبقات، وعلم المعادن، والإحصاء الجيولوجي، والهندسة الجيوتقنية، والجيولوجيا المائية، وقياس حرارة الأرض، والتضاريس، والكيمياء الجيولوجية. سيتم مراجعة الطرق الثلاثة الرئيسية التي تدمج جميع الملاحظات الجيولوجية في برامج الاستكشاف الرسمية بإيجاز هنا: كيمياء الاستكشاف والاستكشاف الجيوفيزيائي ورواسب الخام. تشكل تقديرات وتعريفات الموارد والاحتياطيات إحدى المراحل النهائية قبل الدخول في الإنتاج. في الاستكشاف الإقليمي، تبدأ الكيمياء الجيولوجية بإجراء مسوحات لرواسب المجاري المائية تليها أخذ عينات تفصيلية من التربة والصخور. وينبغي أيضًا أخذ الكيمياء الجيولوجية المائية والكيمياء الجيولوجية الحيوية وعلم النبات الجيولوجي في الاعتبار وتطبيقها عند الحاجة.

أثبتت الجيوفيزياء الجوية الإقليمية مثل الطرق المغناطيسية والإشعاعية والكهرومغناطيسية أنها مفيدة جدًا في المساعدة على تحديد البنى الرئيسية وفي تحديد نوعية الصخور والتمعدن المخفي. وفي بعض الحالات المحددة، تم تطبيق تكنولوجيا قياس الوزن الجوي، ولكن ليس بنجاح كبير. وتوفر هذه الأساليب، إلى جانب الطرق الكهربائية، دعمًا لمتابعة الاستكشاف الجيوفيزيائي الأرضي. ويدرج بعض الجيولوجيين الاستشعار عن بعد في مجال الاستكشاف الجيوفيزيائي، ولكن الأصح تصنيفه بوصفه طريقة منفصلة.لا يزال التصوير الجوي مفيدًا جدًا، وتسمح شبكة الإنترنت بتنزيل صور أحادية ومتعددة الألوان لكل جزء من سطح الأرض تقريبًا، مجانًا في كثير من الأحيان.

لقد اختفت عمليًا الأساليب القديمة للتصوير الجوي على ارتفاعات منخفضة وعالية، ويتم تطبيقها الآن فقط في حالات محددة جدًا. أصبحت صور الأقمار

الصناعية عالية الدقة هي الطريقة المفضلة للتصوير الفوتوغرافي الجوي. كما تتوفر البيانات متعددة الأطياف للجمهور من بعض الجهات الحكومية التي تمتلك أقمارًا صناعية خاصة. يمكن اكتشاف ميزات تغيير الصخور وتقسيم المناطق بسهولة عن طريق معالجة البيانات متعددة الأطياف. ولا تزال هذه التكنولوجيا قيد التحقيق من قبل الجامعات والمسوحات الجيولوجية الفيدرالية وحكومات الولايات، ومنظمات أبحاث علوم الأرض؛ تقدم بعض الشركات الخاصة خدمات تجارية.

في المرحلة الثانية من برنامج الاستكشاف، يتم اختيار تحليل بيانات ومنهجيات المسح وتطبيقها. يعتمد عمق التنقيب تحت السطح على السلعة المعدنية. فقط عدد قليل جدًا من المعادن مثل الماس ومعادن مجموعة الذهب والبلاتين عالية الجودة لديها قيمة وحدة كافية لدعم الاستكشاف العميق.

وفي مرحلة لاحقة، تقوم الدراسات الجيولوجية المحلية بجمع البيانات البنيوية والطبقية والحجرية والبتروكيميائية. ويجب تحديد كافة العلاقات المكانية والزمانية بين أنواع الصخور المختلفة. من الأهمية بمكان أن يكون الوقت النسبي لوضع الصخور البركانية و/أو المتطفلة في حزمة الصخور المحلية بكاملها. سيتطلب كل نوع من الرواسب المعدنية طرق استكشاف محددة.

## • غطاء ما بعد التمعدن

غالبًا ما تجعل العوامل الجوية والتآكل الطبيعية، وكذلك العمليات التكتونية، المراقبة المباشرة للرواسب المعدنية أمرًا صعبًا؛ ومع ذلك، يمكن للمواد التي تعرضت للتجوية أن تكون مؤشرات ممتازة للتمعدن. تعد عملية التطيّن Argillization، والأكسدة Oxidation، والبروبلة Propylitization، والتسيلك Silicification من أصناف التغيير الرئيسية التي تنتج تغيرات كبيرة في اللون والتركيب في النتوءات. ولذلك فإن تغيير الصخور مهم جدًا في هذه المرحلة.

يتم تطبيق الجيوكيمياء والجيوفيزياء التفصيلية على نطاق واسع في هذه الحالات للتحقيق في غطاء ما بعد التمعدن. ويساعد الاستشعار عن بعد في اكتشاف هذه المظاهر السطحية للصخور المتغيرة. يتم استخدام قواعد البيانات الحاسوبية ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) والأساليب التحليلية الإحصائية لتنظيم ودراسة البيانات الجيولوجية.

الخطوة التالية عادة هي أخذ عينات واختبار الهدف المحتمل مباشرة عن طريق قلب الماس والحفر الدوراني العكسي. تسمح العينات الأساسية بالمراقبة المباشرة للصخور للحصول على بيانات جيولوجية وجيوتقنية وهيكلية أكثر تفصيلًا. يوفر الدوران العكسي فكرة أكثر عمومية عن الاختلاف الصخري ويسمح بأخذ عينات أسرع لتحديد الدرجة.

المشكلة الأساسية التي يواجهها جيولوجي الاستكشاف هي العثور على تراكمات معدنية شاذة في مواقع يمكن الوصول إليها بدرجات تجعل استخراجها ومعالجتها وتسويقها مربحًا. ويتم تسجيل امتيازات التنقيب بانتظام بالآلاف، خاصة في البلدان النامية. معظمها مجرد «استغلال للأرض» من قبل شركات صغيرة أو أمل منقب قديم في امتلاك منجم. يجب اختيار التقديمات المحتملة

بعناية ومراجعتها تقنيًا قبل استثمار أي وقت ورأس مال في مزيد من الفحص لهذه الامتيازات.

يتضمن الاستكشاف الحديث زيارة استطلاعية أولية، يتبعها برنامج استكشاف أكثر كثافة إذا لزم الأمر. يتم اكتشاف عدد قليل جدًا من الكتل الخام اليوم نتيجة لزيارة جيولوجية واحدة فقط. ويمكن تقليل التكلفة المرتفعة للاستكشاف من خلال تطبيق أساليب إضافية للتقييم العلمي بشكل عقلاني. تعتبر أسعار المعادن العالمية العامل الأساسي المتحكم في إنتاج المعادن؛ ومع ذلك، فإن العوامل الاقتصادية العالمية المعقدة مثل السياسة والصراع المسلح قد تسبب تقلبات غير متوقعة في الأسعار. ستبقى البلدان الصناعية هي المستهلك الرئيسي للمواد الخام المعدنية، في حين ستبقى البلدان النامية هي المزود الرئيسي. سيكون هناك طلب متزايد على الجيولوجيين الاستكشافيين الموهوبين، إلى جانب استخدام التقنيات، التي لا يزال بعضها بحاجة إلى التعريف والتحسين وحتى الاكتشاف.

## • الجيوكيمياء الاستكشافية

الجيوكيمياء الاستكشافية Exploration Geochemistry (EGCH) هي طريقة استكشاف تعتمد على قياسات منهجية لكميات وتوزيع العناصر الكيميائية مع هجرتها في القشرة الأرضية. يعتمد استكشاف المعادن على فرضية مفادها أن عناصر أو آثار «مستكشفي المسارات» الجيوكيميائيين تهاجر من الجسم الخام الأصلي بوسائل مختلفة لتكوين مناطق شاذة أو هالات مشتتة يمكن اكتشافها بواسطة طرق تحليل حساسة جدًا (انظر الجدول الآتي من أجل بعض هذه العناصر).

| مستكشفات المسار | رواسب الخام | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ag | Au | Be | Co | Cu | Li | Mo | Ni | Pb | Sn | U | W | Zn |
| Ag | | x | | x | x | | | | x | | | | x |
| As | x | x | | x | | | | | | | | x | |
| Ba | x | | | | | | | | x | | | | x |
| Cd | | | | | | | | | | | | | x |
| Co | x | | | | | | | x | | | | | |
| Cu | | x | | x | | | x | x | x | | | | x |
| $H_2S$ | | | | | x | | | x | x | | | | x |
| Mn | | | | | x | | | | | | | | |
| Mo | | | | | x | | | | | | | x | |
| Ni | | | | | | x | x | | | | | | |
| Pb | | | | x | x | | | | | | | | x |
| Re | | | | | | | x | x | | | | | |
| Sb | x | x | | | | | | | | | | | |
| Se | | | | | | | x | | x | | x | | x |
| Sn | | | | | | | | | | x | | x | |
| $SO_4$ | | | | | x | | x | x | x | | x | | x |
| Te | x | x | | | | | x | | | | | | |
| W | | | | | | | x | | | | | | |
| Zn | x | x | x | | x | x | | x | x | | | | |

العناصر التي تعمل كمستكشفات للرواسب الخام (Lee-Moreno, 2011)

بشكل عام، كلما كان الشذوذ أكبر، كلما كان المصدر أكبر. كما أن شدة الشذوذ عادة ما تتناسب مع درجة التمعدن؛ ومع ذلك، فإن تفسير الجسم الخام المحتمل يعتمد على قدرات التعبئة المختلفة لعناصر المسار التي تحدث في بيئات مختلفة. للكيمياء الجيولوجية الاستكشافية تطبيقات مهمة في جميع مراحل التنقيب عن المعادن. في مناطق واسعة مثل المقاطعات المعدنية، يتم إجراء مسوحات إقليمية لرواسب المجاري منخفضة الكثافة في البداية (عينة واحدة كل 100 كيلومتر مربع) تليها فترات أكثر تفصيلًا لأخذ عينات من رواسب المجاري (1–3 كم / عينة على النحو الذي تحدده التضاريس المحلية). يتم التخطيط لأخذ عينات جيوكيميائية للتربة والصخور وإجراؤها بعد تحديد محيط تقريبي للشذوذ.

يتم تخزين البيانات الجيوكيميائية باستخدام الإحداثيات المتعامدة لمواقع العينات بالإضافة إلى قيم العناصر التي تم تحليلها. ثم يتم تطبيق الأساليب الإحصائية للمساعدة في تفسير النتائج. يجب تقدير القيم العادية (الخلفية) والشاذة (فوق العتبة) ضمن مجموعة جيوكيميائية معينة في المرحلة الأولية من التحقيق. كما يتم استخدام التباين، الذي يتكون من النسبة بين العينة وقيم الخلفية، بشكل شائع. تعد ملفات تعريف المسافة مقابل قيمة العنصر مفيدة جدًا. وبالتالي يتم إنتاج مخططات توزيع الترددات والتكرارات التراكمية بالاشتراك مع التحليلات الإحصائية الأساسية الأخرى. تتم صياغة خرائط خط المتساوي التحول Isograd أو خط تساوي السماكة Isopach من خلال تحديد عناصر مختارة في الغالب من مسوحات الرواسب النهرية؛ تمثل الدوائر ذات الأحجام المختلفة نطاقات العناصر النسبية.

أثبتت نسب العناصر نجاحها الكبير في التفسير الجيوكيميائي. غالبًا ما تنتج التراكمات غير الاقتصادية للمعادن والتلوث البشري شذوذات جيوكيميائية

ضئيلة أو زائفة. ويجب على جيولوجي التنقيب أن ينتبه لهذه الإمكانات وأن يقوم بتصفيتها. على الرغم من أنها تقنية حديثة نسبيًا، إلا أن المنفعة الاقتصادية للكيمياء الجيولوجية الاستكشافية في اكتشاف التمعدن لها سجل حافل. أصبحت الكيمياء الجيولوجية الاستكشافية حاليًا مقبولة عالميًا باعتبارها طريقة الاستكشاف الأكثر أهمية وفعالية لاكتشاف رواسب المعادن الثمينة.

## • نمـــاذج التشـــتت

يوضح نموذج التشتت وفرة المادة الكيميائية وتوزيعها وكذلك استقرارها في البيئة المحلية. تشتت العناصر هو أساس الكيمياء الجيولوجية الاستكشافية. هالات التشتت ذات طبيعة أولية أو ثانوية. ترتبط هالات التشتت الأولية ارتباطًا مباشرًا بمكان التمعدن، ويحدث الكثير منها أحيانًا كانعكاس لهالات تغير الرواسب، ولكنها يمكن أن تكون ذات امتداد أكبر بكثير. تتشكل هالات التشتت الثانوية عن طريق الهجرة اللاحقة لعناصر الدليل التي يمكن تتبعها. في المناطق المعدنية الكبيرة، تشكل هالات التشتت «مقاطعات جيوكيميائية» Geochemical Provinces ذات قيم خلفية أعلى من المعتاد.

تعتمد الطرق المحددة المطبقة للكيمياء الجيولوجية الاستكشافية ومواد أخذ العينات المرتبطة بها على هالات التشتت هذه. وستناقش هذه الطرق بإيجاز في الأقسام اللاحقة؛ ومع ذلك، ينبغي للمرء دائمًا إجراء مسوحات توجيهية لتحديد مجموعة العناصر الأفضل للتحليل، بالإضافة إلى أنواع أخذ العينات وتباعد العينات.

## • هـــالات التشـــتت الأوليـــة

**هناك ثلاثة أنواع رئيسية من هالات التشتت الأولية:**

- المقاطعات الجيوكيميائية هي مناطق محددة يختلف فيها التركيب الكيميائي بشكل مثير للريبة بالنسبة لعنصر واحد أو عناصر مختلفة عن المناطق المجاورة أو عن متوسط القيم القشرية.
- يتم إنتاج تشتت السوائل المائية على طول مسارات المحاليل المعدنية الحرارية المائية. وينتج عن ذلك انتشار على صخور الجدران وهالات تسرب على طول الأرض المتصدعة حول الرواسب.
- يتم إنتاج التشتت الغازي عن طريق السوائل الغازية ذات درجة الحرارة العالية التي تغزو الأرض المجاورة. يمكن اكتشافها لاحقًا في أشكالها الغازية أو كمكثفات عنصرية. ويستخدم الزئبق وبعض الغازات المشعة وثاني أكسيد الكربون أو ثاني أكسيد الكبريت في دراسة الهالات الغازية.

## • هـــالات التشـــتت الثانويـــة

تتحكم الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمعادن المكونة للصخور وأنواع عوامل التعرية في توزيع المنتجات المتحللة للصخور الأم. هذه العمليات مسؤولة عن تشكيل هالات التشتت الثانوية. الأنماط الناتجة مفيدة جدًا في الاستكشاف الجيوكيميائي وستتم مناقشتها في الفقرات اللاحقة. التجوية هي العملية التي يتم من خلالها تحطيم الصخور بفعل العوامل الكيميائية و/أو الفيزيائية و/أو الميكانيكية. تعتبر المنتجات الرئيسية اللاحقة للتجوية مهمة في الكيمياء الجيولوجية الاستكشافية:

- تكون المنتجات الأولية المتبقية أكثر استقرارًا، وتتفكك جزئيًا فقط، وتساعد في تحديد الصخرة الأم.
- تحدث المنتجات المتبقية الثانوية بالقرب من المصدر؛ قد تحمل الهيدروليزات مثل الطين وأكاسيد الحديد مسارات تمعدن قريبة.
- المنتجات القابلة للذوبان هي منتجات غير مستقرة تنتقل لمسافات كبيرة من مصدرها (أو مصادرها) كمواد صلبة مذابة (مثل كربونات الكالسيوم والمغنيسيوم وأملاح الصوديوم والبوتاسيوم وأكاسيد المنغنيز والحديد وأملاح المعادن الأساسية الأخرى).

تحمل المياه السطحية جزيئات مجهرية من المركبات العضوية وغير العضوية مع آثار من العناصر الكيميائية المدمجة على طول الطريق. تعد حركة العنصر العامل الرئيسي الذي يتحكم في هذا النوع من التشتت. وهو أساس التنقيب الهيدروجيوكيميائي.

تنطوي المياه الجوفية على المبادئ نفسها المتبعة في المياه السطحية. وتستخدم آبار المياه الضحلة والعميقة ومياه الينابيع لأخذ العينات. رواسب التيار هي مواد فتاتية مشتقة من رواسب الخام وغالبًا ما يتم نقلها لمسافات كبيرة عن طريق مياه النهر، ثم تترسب عن طريق التأثيرات الميكانيكية أو الكيميائية، وخاصة بالقرب من نقاط الالتقاء. لقد كانت الكيمياء الجيولوجية للرواسب المتدفقة طريقة فعالة جدًا في الاستكشاف. تتم متابعة القيم الشاذة في اتجاه المنبع لاكتشاف المصدر.

تحتفظ التربة بالخصائص الكيميائية والمعدنية لموادها الأصلية، وغالبًا ما تلتقط العناصر التي تنتقل عبرها. تتمتع معظم أنواع التربة بقدرة كبيرة على الامتصاص وبالتالي تصبح مفيدة في الكيمياء الجيولوجية الاستكشافية. ينبغي

للمرء أن يدرك ما إذا كانت التربة يتم نقلها أو بقاياها في الطبيعة لتفسير الأنماط الشاذة والمصادر المحتملة بشكل صحيح. في أخذ عينات التربة، قم دائمًا بأخذ العينة من أفق التربة نفسه؛ ومع ذلك، هناك منهجية جديدة تحلل عينات التربة على العمق نفسه بغض النظر عن الأفق. قد يشير الغطاء النباتي إلى كيمياء التربة لأن بعض النباتات تنمو فقط حيث توجد عناصر غذائية معينة. البعض الآخر عبارة عن ممتصات ومراكم طبيعية لعناصر معينة. تنتقل هذه العناصر عبر التربة والصخور المكسورة وتمتصها النباتات. وفي بعض الحالات تنمو النباتات بجذور طويلة وعميقة قد تصل إلى هالات التشتت تحت السطح وتتناول بعض مكوناتها الكيميائية. وفي حالات أخرى، قد تؤدي العناصر والمركبات الضارة إلى ضمور أو تضخم يمكن اكتشافه في النباتات مما قد يؤدي إلى اكتشاف التمعدن.

التراكمات العضوية الناتجة عن بعض المواد العضوية التي تمتلك قدرة تبادل أيوني عالية يمكن أن تجعلها تعمل كمصائد لبعض الكاتيونات. ويلاحظ هذا عادة في مناطق المستنقعات القريبة من قنوات تغذية المياه. تعتبر الإجراءات الحيوانية أقل أهمية في الكيمياء الجيولوجية الاستكشافية، ولم تكن مفيدة إلا في حالات قليلة معزولة. على سبيل المثال، قد تقوم الحيوانات التي تختبئ مثل الثعالب والنمل، أو بناة التلال مثل النمل الأبيض، بإحضار معادن حاملة للمعادن تحت السطح أو مؤشرات للأحجار الكريمة إلى السطح حيث يمكن أخذ عينات منها ومراقبتها بسهولة.

يمكن استكشاف الرواسب الجليدية بشكل مشابه لرواسب التدفق. قد تحوي الركام الطرفية والجانبية على شظايا معدنية من المنبع. من المفيد أيضًا استخدام الطين الناعم الذي يجب جمعه وتحليله. إذا تم الكشف عن

حالـة شـاذة، فـإن أي عينـات جيوكيميائيـة إضافيـة سـيكون مـن الصعـب بسـبب التضاريـس الجليديـة. ولذلـك، يمكـن اسـتخدام الأسـاليب الجيوفيزيائيـة غيـر المباشـرة لمزيـد مـن التحقيـق. قـد تحمـل أفعـال الميـاه الذائبـة آثارًا لبعـض العناصـر الشـاذة المحاصـرة في المسـام في الصخـور. وينتـج عـن التجميـد تدفقـات تصاعديـة لبعـض الميـاه الجوفيـة التـي يمكـن أن تكـون مفيـدة في تحديـد موقـع الرواسـب المخفيـة. هـذه الطريقـة ذات فائـدة محـدودة فقـط.

## • طرق التحليـــل الجيوكيميائيـــة

على الرغم من أن الطرق الجيوكيميائية يتم تحديثها وإعادة تعريفها بشكل روتيني، إلا أنه يجب على جيولوجي الاستكشاف أن يضع ثلاثة عوامل رئيسية في الاعتبار:

- الحساسية.
- الدقة.
- التكلفة.

يجب تحليل جميع العينات من منطقة معينة بالتقنية نفسها ويفضل أن يتم ذلك بواسطة المختبر نفسه للتأكد من الاتساق. في بعض الحالات، تسببت النتائج غير الصحيحة في نفقات إضافية غير ضرورية، أو ما هو أسوأ من ذلك، التخلي غير المبرر عن المشروع. يجب إعداد مجموعات مكررة من العينات وتسليمها إلى المختبر، مع توفير معيار واحد فارغ ومعيار معروف لكل مجموعة مكونة من عشرين عينة. يوصى بشدة بالتحقق مرة أخرى من التحاليل في مختبرات مختلفة. تعتمد الكيمياء الجيولوجية الاستكشافية على اكتشاف كميات صغيرة

جدًا من عناصر معينة، مع الاستفادة من العديد من طرق التحليل الحديثة. الأكثر شيوعًا هي ما يأتي:

- يبقى فحص النار المنتظم الطريقة المفضلة لتحليل الذهب.
- يتم تطبيق الطرق الطيفية في الغالب لتحليل العناصر المتعددة:

- لا يزال الامتصاص الذري، الذي تم تطويره في الخمسينات، يستخدم على نطاق واسع في الكيمياء الجيولوجية الاستكشافية عندما يلزم تحديد عدد واحد أو عدد صغير من العناصر. في الامتصاص الذري، يتم رفع إلكترونات العنصر إلى مدارات أعلى لفترة قصيرة عن طريق امتصاص كمية من الطاقة الخاصة بذلك العنصر المعين. وهذا يعطي هذه التقنية انتقائية عنصرية. يتم قياس كمية الطاقة وترتبط بشكل مباشر بتركيز العنصر في العينة المحضرة.

- يعد قياس طيف الكتلة البلازما المقترنة حثيًا (ICP-MS) الطريقة المفضلة في الكيمياء الجيولوجية الحديثة التي تسمح بإجراء تحليل سريع ودقيق متعدد العناصر. يحدد (ICP-MS) التركيب العنصري للعينات عن طريق حساب عدد الأيونات عند كتلة معينة من العنصر.

- يُستخدم أيضًا مطياف الانبعاث البلازمي البصري المقترن حثيًا (ICP-OES)، وهو مكمل لمطياف الكتلة، في الكشف عن العناصر الأخف في الجدول الدوري.

- الأيون المعدني المحمول Mobile Metal Ion هو التحليل الكيميائي منخفض المستوى للتربة باستخدام محاليل مستخلصة خاصة وتحديد التركيز لاحقًا بواسطة ICP-MS. يتم أخذ عينات التربة من أعماق متساوية بغض النظر عن أفق التربة. تم تطبيق هذه الطريقة في البداية من قبل مركز أبحاث الكيمياء الجيولوجية في أستراليا، وهي حاليًا تستخدم على نطاق واسع.

- تسمح أجهزة تحليل الأشعة السينية المحمولة بالكشف الدقيق إلى حد ما عن التركيزات المنخفضة للعناصر لمعظم أنواع العينات الجيوكيميائية الصلبة في الحقل.
- كانت الطريقة اللونية إحدى الطرق الرائدة في التحليل منذ عدة سنوات. تم استبداله بطرق أكثر دقة. ومع ذلك، فإنه لا يزال مطبقًا في المناطق النائية حيث تكون النتائج في الموقع مطلوبة بسرعة.

## • تفسير البيانات

يعد التحليل الإحصائي أفضل طريقة لمساعدة جيولوجي التنقيب في تفسير كميات كبيرة من البيانات الجيوكيميائية. توجد العديد من حزم البرامج التجارية، بدءًا من الحسابات الإحصائية البسيطة (على سبيل المثال، المتوسط والانحراف المعياري، والتوزيعات التكرارية العادية والسجلية العادية) إلى التحليل الإحصائي الجغرافي الأكثر تقدمًا بما في ذلك كريجينج Kriging، والتحليل العنقودي، والتحليل التمييزي، وتحليل العوامل، والارتباط، وتحليل الانحدار المتعدد.

يتم إدخال جميع البيانات في قواعد البيانات الرقمية ويتم دمجها لاحقًا في أنظمة المعلومات الجغرافية وربطها مكانيًا من خلال نظام تحديد المواقع العالمي. وهذا يسمح بتجميع طبقات مختلفة من المعلومات لتسهيل التفسير. تُستخدم العديد من البرامج، سواء المعلبة أو المملوكة، لرسم أنواع مختلفة من الخرائط وملفات التعريف ونماذج الكتل.

## • طرق الاستكشاف الجيوفيزيائية

يعتمد الاستكشاف الجيوفيزيائي على قياس التباين بين الخصائص الفيزيائية الطبيعية والخواص الفيزيائية المستحثة للمواد. تبدأ المسوحات الجيوفيزيائية بطرق الاستطلاع المحمولة جوًا لتحديد المعالم الجيولوجية الواسعة. وقد تم تطبيق طرق القياس الإشعاعي والمغناطيسي والكهرومغناطيسي، ومؤخرًا، قياس الوزن بنجاح في المسوحات المحمولة جوًا. ويواصل جيولوجي الاستكشاف استخدام أساليب جيوفيزيائية أكثر تفصيلًا توفر معلومات أكثر تفصيلًا، بما في ذلك قياسات قاع البئر، والبحث مباشرة عن مؤشرات التمعدن المخفي.

اكتسبت طرق الاستكشاف الجيوفيزيائية شعبية كبيرة في السنوات القليلة الماضية. وقد تم تطوير أدوات أكثر دقة وسهلة الاستخدام. تساعد تقنيات وبرامج المسح الحديثة في تفسير النتائج بشكل أسرع وبموثوقية أكبر من ذي قبل. يعتمد تصميم المسح وطبيعة البيانات على خصائص أدوات الكشف. يتطلب الكشف الجيوفيزيائي للرواسب المعدنية أن تمتلك خصائص فيزيائية مختلفة عن تلك الموجودة في الصخور المضيفة لها.

## • الطـــرق الجيوفيزيائيـــة

يمكن لأجهزة قياس الجاذبية عالية الحساسية اكتشاف الحالات الشاذة الناجمة عن الاختلافات بين تسارع الجاذبية المُقاس محليًا والقيمة الإقليمية المتوقعة لنقطة معينة على سطح الأرض. ومع ذلك، يجب حساب التصحيحات المتعددة (للتأثيرات الجغرافية والطبوغرافية) للبيانات الميدانية قبل إجراء التفسير النهائي. يتم تحليل بيانات الجاذبية باستخدام التقنيات الرقمية للحصول على الشذوذات الإقليمية، والمشتقات الأولى والثانية، والشذوذات المتبقية، والتدرجات الأفقية.

## ■ المسوحات المغناطيسية

تعتمد المسوحات المغناطيسية على المجال المغناطيسي للأرض. كما هو الحال مع المسوحات الوزنية، تُظهر المسوحات المغناطيسية حالات شاذة ناجمة عن الاختلافات بين القيم التي تم الحصول عليها محليًا من قراءات المسح وتلك المحسوبة للكثافة الطبيعية للمجال المغناطيسي للأرض في أي نقطة معينة. أثبتت المسوحات الجوية المغناطيسية أنها مفيدة جدًا في استكشاف الاستطلاع الإقليمي. كما تم استخدام تطبيق القياس المغناطيسي عن بعد على سفن الأبحاث في الدراسات الأوقيانوغرافية، وحتى على مسافة أبعد، من الأقمار الصناعية.

تعتبر أجهزة قياس المغناطيسية الحديثة حساسة جدًا، ويمكن أن تنتج نتائج في فترة زمنية قصيرة، كما أن تشغيلها غير مكلف نسبيًا. بالإضافة إلى الكشف عن الرواسب المعدنية المغناطيسية (بشكل أساسي المغنتيت والبيروتيت)، يساعد قياس المغناطيسية عن بعد في رسم الخرائط الإقليمية للخصائص الصخرية والهيكلية والتكتونية. يتم استخدام التسجيل المغناطيسي في قاع البئر على نطاق واسع عندما تكون المعادن المغناطيسية موجودة بكميات يمكن اكتشافها في منطقة المسح. يمكن أن تساعد طرق القياس المغناطيسي أيضًا في تحديد نقاط اتصال التكوين المخفية، وعدم المطابقة، والعيوب الرئيسية، وسمك الغطاء الرسوبي.

## ■ الطرق الكهربائية

تعمل الطرق الكهربائية عن طريق قياس المجالات الكهربائية الطبيعية أو المستحثة. على الرغم من وجود العديد من أنواع الطرق الكهربائية، إلا أن المقاومة والاستقطاب المستحث والإمكانات الذاتية هي الأكثر شيوعًا في التنقيب عن المعادن. يمكن استخدام الطرق الكهربائية لتحديد السمات الهيكلية والتكتونية،

ولكنها أكثر فائدة في البحث عن الموصلات المعدنية المرتبطة بالأجسام الخام. يتم استخدام التسجيل في قاع البئر على نطاق واسع وبنجاح لتحديد الأجسام الخام. وفي البيئة الجيولوجية المناسبة، يجب استخدام البيانات السطحية جنبًا إلى جنب مع بيانات مسح قاع البئر.

يتم التحكم في المقاومة من خلال المسامية والمحتوى السائل للصخور ووجود معادن موصلة. وبالتالي، فإن أنواع الصخور المختلفة سيكون لها مقاومات طبيعية مختلفة. ويعتمد عمق الاختراق والتحقيق على الطاقة التي يتم حقنها في الأرض بواسطة مصدر الطاقة، وعن طريق التباعد ومجموعة الأقطاب الكهربائية. تم استخدام المقاومة على نطاق واسع في الكشف عن جميع أنواع الموصلات المعدنية وفي فحوصات المياه الجوفية. غالبًا ما يتم تطبيق الاستقطاب المستحث بالتوازي مع مسوحات المقاومة المنتظمة، مع الاستفادة من مجموعة الأقطاب الكهربائية نفسها أو مع تعديلات طفيفة. يعتمد على اكتشاف النشاط الكهروكيميائي و/أو الاستقطاب عند السطح البيني المعدني الناتج عن تطبيق مجال كهربائي أو مغناطيسي.

يعد الاستقطاب المستحث فعالًا جدًا في اكتشاف التمعدن المنتشر مثل منطقة الكبريتيد في النحاس السماقي أو المعادن الخام المنتشرة في رواسب المعادن الثمينة. يتم استخدام الإمكانات الذاتية عندما يتم إنتاج تأثير «البطارية الطبيعية» Natural Battery، كما يحدث عن طريق تدفق المياه الجوفية، وفي حالة التنقيب عن المعادن، عن طريق واجهة جسم خام الكبريتيد ومنطقة الأكسيد الخاصة به. ترتبط هذه الأحداث بالأجسام الخام البارزة أو تلك التي تم أكسدتها بما يتوافق مع تقلبات المنطقة الهوائية.

## ■ الطـــرق الكهرومغناطيسيـــة

يتـم اسـتخدام العديـد مـن مصفوفـات الملفـات في الطـرق الكهرومغناطيسـية لقيـاس مجموعـة مـن المجـالات الكهربائيـة ذات الموجـة الطويلـة المسـتحثة والمجـالات الكهرومغناطيسـية الطبيعيـة لـلأرض. يتـم إنشـاء المجال الكهرومغناطيسـي بواسـطة جهـاز إرسـال يقـوم بإنشـاء مجـال مغناطيسـي ثانـوي، والـذي يتـم تسـجيله مـع المجال المغناطيسـي الأساسـي. ويتـم حسـاب التخفيضـات والتصحيحـات اللاحقـة بحيـث يتـم إجـراء تفسـير نهائـي بالتزامـن مـع البيانـات الجيولوجيـة والجيوكيميائيـة. يسـتخدم جهـاز التداخـل الكمـي فائـق التوصيـل (SQUID) مقيـاس مغناطيسـي حسـاس جـدًا يسـجل مجـالات مغناطيسـية منخفضـة جـدًا. في بعـض الأحيـان يتـم اسـتخدامه في التنقيـب عـن المعـادن مـع أجهـزة استشـعار الملـف للكشـف عـن الموصـلات الأعمـق وعـزل الإشـارة عـن تلـك القادمـة مـن الغطـاء الموصـل العلـوي. حدثـت العديـد مـن التطبيقـات الناجحـة في استكشـاف رواسـب الكبريتيـد العميقـة الضخمـة باسـتخدام هـذه الطريقـة.

## ■ الطـــــرق المشعـــة

تقيـس الطـرق الإشـعاعية النشـاط الإشـعاعي الطبيعـي أو الاصطناعـي. اليورانيـوم والثوريـوم همـا المصـدران الرئيسـيان للانبعاثـات المشـعة. لا يمكـن لأجهـزة الكشـف عـن النشـاط الإشـعاعي العاديـة أن تصـل إلا إلـى أعمـاق ضحلـة لا تزيـد عـن بضعـة أمتـار؛ ومـع ذلـك، فـإن قيـاس الضغـط، الـذي يكشـف انبعاثـات الـرادون، يمكنـه «الرؤيـة» بشـكل أعمـق تحـت السـطح ويسـتخدم أحيانًـا مـع أجهـزة الكشـف عـن النشـاط الإشـعاعي العاديـة.

تتمتـع مسـوحات أشـعة جامـا المحمولـة جـوًا بتطبيقـات واسـعة النطـاق لاستكشـاف مناطـق واسـعة، كمـا أنهـا مفيـدة في رسـم الخرائـط الجيولوجيـة، مـع

الاستفادة من الانبعاثات المشعة البسيطة الصادرة عن المعادن المكونة للصخور التي تحدث بشكل طبيعي. تنتج العناصر المشعة المتحللة أشعة جاما، والتي يمكن اكتشافها بسهولة بواسطة مطياف أشعة جاما الحديث. يعد البوتاسيوم واليورانيوم والثوريوم من العناصر النزرة المشعة الشائعة التي توجد في العديد من المعادن المكونة للصخور. ومع اضمحلالها، فإنها توفر مصادر طبيعية لأشعة جاما التي تم اكتشافها في هذه المسوحات.

## ■ المسوحات الزلزالية

مع تطبيقات محدودة في التنقيب عن المعادن، تقيس الطرق الزلزالية التغيرات في سرعة موجات الصدمة الناتجة عن الشحنات المتفجرة أو الهزازات الميكانيكية (حتى تلك الناجمة عن تأثيرات المطرقة الثقيلة). يتم تسجيل موجات الانعكاس والانكسار واستخدامها لتحديد الاتصالات التكوينية والهيكلية في باطن السطح. تعد المسوحات السيزمية باهظة الثمن نسبيًا ولكن يمكن تطبيقها مباشرة على سطح الأرض أو من السفن البحرية. وهي تستخدم على نطاق واسع في التنقيب عن النفط.

## ■ الاستشعار عن بُعد

تسجل أجهزة استشعار الأشعة تحت الحمراء التغيرات في درجات الحرارة، والتي تم استخدامها بنجاح في الدراسات البيئية وفي تحديد مناطق المياه الجوفية والمناطق الطاردة للحرارة للتغيرات المعدنية. تحل صور الأقمار الصناعية عالية الدقة والتحليل الطيفي للتصوير تدريجيًا محل طرق التصوير الجوي التقليدية. يستخدم قياس الطيف التصويري أجهزة كشف متعددة الأطياف. يعد مطياف التصوير المرئي/الأشعة تحت الحمراء (AVIRIS) التابع للإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء من بين أكثر الأجهزة تقدمًا في الاستخدام حيث إنه يملك 224 قناة.

**يمكن سرد أجهزة الاستشعار الأخرى على النحو الآتي:**

- كاميرا HyperCam للتصوير الفائق الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (أرضية أو ملتقطة بالطائرات).
- مقياس الطيف التصويري متوسط الدقة (MODIS؛ الموجود على متن القمر الصناعي Terra EOS AM-1).
- مطياف التصوير متوسط الدقة (MERIS؛ الموجود على متن القمر الصناعي Envisat التابع لوكالة الفضاء الأوروبية).
- مطياف تجربة جمع الصور الرقمية فائقة الطيف (HyDICE).
- جهاز استشعار هايبريون (على متن القمر الصناعي Earth Observing-1).

تمنح ميزة القنوات المتعددة الكبيرة أجهزة الاستشعار القدرة على مراقبة الظواهر الجوية والكواكب في الدراسات البيئية واستكشاف المعادن. يسمح امتصاص الطاقة الطيفية الناتجة عن الروابط الكيميائية باكتشاف أنواع مختلفة من النباتات والعديد من المواد الاصطناعية والمعادن والتجمعات المعدنية. لكن الترجمة الفورية ليست بسيطة وتتطلب تدريبًا وخبرة متقدمة بالإضافة إلى استخدام برامج متطورة. التكاليف مرتفعة نسبيًا وتعتمد على حجم وخصائص المنطقة المراد تغطيتها. من المؤكد أن شعبية التصوير الطيفي ستزداد في المستقبل.

## • الرواســـب الخـــام

يجب أن يكون لدى جيولوجي الاستكشاف فكرة عن نوع رواسب الخام المطلوبة قبل البدء في برنامج التنقيب عن المعادن. في الدراسات الإقليمية، يوفر الوضع الجيولوجي العام القرائن الأولى. يساعد القرب من أي منطقة معدنية أو مقاطعة تعدينية محددة مسبقًا أيضًا على توقع نوع التمعدن. نماذج وتصنيفات رواسب الخام يشير معظم المؤلفين المعاصرين إلى التصنيف الأولي، والذي لا يزال شائعًا، لرواسب الخام الذي اقترحه ليندغرين في عام 1933، أو ذلك الذي اقترحه شنايدرهون (وتم تعديله لاحقًا بواسطة نيجلي في عام 1929). وقد تم اقتراح العديد من التصنيفات الأخرى ولكن هذه لا تزال سائدة.

أنشأت الدراسات الحديثة نماذج جيولوجية وجيوفيزيائية لرواسب الخام والتي توفر معلماتها أدلة مهمة لاستكشاف المعادن. ومع ذلك، يجب دراسة كل وديعة أو استكشافها وفقًا لمزاياها الخاصة. تعتمد خطط التصنيف الأكثر قبولاً على الخصائص الأصلية. يتم تعريف خمس مجموعات: التراكمات المنصهرة، والحرارية المائية، والرسوبية، والمتحولة، والسطحية.

التصنيفات المورفولوجية، مثل نوع العرق، أو منتشر، أو ضخم، أو مرتبط بالطبقات هي عادةً تقسيمات فرعية لهذه التصنيفات. وتنقسم كل مجموعة إلى فئات أو عائلات أو أنواع، وفي كثير من الأحيان يكون هناك بعض التداخل بين مجموعتين أو أكثر. تعتمد بعض تصنيفات الأجسام الخام على الارتباطات المعدنية. على الرغم من أنه قد تكون هناك بعض الآثار الاقتصادية أو الأصلية، إلا أن النتيجة لها أهمية محدودة في الاستكشاف. يتم إيلاء أهمية أكبر للتصنيفات التي تعتمد مباشرة على البيئة الجيولوجية وعمليات تكوين الخام.

وفي جميع الأحوال، من المفيد جدًا نمذجة الرواسب قيد الاستكشاف على غرار رواسب مشابهة معروفة أو مدروسة مسبقًا. يجب أن يكون الجيولوجي مستعدًا لتأكيد النموذج أو تغييره مع توفر المزيد من البيانات. عند تقييم احتمال الاستكشاف (أو أي ملكية تعدين)، يجب على المستكشف الالتزام بالمصطلحات والتعريفات الخاصة بالموارد والاحتياطيات، والتي أصبحت الآن مطلوبة ومنظمة دوليًا. المعايير الأكثر قبولًا على نطاق واسع هي تلك الواردة في الصك الوطني NI-43-101 (2005)، الذي اقترحه المعهد الكندي للتعدين، والذي يشبه كود اللجنة المشتركة لاحتياطيات الخام (JORC) من أستراليا (AusIMM 2004).

## • تقسيم المناطق

تشكل المناطق المعدنية والجيوكيميائية أدلة قيمة في استكشاف المعادن. أنها تكشف عن أدلة خفية لبعض العناصر الكيميائية المؤشرة أو تراكمات المعادن الخام. يحدث تقسيم المناطق على المستوى الإقليمي أو الجسم الخام. يرتبط تقسيم المناطق الإقليمية إلى المقاطعات المعدنية؛ يتم ملاحظة تقسيم المناطق في المناطق التي بها عدة مناجم؛ يعتبر تقسيم الجسم الخام خاصًا بنوع رواسب محدد وهو أكثر أهمية في التنقيب عن المعادن. تتجلى ترتيبات مناطق الجسم الخام في ثلاثة أبعاد. إن تحديدها بشكل صحيح مفيد بشكل خاص في التخطيط الأفقي أو الرأسي للمناجم، وفي اختيار أهداف الاستكشاف الجديدة، وفي قرارات إنهاء برامج الحفر وتطوير المناجم، أو كليهما. تم التعرف على أنماط تقسيم المناطق المعممة لمعظم أنواع رواسب الخام؛ ومع ذلك، كل حالة مختلفة. تتميز معظم مناطق أجسام الخام بوجود عدة نبضات من التمعدن، والتي غالبًا ما تسبب أنماطًا من المناطق المتداخلة. ويجب تحديدها وتسجيلها

ورسم خرائط لها بشكل صحيح بمجرد توفر المعلومات. ليس من غير المألوف اتباع نمطين أو أكثر من أنماط تقسيم المناطق في إنتاج المناجم. يوضح الشكل الآتي نمط تقسيم مثالي لرواسب عروق الذهب والكوارتز الحرارية المائية. غالبًا ما يرتبط التقسيم إلى مناطق بالتسلسلات الأصلية، وبالتالي يتأثر بشكل كبير بالتغيرات في درجة الحرارة والضغط، وبتركيب واستقرار سوائل التمعدن. المفاهيم معروفة جيدًا ويتم الاستشهاد بها بكثرة في الأدبيات التقنية. من بين أدلة تقسيم المناطق الدقيقة المذكورة سابقًا المؤشرات الجيوكيميائية. يعكس تقسيم المناطق الجيوكيميائية العناصر الموجودة في محاليل التمعدن، والتي تعتمد على حركتها النسبية في البيئة الصخرية وعبرها.

| السطح | Au | As | Bi | Ag | Pb | Sb | Cu | Be | Mo | Co | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sb, Hg | | | | | | | | | | | |
| As | | | | | | | | | | | |
| Ag, Au | ← مركز العرق أو الانبعاث | | | | | | | | | | |
| Barren | | | | | | | | | | | |
| Ag, Mn | | | | | | | | | | | |
| Pb | | | | | | | | | | | |
| Zn | غير نظامية Se وTe القريبة من الأصل | | | | | | | | | | |
| Cu | | | | | | | | | | | |
| Bi | TI موجودة في جميع المناسبات | | | | | | | | | | |
| Mo, W | | | | | | | | | | | |
| Au, Ag | المسافات متغيرة | | | | | | | | | | |
| Co | | | | | | | | | | | |
| Be | قد يكون هناك تصغير أو تداخل | | | | | | | | | | |
| Barren | | | | | | | | | | | |

تقسيم المناطق الرأسية والجانبية المثالية في عروق الذهب والكوارتز (Lee-Moreno, 2011)

## • تغيير الجدار الصخري

يرتبط تغير الجدار الصخري بعمل السوائل الحرارية المائية في عمليات إعادة التعبئة غير الأصلية وارتفاع درجة الحرارة، والتي يتم ملاحظتها في أغلب الأحيان في الصخور الفلسية. وقد يكون أيضًا ناجمًا عن بعض العمليات المتحولة أو التحويرية. قد تؤدي تجوية الرواسب الناتئة إلى «تغير الصخور القوية» أيضًا، بسبب أكسدة المعادن الغنية بالحديد وبعض الأرجيلة. جميع عمليات التغيير هي نتيجة للتبادل الكيميائي والتعديل المعدني. توجد هالات التغيير عادةً في صفائف نطاقية تنبثق من قنوات الدوران المتمعدنة إلى الخارج إلى صخور الريف الفتية. غالبًا ما تمتد إلى الخارج عدة أضعاف محيط رواسب الخام، مما يسهل اكتشافها. ومع ذلك، قد تكون أيضًا ذات أبعاد محدودة جدًا، اعتمادًا على تفاعلية الصخور ونفاذيتها، وكمية السائل المتداول.

**مجموعات التغيير الأكثر شيوعًا هي كما يأتي:**

- يتضمن البوتاسيوم إدخال K-spar ومعادن البوتاسيوم الأخرى.
- يتكون السيريسيتيك، والذي يشار إليه أيضًا باسم فيليك Phyllic، من وجود سيليكات البوتاسيوم الميكية المشتقة من معادن الفلسيات الأولية.
- يتم تمثيل الأرجيليك بواسطة الكاولينيت والمونتموريلونيت بعد البلاجيوجلاز والأمفيبولات. الأرجيليك المتقدم هو أحد الاختلافات التي تنتج عن الترشيح الحمضي القوي.
- يتضمن السيليسيك الحقن غير الطبيعي للمحاليل السيليسية (والوجود شبه العالمي للكوارتز الحر).
- يتم إنتاج البروبيليتيك عن طريق تكوين ضغط ودرجة حرارة منخفضة من الإيبيدوت والكلوريت والكالسيت.
- تؤدي أكسدة الحديد، على الرغم من أنها ليست نتيجة للتغير الحراري المائي

بشكل صحيح، إلى التحلل أو التغيير الشائع للمعادن المحتوية على الحديد. هذه واضحة جدًا وتستخدم على نطاق واسع في استكشاف المعادن. وقد تطورت هذه الظاهرة إلى دراسة الأغطية المتسربة والأكسدة (أو الجوسان)، والتي توفر، في تجمعاتها المتنوعة، أدلة ممتازة على وجود رواسب الخام ومصادرها.

كل عمليات التغيير هذه تنتج تغيرات لونية في الصخور الأصلية. من الشائع أن يكون اللون الأبيض إلى المحمر والأصفر الساطع، ويمر عبر ظلال من اللون الأخضر والوردي. كلهم يشكلون أدلة أولية للمستكشف.

## • دراسات تضمـــين الســـوائل

في نماذج الترسيب المثالية للعديد من رواسب الخام، تصبح درجة الحرارة والتقسيم الكيميائي للمناطق مفيدة في فهم التمعدن وأصله. يمكن تحديد هذه الميزات من خلال دراسة شوائب السوائل، خاصة أثناء حفر التنقيب، أو عندما تتآكل الأجزاء العلوية من جسم خام، أو عندما تؤدي الحركات الهيكلية أو التكتونية إلى تعديل موضع الجسم الخام الأصلي. تعتمد دراسات تضمين السوائل على جمع البلورات المعدنية الشفافة التي تحوي على غازات و/أو سوائل محاصرة في فجوات وقت الترسيب. تتم ملاحظة الفجوات تحت المجهر ثم يتم إخضاعها للتلاعب بدرجة الحرارة عن طريق مراحل تسخين وتبريد خاصة لتحديد درجة حرارة التجانس. يمكن تحديد تركيباتها الكيميائية من خلال إحدى التقنيات التحليلية العديدة، مثل قياس الطيف الليزري أو المسبار الإلكتروني الدقيق.

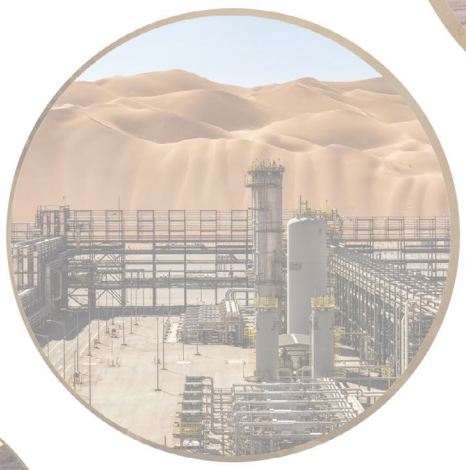
## • الدراسات النظائرية

تم استخدام بعض النظائر لدراسة مصادر وتركيبات سوائل التمعدن في العديد من الرواسب الخام ولتحديد التاريخ الجيولوجي لها. تتم دراسة نظائر الهيدروجين والكربون والأكسجين والكبريت والسترونتيوم والرصاص بشكل شائع. تم التمييز بنجاح بين الحزم القاحلة والمنتجة والبركانية من خلال هذه الطريقة. يتم إجراء الدراسات النظائرية في الغالب كبحث أكاديمي بسبب نقص المعرفة والخبرة في هذه التقنية في صناعة التعدين؛ ومع ذلك، فإن أهميتها في التنقيب عن المعادن أصبحت أكثر مع نشر المزيد من البيانات التجريبية (وتفسيرها).

## • هندسة المعادن

تعد هندسة المعادن تقنية حديثة نسبيًا في التنقيب عن المعادن. وهي تعتمد على قياسات معدنية وكيميائية كمية دقيقة باستخدام مجسات إلكترونية دقيقة أو أدوات مماثلة، تليها تحليلات إحصائية لتحديد المتغيرات في الخصائص الفيزيائية والمعدنية والجيوكيميائية للاحتمالات المعدنية. يتم استخدام المعلومات التي تم الحصول عليها في جميع مراحل الاستكشاف، وكذلك في تطوير رواسب الخام والاحتياطيات وتقييم الموارد ومعالجة المعادن.

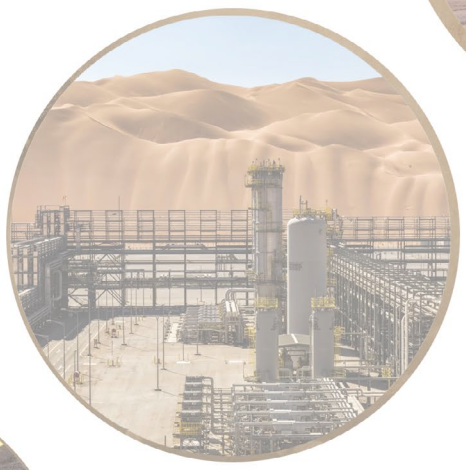
يمكن تطبيق علم المعادن الجيولوجي على عينات الرواسب المتدفقة، أو النتوءات المعدنية، أو قلوب الحفر، أو حتى في توقفات المناجم الإنتاجية. يمكن اقتراح نماذج رواسب الخام، ويمكن بعد ذلك تصميم استراتيجيات لمزيد من الاستكشاف. كما أنه مفيد جدًا في نمذجة الأجسام الخام، والتنبؤ بالامتدادات المحتملة وتحديد جودة التراكمات المعدنية (Lee-Moreno, 2011) .



# الفصل الثالث

# تقنيات ومراحل التعديـــــن

| | |
|---|---|
| التعدين في العصر الحديث | عمليات ومراحل التعدين |
| تقنيـــات التعـديـــن | التعديــن الحيوي |
| تقدير المـوارد المعدنيـــة | التعديــن في البحار |
| التعدين في الفضاء الخارجي | ســـلامة المناجـــم |



# تقنيات ومراحل التعديـــــن

## مُقَدِّمَة

تُعدّ عمليّة التعدين من أكثر وأخطر العمليّات التي قد تحدث على سطح الأرض؛ لما لها من دور كبير في حدوث تلوّث هوائي وجويّ وحتى تلوّث أرضي. لها ضرر كبير على الشعوب والسُّكان المُهتمون بالطبيعة والحياة البريّة. تؤدِّي إلى انتشار الأمراض بشكل كبير كضيق النفس والربو وغيرها العديد من أمراض الجهاز التنفسيّ. لها دور كبير في حدوث تغيُّر مُناخيّ. تؤدِّي إلى إرغام السكان على الهجرة من أماكنهم أو بلدهم واللجوء إلى أماكن أنظف وأفضل. أحرزت تكنولوجيا استخراج المعادن قفزةً جديدةً إلى الأمام في أواخر العصور الوسطى، عندما بدأ المنقبون في استخدام المتفجرات لتحطيم الصخور الضخمة، فقد وصل البارود الأسود (Black Powder) من الغرب (على الأرجح من الصين)، ثم استبدل البارود الأسود بالديناميت في منتصف القرن التاسع عشر، بالتزامن مع حدوث تطورات في الآلات ذات المحرك، مثل: المثقاب (Drill) والرافعات. (Lifts) والمضخات التي تعمل بالبخار.

دفعت الثورة الصناعية بالمزيد من التحسينات في مُعدات التفجير والتنقيب، كالمثاقب الميكانيكية التي تعمل بالمكابس ثم بالهواء المضغوط، مما رفع بشكل ملحوظ كلاً من قدرة وكفاءة العملية في الصخور القاسية. كما حدثت أيضاً تحسيناتٌ في عمليات التعدين الأخرى. تم استبدال التحميل والرفع اليدوي بالناقلات الكهربية مثل عربات المناجم، ولقد حلت مضخات البخار مشكلة سريان الماء، كما استبدلت المصابيح المضاءة بالشموع والفتيل بمصابيح الغاز، وأخيراً بمصابيحَ تعمل بالبطارية، ولقد أسهمت المَكْنَنة والتكنولوجيا الحديثة في ظهور تطورات هائلة في تقنيات التعدين.

وخلال هذا القرن تطورت تقنيات التعدين بصورةٍ مستمرة؛ فعلى سبيل المثال باستخدام تقنيات التعدين السطحي تمكنت العديد من عمليات التنقيب من استخراج ما يزيد على 85 % من المعادن و 98 % من الخامات المعدنية بدون حفر الآبار أو تعريض حياة العُمَّال للخطر كما استخدمت آلاتٌ مطورةٌ جديدةٌ للطحن والتكسير، وفي مقدورها أيضاً استخراج المعادن من الأرض بأقل طاقةٍ ممكنةٍ عما سبق. ولا يزال المنقبون يستخدمون المعدات الثقيلة مثل المتفجرات، الشاحنات، المثاقب، والبلدوزرات وخاصةً إذا ما توجب عليهم الحفر عميقاً في الأرض، ولقد أتاحت التقدمات التكنولوجية عملية الحفر بدقةٍ أكثر وبضررٍ أقل للبيئة المحيطة. يمكن الاعتماد على آلاتٍ ذات كفاءةٍ مرتفعةٍ لتقليل معدل استهلاك الطاقة، فضلاً عن تحسين وزيادة أعداد المعادن المستخرجة من المناجم.

**أما التعديـن** فهو استخراج الموارد المعدنية المختلفة من صخور القشرة الأرضية، بغض النظر عن طبيعة المعدن الموجود هل هو فلزي أو لا فلزي. ومن الخصائص التي تميز حرفة التعدين والمناجم عن الحرف الأخرى كثرة نفقاتها وتعدد مفرداتها، إذ توجد معظم الموارد المعدنية تحت سطح الأرض بعيداً عن متناول يد الإنسان، وتشمل المواد الخام التي نحصل عليها من التعدين: معادن – فحم – بترول الطفل الصفحي (صخر طيني) – الأحجار الكريمة – الأحجار الكلسية (الجيرية) – الطباشير – الأملاح الصخرية – ملح القلي (بوتاس) – الحصى – الصلصال.

# آلات التعدين عنـد العـــرب

صنف لنا محمد بن أحمد بن يوسف الخوارزمي (توفي 387هـ / 997م) ما كان يعرفه من آلات تستخدم في مجال المعادن والتعدين عند العرب حتى القرن العاشر للميلاد. حيث قال: «ومن آلاتهم آلات معروفة عند الصاغة وغيرهم من أصحاب المهن كالكور والبوطق والماشق والراط والزق الذي ينفخ وهذه كلها آلات التذويب والسبك. والراط هو الذي يفرغ فيه الجسد المذاب من فضة أو ذهب أو غيرهما ويسمى: المسبكة وهي من حديد كأنها شق قصبة.

**الموقد**: شبه تنور لهم.

**الطابستان**: كانون شبه كانون القلائين.

**نافخ نفسه**: تنور يكون له أسفل على ثلاث قوائم مثقب الحيطان والقرار، وله دكان من طين يوقد ويوضع عليه الدواء في كوزٍ مطيّن في موضع تصفقه الريح.

**الدرج**: شبه درج من طين يوقد عليه ويعالج به الأجساد» (الخوارزمي، 1989م).

وأوعية صهر المعادن الصغيرة التي تستخدم من قبل الصاغة هي: **البوطة والبودقة والبوتقة**، أما وعاء صهر المعادن الكبيرة فكان يسمى **بالمصهر** (موسى، 1990م).

# عمليـــات التعديـــن

مارس العرب عدداً من العمليات لمعالجة الخامات واستخراج المعادن منها. نورد فيما يأتي تعريفاً بها:

- **«التقطير»:** هو مثل صنعة ماء الورد وهو أن يوضع الشيء في القرع ويوقد تحته فيصعد ماؤه إلى الأنبيق وينزل إلى القابلة ويجتمع فيه.
- **التصعيد:** شبيه بالتقطير إلا أنه أكثر ما يستعمل في الأشياء اليابسة.
- **الترجيم:** جنس من التصعيد.
- **التحليل:** أن تجعل المنعقدات مثل الماء.
- **المعقـــد:** أن يوضع في قرع ويوقد تحته حتى يجمد ويعود حجراً.
- **التشوية:** أن يسقي بعض العقاقير مياهاً، ثم يوضع في قارورة أو قدح مطين، ويعلق بآخر ويشد رأس القارورة ويجعل في نار إلى أن يشتوي.
- **التشميع:** تليين الشيء وتصييره كالشمع.
- **التصدئة:** من الصدأ مثل ما يعمل في صنعة الزنجار.
- **التكليس:** أن يجعل جسد في كيزان مطينة ويجعل في النار حتى يصير مثل الدقيق.
- **التصويل:** أن يجعل الشيء الذي يرسب في الرطوبات طافياً. وذلك أن يصير مثل الهباء حتى يصول على الماء والشيء يكلس ثم يصوّل.
- **الألغـــام:** أن يسحق جسد ثم يخلط مع زئبق يقال: ألغمته بالزئبق. والنغم.
- **الإقامـــة:** أن يصير الشيء صبوراً على النار لا يحترق.
- **طين الحكمة:** أن يخمر طين حر ويجعل فيه دقاق السرجين وشيء من شعر الدواب المقطع.
- **ملح الإكسير:** هو الدواء الذي إذا طبخ به الجسد المذاب جعله ذهباً أو فضة أو غيره إلى البياض أو الصفرة» (الخوارزمي، 1989م).

# مراحـــل التعديـــن

يمر الإنتاج المعدني بعدة مراحل تشمل مرحلة البحث والتنقيب، وهي مرحلة كثيرة التكاليف، ونتائجها غير مضمونة دائماً، ومرحلة الاستعداد للإنتاج، ومرحلة استخراج المعادن، ومرحلة إعداد المعادن وتجهيزها لنقلها إلى الأسواق ثم إلى التصنيع. يمكن أن يحدث التعدين على السطح أو تحت الأرض. تحدد البيئة ونوع المواد الملغومة شكل التعدين المطلوب والمعدات المستخدمة. لكل من التعدين السطحي والجوفي أربع خطوات رئيسية:

- **الاستخراج**: يشمل الحفر أو التفجير أو الحفر لإزالة المواد من موقع المنجم.
- **الفرز والتحميل**: ويشمل ذلك فرز المواد وتحميلها إما للذهاب إلى منطقة النفايات أو موقع المعالجة والصهر لتحرير المعادن من المعادن التي تحتوي عليها.
- **المعالجة**: تتضمن طحن، وفصل، وسحق، وتكرير، وصهر خام المعادن أو غيرها من السلع في مصنع خارج الموقع لتحويلها إلى منتجات نهائية.
- **إغلاق المنجم**: هو الخطوة الأخيرة في دورة التعدين. يؤدي التعدين في النهاية إلى استنفاد المواد الغنية بالمعادن التي يمكن إزالتها اقتصادياً في منجم معين. عندما لم يعد من الممكن إجراء التعدين بشكل مربح، سيتم إغلاق المنجم والمرافق ذات الصلة المستخدمة في الإثراء أو الصهر. يشمل الإغلاق العديد من الأنشطة التي يتم إجراؤها على وجه التحديد لمنع أو تخفيف الآثار البيئية والاجتماعية غير المرغوب فيها.

يتم التعدين أو حفر المناجم بواسطة الحفر المكشوفة على سطح الأرض، أو بالحفر العميق داخل الأرض لاستغلال معادنها. وتتوقف طرق تنجيم أو تعدين الخامات المعدنية على الطبيعة الجيولوجية للمنطقة بطريقتين:

- طريقة التعدين المفتوح (المناجم السطحية)
- طريقة التعدين تحت السطحي (المناجم تحت السطحية)

وفي العادة يبدأ التعدين بعد انتهاء أعمال التنقيب الجيولوجي والجيوكيميائي والجيوفيزيائي على رواسب الخامات المعدنية، وذلك بغرض استخراجها واستثمارها وتصنيعها.

**وهناك عدة عوامل مؤثرة في عمليات التعدين أهمها:**

- قُرْب الخامات المعدنية من سطح الأرض أو بُعْدها عنه.
- نسبة المعدن في الخام المعدني، فكلما زادت هذه النسبة زادت الأرباح المتوقعة.
- الموقع الجغرافي للمناجم، ويشمل ذلك سهولة أو صعوبة الوصول إليها، إضافة إلى اقتراب مناطق التعدين من طرق التجارة.
- وجود وسائل النقل المتطورة مثل القطارات لنقل الخامات المعدنية لتصنيعها أو استثمارها.
- التقدم التقني اللازم في عمليات التعدين، وتحويل الخامات المعدنية بطريقة جيدة ومناسبة.

دورة
حيـــــاة
التعدين
1. الاستكشاف
2. التصميم
3. التشييد
4. الاستخلاص
5. المعالجة
6. الخدمات الهندسية والصيانة
7. القفل والعناية اللاحقة

# تقنيـــات التعديـــــن

هناك أربع طرقٍ رئيسيةٍ للتعدين؛ هي التعدين الجوفي، وتعدين السطح المفتوح (الحفرة)، والتعدين الموضعي، والتعدين بغسل الراسب. إنّ التنقيب الجوفي هو الأغلى ثمناً وغالباً ما يستخدم للوصول إلى المستودعات الأعمق، وعادةً ما يُستخدم التعدين السطحي للمستودعات الأكثر ضحالةً وذي القيمة الاقتصادية الأقل. تستخدم طريقة التعدين الغريني بغسل الراسب Placer Mining عند التنقيب في قنوات الأنهار، رمال الشاطئ، أو بيئاتٍ أخرى لغربلة وفرز المعادن الثمينة من الرواسب كالذهب والفضَّة والقصدير ومن الممكن استخراج بعض من الأحجـــار الكريمـــة كالياقوت والزُمرّد،، بينما يستخدم التعدين الموضعي In-Situ Mining بصورةٍ أساسيةٍ في استخراج معدن اليورانيوم، وتتضمن العملية تذويب المورد المعدني الموجود، ثم إجراء المعالجات اللازمة على السطح عن طريق حقن محلول يذيب المعدن في موقعه الأصلي بدون تحريك الصخرة من الأرض؛ لذا يسمى بالتعدين الموضعي.

## • التعديـــن السطحـــي Surface Mining

تُعتبر هذه الطريقة من أكثر الطرق شيوعاً واستخداماً في استخلاص المعدن وأكثر فعالية من حيث التكلفة حيث يتم استخراج ما يقرب من ثلثي المعادن الصلبة في العالم من خلال التعدين السطحي. يتم استخراج المعادن السطحي عبر إزالة وتعرية الغطاء النباتي، والأوساخ، وإذا استلزم الأمر نقوم بإزالة طبقاتٍ من صخر الأديم (Bedrock) لكي نصل إلى مستودعات الخام المدفونة. المعادنٍ الشائعة المستخرجة باستخدام التعدين السطحي هي من أكثر المعادن التي يتم تعدينها بما في ذلك الفحم والحديد والبوكسيت. تشمل تقنيات التعدين السطحي؛ تعدين الحفرة المفتوحة (Open-pit Mining)، الذي يعني استخراج

المـواد مـن حفـرةٍ أو منجـم مفتـوح في سـطح الأرض، تشـبه هـذه التقنيـة عمليـة الحفـر إلـى حدٍ كبيـرٍ، إلّا أن الأولـى تشـير إلـى الرمـال، الحجـر والطمـي، يشـمل التعديـن بالتعريـة إزالـة الطبقـات السـطحية للكشـف عـن الخـام الرابـض بالأسـفل، تُصاحـب إزالـة قمـة الجبـل علـى نحـوٍ شـائعٍ عمليـة اسـتخراج الفحـم، حيـث تتضمـن العمليـة إزالـة قمـة الجبـل للوصـول إلـى مسـتودعات الخـام العميقـة.

نموذج لأحد المناجم باستخدام تقنية تعدين الحفرة المفتوحة Open-pit Mining

## تشمل تقنيات التعدين السطحي تعدين الحفرة المفتوحة Open-pit Mining

### ♦ التعدين في مناجم عالية الجدار Highwall Mining

التعدين في مناجمَ عالية الجدار هو إحدى طرق التعدين السطحي الذي طُوِّر عن التعدين بالمثقاب (Auger Mining).

### ♦ التعدين الجوفي Underground Mining

يتضمن التعدين الجوفي أو تحت السطحي حفراً في أنفاق وآبارٍ أرضيةٍ بصورةٍ أساسيةٍ للوصول إلى الخامات، ونقلها إلى السطح فضلاً عن التخلص من النفايات الصخرية. يمكن تصنيف استخراج المعادن الجوفي طبقاً لنوع الآبار المستخدمة، وطريقة الاستخلاص أو التقنية المتبعة للوصول إلى المنجم. يستخدم التعدين الجانبي (Drift Mining) أنفاقاً ذات مداخلَ أفقيةٍ، كما تُستخدم الآبار ذات المنافذ المنحدرة في التعدين المائل، ويستخدم التعدين الآباري آباراً ذات منافذ رأسية، ويتطلب التعدين تقنياتٍ مختلفةً لكلٍّ من التكوينات الصخرية الصلبة واللدنة. المعادن الشائعة المستخرجة باستخدام التعدين تحت الأرض تشمل الذهب والرصاص والفضة.

يعتبر منجم El Teniente في تشيلي من أكبر مناجم النحاس تحت الأرض في العالم وسادس أكبر منجم للنحاس من حيث الحجم الاحتياطي

# التعديــن الحيـــوي Biomining

التعدين الحيوي Biomining هو عملية استخدام الكائنات الحية الدقيقة (الميكروبات) لاستخراج المعادن ذات الأهمية الاقتصادية من خامات الصخور أو نفايات المناجم. يمكن أيضاً استخدام تقنيات التعدين الأحيائي لتنظيف المواقع الملوثة بالمعادن. عادة ما ترتبط المعادن الثمينة بالمعادن الصلبة. يمكن لبعض الميكروبات أكسدة تلك المعادن، مما يسمح لها بالذوبان في الماء. هذه هي العملية الأساسية وراء معظم التعدين الحيوي، والتي تُستخدم للمعادن التي يمكن استعادتها بسهولة أكبر عند الذوبان منها من الصخور الصلبة. تستخدم تقنية تعدين أحيائي مختلفة، للمعادن التي لا تذوبها الميكروبات، الميكروبات لتفكيك المعادن المحيطة، مما يسهل استعادة المعدن المعني مباشرة من الصخور المتبقية.

## ما هي المعادن التي يتم تشكيلها حيويا حالياً؟

تستهدف معظم عمليات التعدين الأحيائي الحالية المعادن الثمينة، مثل: النحاس واليورانيوم والنيكل والذهب، التي توجد عادة في المعادن الكبريتية (الحاملة للكبريت). الميكروبات جيدة بشكل خاص في أكسدة المعادن الكبريتية، وتحويل المعادن، مثل: الحديد والنحاس إلى أشكال يمكن أن تذوب بسهولة أكبر. لا يتم إذابة المعادن الأخرى، مثل الذهب، بشكل مباشر من خلال هذه العملية الميكروبية، ولكنها أصبحت متاحة بشكل أكبر لتقنيات التعدين التقليدية لأن المعادن المحيطة بهذه المعادن يتم إذابتها وإزالتها عن طريق العمليات الميكروبية. عندما يتم إذابة المعدن المعني مباشرة، تسمى عملية المعالجة الحيوية «التبييض الحيوي»، وعندما يصبح المعدن محل الاهتمام أكثر سهولة في الوصول إليه أو «إثرائه» في المادة المتروكة، يطلق عليه «الأكسدة الحيوية». تتضمن كلتا العمليتين

تفاعلات جرثومية يمكن أن تحدث في أي مكان تحدث فيه الميكروبات والصخور والعناصر الغذائية الضرورية، مثل الأكسجين، معاً.

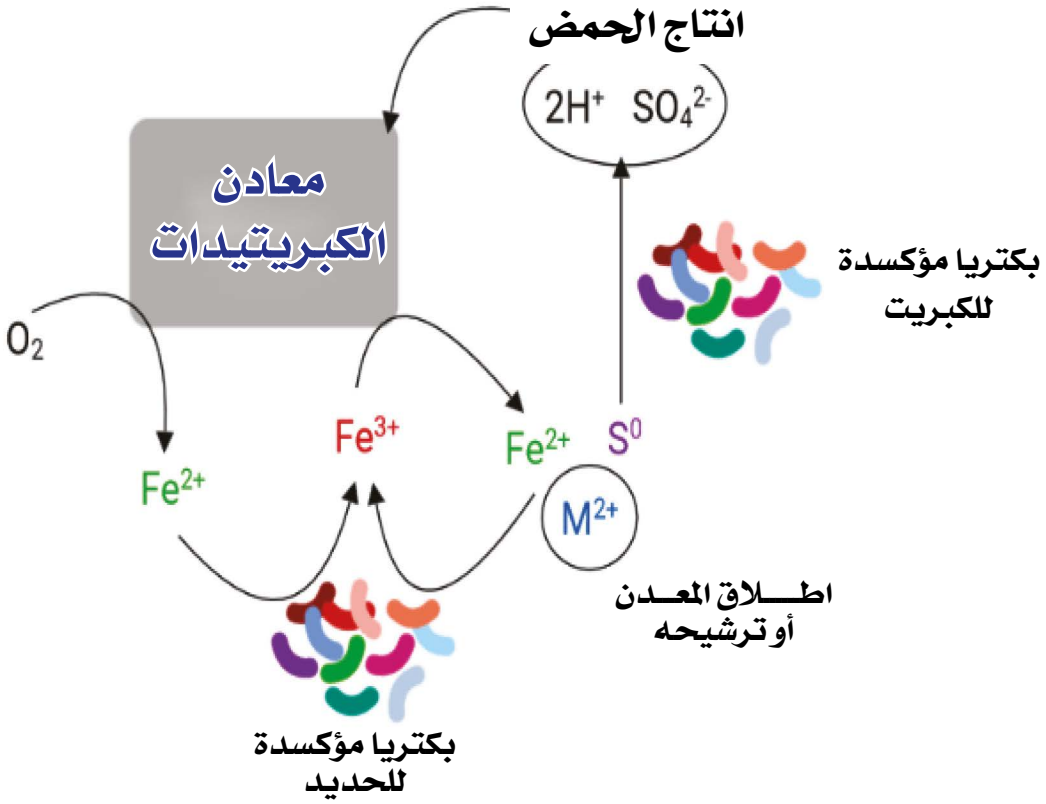
## العمليات الأكثر شيوعاً المستخدمة في التعدين الحيوي هي:

- **ترشيح الكومة:** يتم نقل المواد المستخرجة حديثاً مباشرة إلى أكوام يتم بعد ذلك تبيضها بيولوجياً.
- **ترشيح التفريغ:** يتم وضع خام منخفض القيمة أو نفايات صخرية في حفرة محكمة الغلق، ثم يتم تقشيرها بيولوجياً لإزالة المزيد من المعادن القيمة من كومة النفايات.
- **الترشيح المهيج:** يتم وضع الصخور المكسرة في وعاء كبير يتم اهتزازه لتوزيع الميكروبات والمواد بالتساوي وتسريع عملية التبييض البيولوجي.

**أما التبييض البيولوجي** Bioleaching هو طريقة لاستخراج المعادن من خامها باستخدام الكائنات الحية مثل البكتيريا؛ لذلك فإن هذه التقنية أكثر نظافة وصديقة للبيئة من طريقة ترشيح الكومة النموذجية التي تستخدم السيانيد. هذه الطريقة مهمة للغاية في استخراج المعادن، مثل: النحاس والزنك والرصاص والزرنيخ والأنتيمون والنيكل، إلخ. ومن الأمثلة الشائعة ترشيح البايرايت المعدني. تتضمن هذه العملية أنواعاً مختلفة من البكتيريا المؤكسدة للحديد والكبريت. بشكل عام، تتضمن عملية التبييض الأحيائي خطوة بدء يتم فيها استخدام أيونات الحديديك لأكسدة خام المعدن، هنا يتم اختزال أيونات الحديديك إلى أيونات حديدية. هذه الخطوة لا تشمل الميكروبات. لذلك، يتم استخدام البكتيريا لمزيد من أكسدة خام المعدن. هناك، تستخدم البكتيريا لأكسدة الكبريت والحديد في خام المعدن.

عموماً **التعدين الحيوي والتبييض البيولوجي** تقنيتان تستخدم لاستخراج المعادن من خامها عن طريق الكائنات الحية. يتمثل الاختلاف الرئيسي بين التعدين الحيوي والتبييض البيولوجي في أن التعدين الحيوي هو تقنية استخدام بدائيات النوى Prokaryotes أو الفطريات Fungi لاستخراج المعادن من المعادن، في حين أن التبييض الحيوي هو تقنية استخدام البكتيريا Bacteria لاستخراج المعادن من المعادن.

استخدام تقنية التعدين الحيوي لاستخراج المعادن ذات الأهمية الاقتصادية من خامات الصخور




مخطط التعدين الحيوي: تفاعلات التبييض البيولوجي والأكسدة الحيوية وهما أسماء العمليات التي تحدث في نظام المعالجة الحيوية وتحدث كلتا الطريقتين معاً

# تأثير عمليات التعدين على البيئة

- **إزالة الغطاء النباتي:** تتسبب عمليات التعدين في تدمير مساحات شاسعة من الغطاء النباتي.
- **فقدان التنوع البيولوجي:** نتيجة إزالة الغطاء النباتي يؤدي إلى فقدان الكثير من الكائنات الحية.
- **التلوث:** جزء من المخلفات في التربة يجعلها غير صالحة للزراعة.
- **تأثير الماء:** تتسرب معظم الكيماويات مثل الزئبق وحمض الكبريتيك والزرنيخ إلى المياه الأرضية مسببة تلوثاً مختلطة بمياه التربة.
- **فقدان الحياة المائية:** نتيجة اندماج الكيماويات السامة يؤدي إلى فقدان النباتات والحيوانات التي تعيش في الماء.
- **انتشار الأمراض:** نتيجة تجميع المخلفات في المياه الراكدة.

## أولاً : أثر التعدين على جودة الهواء

### ■ الانبعاثات الضارة

زادت نسبة الانبعاثات الضارة حتى وصلت نسبة ثاني أكسيد الكربون نحو 50 % من إجمالي الغازات المنبعثة التي تنتج من استهلاك كميات كبيرة من الوقود العضوي مثل الفحم والغاز الطبيعي. أسهم غاز الميثان في زيادة الحرارة، حيث تتمثل جوهر طبيعية في الاحتفاظ بالحرارة. أكاسيد النيتروجين التي تنتج من حرق الوقود العضوي وتضر النباتات من خلال عملية التمثيل الضوئي. ولا يمكن تجاهل بعض الصخور التي تحتوى على الميثان وتخزنه داخلها مثل الفحم الذي يطلقه عند تكسيره، كما أن هناك بعض الصخور مثل الحجر الرملي غير الكربوني يمكنها أن تتفاعل مع الميثان المختزن في مسام الصخور فتسمح له بالحركة بسهولة منها تحت ضغط معين.

### ب - الضوضاء:

من أشد الصفات التي لازمت التعدين وظهوره سواء أكان التعدين بشكل سطحي أم تحت الأرض. فهي تساعد في تهدد أمان وصحة عُمَّال المناجم، ويعد أكبر أثر صحي للضغط الزائد من الضوضاء هو أضعاف حاسة السمع لدى العُمَّال الذي يعملون في هذه المجالات. بالإضافة للضوضاء التي يتعرض لها الإنسان خارج المناطق الصناعية من ضوضاء المجتمع وضوضاء البيئة، وتتسم بأثرها الضعيف عن ضوضاء الأماكن الصناعية.

## ثانياً: أثر التعدين على المياه السطحية والجوفية

أسهمت عملية تجفيف المنجم على كمية المياه الجوفية المتواجدة بطريقة ملحوظة. مما أسهم في حدوث انخفاض مستوى المياه في المنجم وما يجاوره. وبالتالي يساعد في زيادة الجفاف في العيون والينابيع المحيط بتلك الأماكن. ووصل الأثر السلبي من التعدين على جودة المياه الجوفية من خلال الأعمال التعدينية المتنوعة، وأعمال الإنشاء، ونشاطات النقل، وتجفيف المياه المنجمية، وعمليات التخلص من النفايات.

## ثالثاً: آثار التعدين السلبية على الأرض

**تعرية الأرض:** متمثلة في التدهور للأراضي الزراعية الذي انعكس على النظام البيئي وأحدث خللاً في الدورة البيئية. التي تتطلب العديد من السنوات ليعود لوضعه الأصلي، وخاصة في المناطق القاحلة يصبح من الصعب علاجها. استخدام المنظفات في عمليات استصلاح الأراضي، حيث تلجأ العديد من الشركات في عملية استصلاح الأراضي والتربة. وإعادتها لوضعها الطبيعي لاستخدام المواد الكيميائية التي قد يتواجد في بعضها المنتجات الصديقة للبيئة. الحرارة والرطوبة، زيادة درجة الحرارة والهواء الرطب التي قد تصل إلى 35 درجة في المناجم تسهم في التأثير سلبي على العُمَّال وعلى الهواء وتزيد من الهواء الرطب. ففي بعض الأوقات تصل درجات الحرارة في مناجم إلى 50 درجة أسفل الأرض.

# تقدير الموارد المعدنية

يعد تقدير الموارد المعدنية من المهام الرئيسية للفرق الجيولوجية التي تقوم بتطوير وتقييم المشاريع التعدينية. بعد أن يدخل مشروع التعدين في مرحلة الإنتاج، يرث هذه المهمة فريق جيولوجيا المناجم الذي يواصل تحديد أجسام الخام. يقوم جيولوجيو المناجم مع مهندسي التعدين بتقدير احتياطيات الخام التي يتم استخلاصها من نموذج الموارد المعدنية عن طريق إضافة العوامل المعدلة (معالم التعدين والمعادن، والعوامل البيئية والاجتماعية واقتصاديات المشروع).

**يتضمن إجراء تقدير الموارد عدة خطوات:**

- يتم تعديل البيانات الأولية وإعدادها لتقدير الموارد المعدنية.
- تحليل البيانات من أجل إيجاد النهج الأمثل لنمذجة الموارد.
- تم تحديد التمعدن وتقييده في مساحة ثلاثية الأبعاد.
- يتم تقدير موارد المناطق المقيدة عن طريق الاستيفاء والاستقراء لفحوصات العينة.
- تمت مراجعة النموذج والتحقق من صحته مقابل بيانات المدخلات ومطابقتها مع إنتاج المنجم عندما يكون الأخير متاحًا.
- يتم تقدير عدم اليقين في الموارد كميًا ويتم تحديد فئات الموارد باستخدام معايير إعداد التقارير الدولية وإسنادها إلى النموذج.

منذ عام 1950م، عندما تم تطوير الأساليب الرياضياتية للإحصاء الجيولوجي لنمذجة التوزيعات المكانية للمتغيرات الإقليمية، تم تطبيقها لتقدير الموارد والاحتياطيات من الرواسب المعدنية (Krige, 1951; Matheron, 1963, 1968). حاليًا، هذا هو أسلوب التقدير الرئيسي الذي يسمح ببناء نماذج ثلاثية الأبعاد

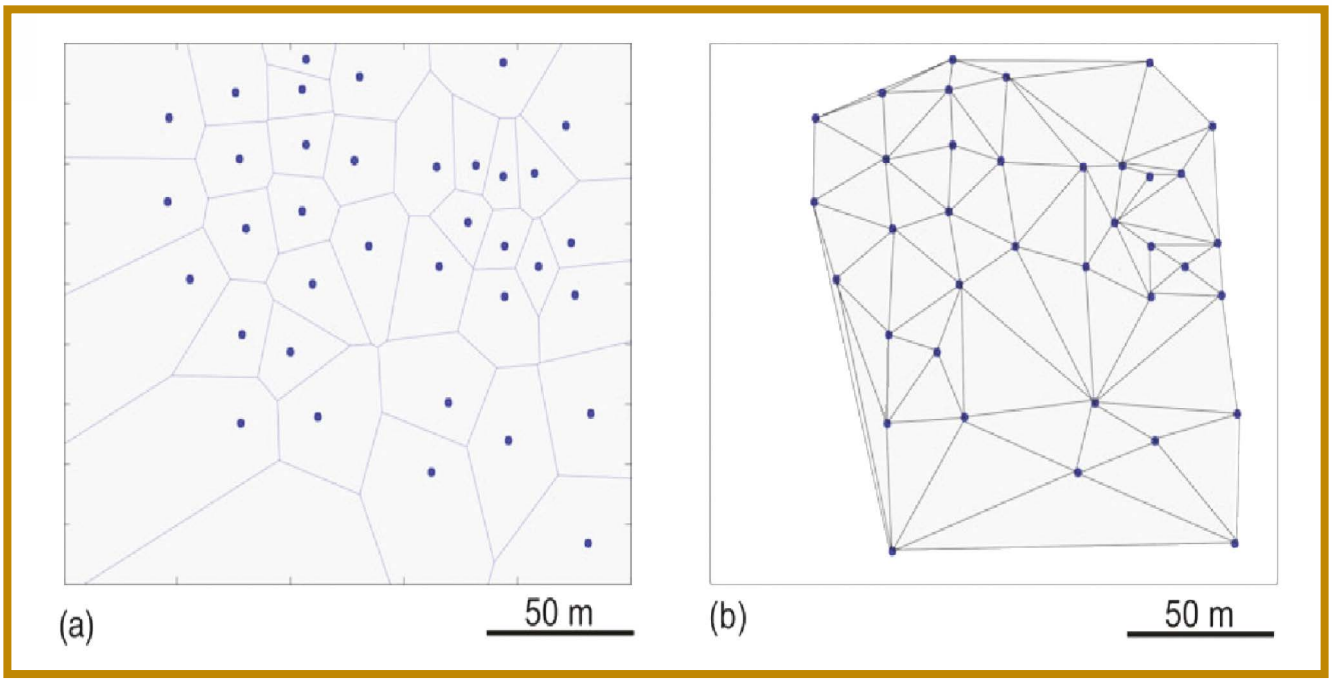
قوية ودقيقة للأجسام الخام. ومع ذلك، لم يتم التخلي عن طرق التقدير غير الجيوإحصائية، التي تم تطويرها وتنفيذها في صناعة التعدين قبل الإحصاءات الجغرافية، ولا تزال تستخدم بالتوازي مع التقنيات الجيوإحصائية.

وعلى وجه الخصوص، تعتبر هذه الأساليب مفيدة للتقييم الأولي للمشاريع قبل إشراك خبراء الإحصاء الجيولوجي. يتم أيضًا تطبيق الأساليب غير الإحصائية بشكل شائع من قبل جيولوجيي المناجم لمعالجة بيانات التحكم في الدرجة وإعداد خطط إنتاج المناجم قصيرة المدى.

هناك العديد من طرق التقدير غير الجيوإحصائية، تسمى الطرق الكلاسيكية، وأكثرها شيوعًا: المضلعات، والتثليث، والمقطعية، والتقدير بالألواح (الحجب). هناك طريقة أخرى، والتي تم وصفها هنا أيضًا وهي تقنية وزن المسافة العكسية (IDW). هذه هي التقنية الأكثر تقدمًا بين الأساليب غير الإحصائية ومنهجية تطبيقها لها أوجه تشابه كثيرة مع الكريغ العادي.

## ■ طريقة التقدير بالمضلعات

هذه الطريقة ثنائية الأبعاد المطبقة لتقدير الرواسب الجدولية. يمكن تمثيل هذه الرواسب بدقة من خلال فسيفساء مضلعات التأثير المرسومة على الخرائط أو المقاطع الطويلة للأجسام الخام (الشكل الآتي a). تُستخدم الطريقة أيضًا بشكل شائع لتقدير درجة منصات ثقب الانفجار. تتطلب طريقة التقدير المضلع إنشاء تقاطعات حفرة الحفر وتقدير الدرجة الحقيقية وسمك التقاطعات. يتم تعيين مضلع تأثير لكل تقاطع ويتم استقراء درجة وسمك التقاطع إلى المنطقة المقيدة بمضلع تأثير ثقب الحفر (الشكل الآتي a). يتم تقدير متوسط درجة الرواسب عن طريق قسمة إجمالي المعدن الموجود على مجموع السماكات التي تم تطبيعها بواسطة مضلعات التأثير.




مقارنة طرق تقدير الموارد. تشير المناطق المظللة باللون الرمادي إلى جزء المجال الذي تم فيه تقدير الموارد: (a) طريقة التقدير بالمضلعات؛ (b) طريقة التقدير بالتثليث. (Abzalov, 2016)

يتم تقدير الحمولة العالمية عن طريق إضافة حمولات المضلعات. لكن هذا الأسلوب له العديد من القيود. أحد أهم العيوب هو أن الموارد تقدر عند نقطة الدعم ومن ثم فهي دون المستوى الأمثل لتقييم مشاريع التعدين. يمكن أيضًا أن يكون استقراء تقاطع ثقب حفر واحد إلى منطقة كبيرة مقيدة بمضلع التأثير مصدرًا لأخطاء تقدير كبيرة، وهي شائعة بشكل خاص في الأجزاء المحفورة على نطاق واسع من جسم الخام وعلى طول الهوامش. وعلى الرغم من هذه القيود، لا تزال الطريقة مستخدمة لتقدير الموارد والاحتياطيات (Annels, 1991).

على وجه الخصوص، يتم استخدامها بشكل شائع للتقديرات الأولية التي يتم إجراؤها قبل مشاركة خبراء الإحصاء الجيولوجي في تقييم المشروع. ومع ذلك، فإن تطبيق طريقة المضلعات يتناقص بشكل مطرد ويتم استبدالها بتقنيات تقدير الموارد الجيوإحصائية (Goovaerts, 1997).

## ■ طريقة التقدير بالتثليث

طريقة التثليث لتقدير الموارد لديها الكثير من أوجه التشابه مع طريقة المضلعات. وهي أيضًا تقنية ثنائية الأبعاد والتي يفضل تطبيقها على الرواسب الجدولية باستخدام درجة وسمك تقاطعات ثقب الحفر. حيث تقوم الطريقة بتقسيم المجال المقدر على المثلثات التي تم إنشاؤها من خلال ربط تقاطعات ثقب الحفر المجاورة (الشكل السابق-b). تم تقدير متوسط درجة التمعدن المقيدة بالمثلث كمتوسط مرجح لطول تقاطعات ثقب الحفر التي تشكل رؤوس المثلث المدروس. يتم الحصول على حمولة التمعدن المقيدة بمثلث عن طريق ضرب متوسط السمك بمساحة المثلث وعامل الحمولة. يتم تقدير الدرجة المتوسطة العالمية على أنها درجة متوسطة للمثلثات التي تزنها مناطق المثلث. تم تقدير الحمولة العالمية من خلال جمع أوزان المثلثات في مجال الدراسة.

تتغلب طريقة التثليث جزئيًا على قيود الطريقة متعددة الأضلاع حيث يتم استقراء درجة ثقب الحفر الواحد إلى المساحات الكبيرة. تستخدم طريقة التثليث ثلاثة ثقوب حفر متجاورة لتقدير موارد المنطقة المقيدة بالمثلث مع وجود ثقوب الحفر في القمم.

يعتبر هذا التقدير أكثر موثوقية من ذلك الذي تم الحصول عليه باستخدام الطريقة متعددة الأضلاع، إلا أنه يحوي أيضًا على قيود كبيرة.

**العيوب الرئيسية لطريقة التثليث هي:**

- تعتمد نتائج التقدير على نمط التثليث الذي يتم اختياره بشكل شخصي .
- جميع تقاطعات فتحات الحفر تتلقى الوزن نفسه بغض النظر عن حجم وشكل المثلث.
- أسلوب يفتقر إلى القدرة على تنفيذ التفسير الهيكلي للرواسب. تتلقى جميع القمم الثلاثة للمثلث الوزن نفسه بشكل مستقل عن موقعها بالنسبة لكتلة الجسم الخام. تتلقى القمم الواقعة على طول كتلة الجسم الخام وزن القمم الموجودة نفسها في اتجاه الكتلة، وهو أمر غير صحيح منهجيًا ويمكن أن يؤدي إلى أخطاء جسيمة في التقدير.
- الطريقة أيضًا لا تسمح بتقدير هوامش الرواسب.

تتميز طريقة التثليث بالعديد من الميزات المشتركة مع الطريقة المضلعات، ومن ثم فهي تستخدم أيضًا لتقديرات التحكم في الدرجة باستخدام بيانات فتحات الانفجار. إن تساوي حجم فتحات الانفجار وتوزيعها حيث تتناسب الطبقات الأفقية بشكل جيد مع استخدام طريقة التثليث لتقدير احتياطيات منصات ثقب الانفجار. ومع ذلك، بسبب القيود المفروضة على تقنيات التثليث والمضلعات، التي تم شرحها أعلاه، تم استبدال هذه الأساليب بتقنيات إحصائية جغرافية. ينتج عن الأخير تقديرات أكثر دقة للتحكم في الدرجة ويوفر أيضًا تقديرًا كميًا لعدم اليقين في النموذج (Abzalov et al. 2010).

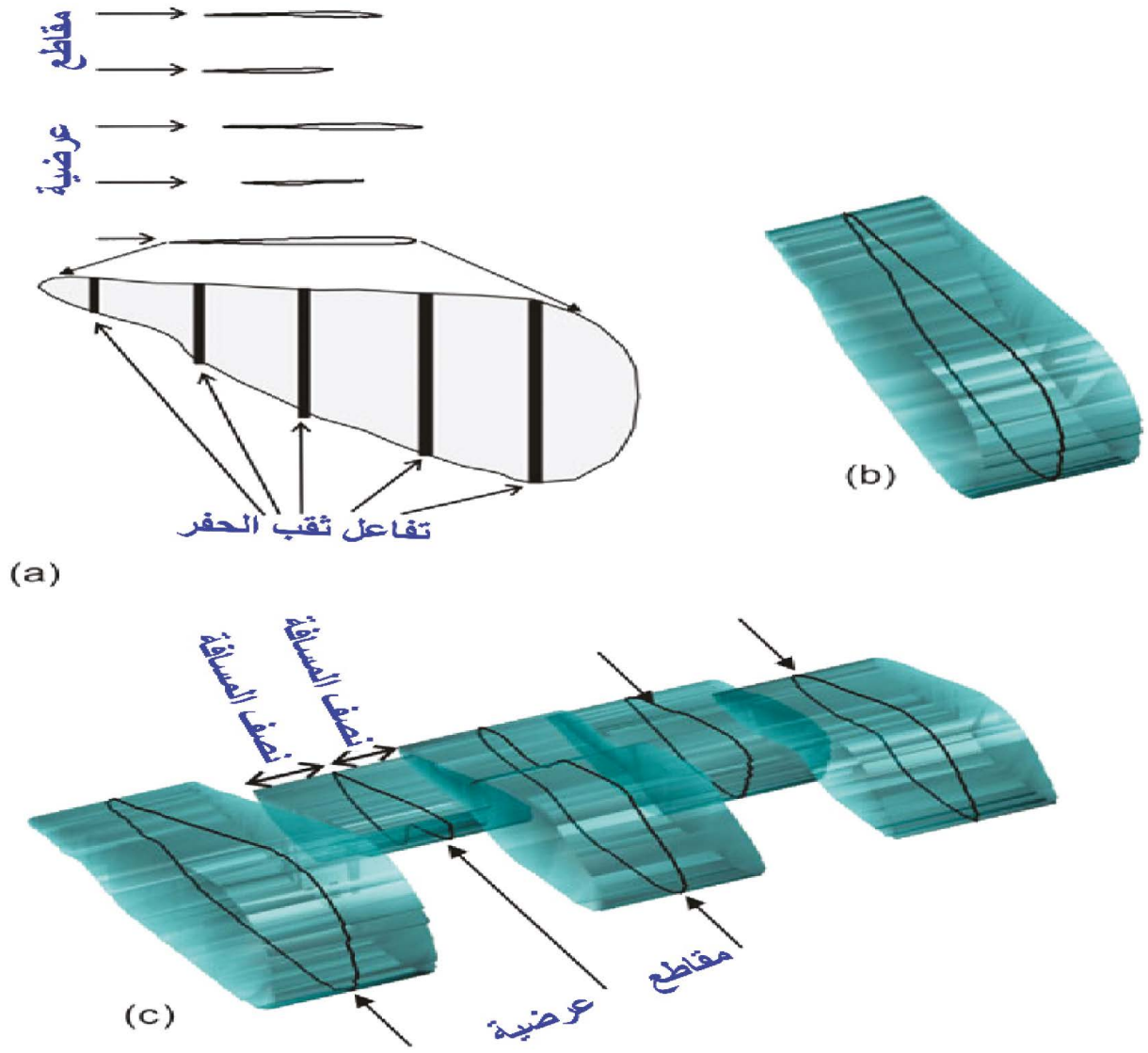
## ■ طريقة المقطع العرضي

تعتبر الطرق المضلعة والتثليثية دون المستوى الأمثل للكتل الخام المعقدة التي لا يمكن عرض شكلها بدقة على الأسطح ثنائية الأبعاد. يتم تقدير هذا التمعدن بشكل ثلاثي الأبعاد عادةً عن طريق تقييد التمعدن بواسطة الإطارات السلكية وتقدير درجة الأحجام المقيدة بواسطة التقنيات الإحصائية الجغرافية.

النهج البديل لتقدير التمعدن المعقد هو باستخدام طريقة المقطع العرضي. هذه طريقة شبه ثلاثية الأبعاد تعرض الجسم الخام على شكل كتل مستعرضة (ألواح) مكدسة. تُستخدم هذه الطريقة حاليًا في حالة عدم توفر تقنيات الإطارات السلكية، عادةً بسبب نقص المعدات، أو غير قابلة للتطبيق، بسبب الشكل المعقد جدًا وغير المنتظم للمجالات المعدنية. وعلى وجه الخصوص، تظل إحدى التقنيات الرئيسية لتقدير موارد رواسب اليورانيوم من النوع الملتف في كازاخستان (Abzalov et al. 2014). هناك إصدارات مختلفة من الطريقة المقطعية: والتي سنقوم بمراجعتها بإيجاز فيما يأتي:

### • استقراء المقاطع العرضية

يظهر إجراء التقدير باستخدام هذه الطريقة بشكل تخطيطي في الشكل الآتي ويتم شرحه أدناه.




تقديـر الموارد/الاحتياطيـات مـن خـلال اسـتقراء المقاطـع العرضيـة: (a) رسـم تخطيطـي يوضـح مبـادئ تحديـد جسـم الخـام مـن خـلال تحديـد صـورة ظليـة لـه علـى مقطـع عرضـي؛ (b) اسـتقراء المقطـع العرضـي إلـى نصـف المسافـــة بـين اجتيـــاز الحفـــر الـذي يشـــكل لوحـة المقطـع العرضـي؛ (c) بنـاء نمـوذج شـبه ثلاثـي الأبعـاد لجسـم الخـام مـن خـلال تقديمـه كألـواح مقطعيـة مكدسـة معًـا. (Abzalov, 2016)

**يتم تطبيق الطريقة على عدة خطوات:**

- يتم رسم المقاطع العرضية من خلال الممرات المحفورة ويتم تحديد محيط الجسم الخام على كل مقطع عرضي عند القطع المختار (الشكل السابق-a).
- يتم تقدير متوسط الدرجة لكل مقطع عرضي باستخدام تقنية المتوسط المرجح للطول.
- يتم استقراء محيط الجسم الخام، الذي تم تفسيره على المقطع العرضي، إلى نصف المسافة بين ممرات الحفر مما يؤدي إلى إنشاء لوحة المقطع العرضي (الشكل السابق-b).
- يتم تعيين متوسط درجة المقطع العرضي للوحة بكاملها. يتم تقدير حمولة جسم الخام في اللوحة المحددة كمنتج لمساحة جسم الخام المحدد على المقطع العرضي من خلال مسافة الاستقراء مضروبة في عامل الحمولة.
- يتم إنشاء نموذج الجسم الخام من خلال تجميع جميع الألواح المستعرضة معًا لتكوين نموذج شبه ثلاثي الأبعاد لجسم الخام (الشكل السابق-c).
- يتم تقدير الحمولة الإجمالية عن طريق إضافة حمولة الألواح المستعرضة. يتم الحصول على متوسط الدرجة عن طريق قسمة المعدن الموجود عالميًا (مجموع المعادن الموجودة في الألواح) على الحمولة الإجمالية للجسم الخام المقيد بألواح المقطع العرضي.

يمكن تطبيق استقراء شكل ودرجة الجسم الخام من المقاطع العرضية فقط على مسافات قصيرة والتي يمكن أن تختلف بين الرواسب اعتمادًا على نوع التمعدن والتنوع.

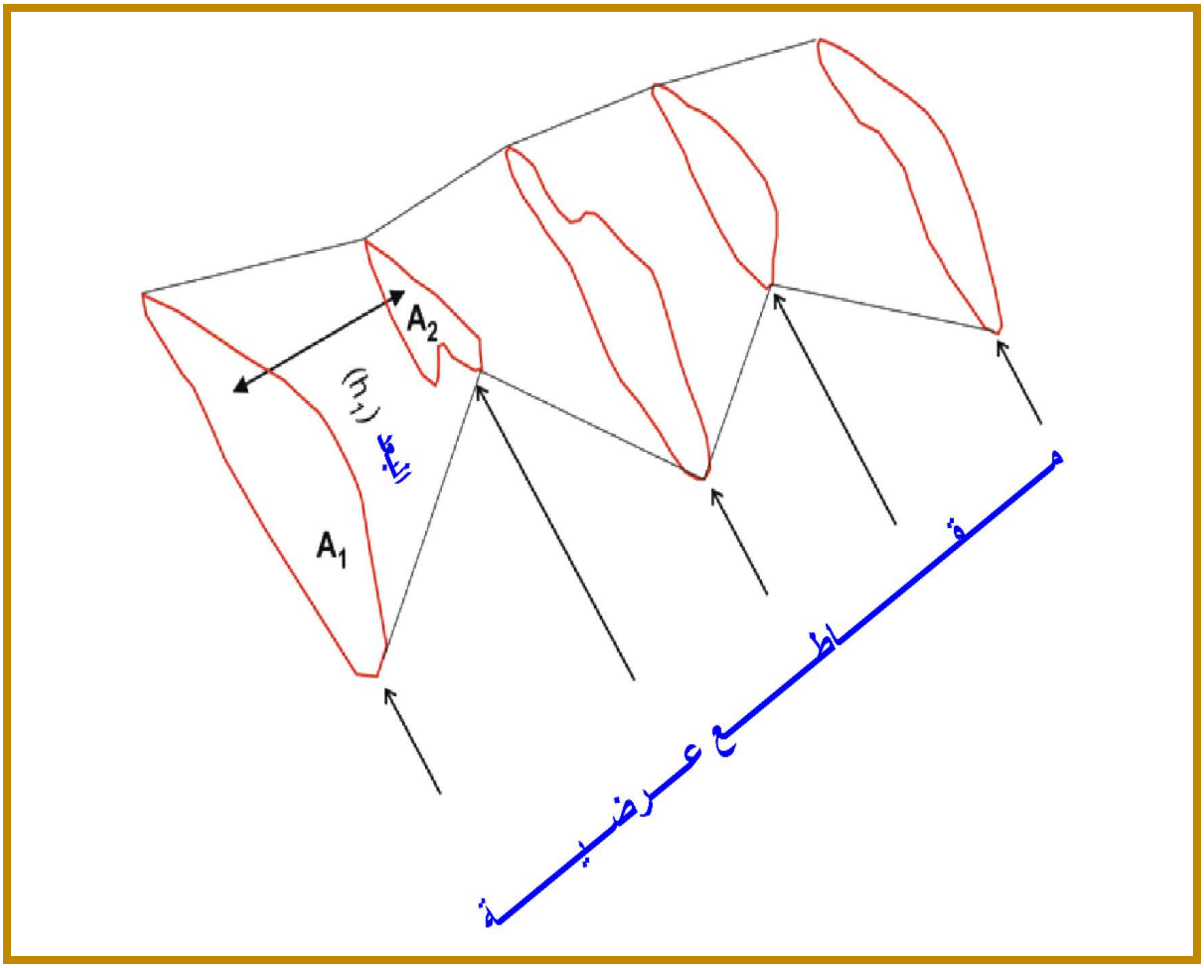
على وجه الخصوص، يجب أن تكون مسافة الاستقراء متوافقة مع الاستمرارية المكانية للصنف وسمك الجسم الخام. يمكن أن يؤدي التقليل من تقلب الجسم الخام واستقراء التقديرات المقطعية للمسافات الأكبر إلى أخطاء تقدير خطيرة. وبالتالي، يتم استخدام الطريقة فقط إذا ثبت أن مسافات الاستقراء مناسبة لنوع معين من الرواسب وأسلوب التمعدن.

لقد وجدت طريقة المقطع العرضي تطبيقات جديدة عند تطبيق تقنيات الإطارات السلكية لنمذجة الأجسام الخام. يتم استخدام استقراء المقطع العرضي الأخير بشكل شائع لإغلاق الإطار السلكي. يتم تطبيق هذا النهج عندما لا يزال التمعدن مفتوحًا ويشير التفسير الجيولوجي إلى أن التمعدن يستمر إلى ما بعد المقطع العرضي الأخير المحفور. تتكون الرواسب من خلال تركيب عدة جبهات متدحرجة مما أدى إلى خلق شكل متغير جدًا ومتقطع لأجسام الخام (Abzalov 2010; Abzalov et al. 2014).

كان الارتباط الدقيق بين المقاطع العرضية مستحيلًا، لذلك تم إنشاء إطارات سلكية ثلاثية الأبعاد من خلال استقراء تفسيرات المقاطع العرضية. بعد ذلك تم دمج الإطارات السلكية للألواح المستعرضة معًا لتكوين إطار سلكي واحد تم استخدامه لبناء نموذج الكتلة وتقدير موارد الرواسب (Abzalov, 2010).

## • الاستيفاء بين المقاطع العرضية

يعتمد النهج الآخر لتقدير المقاطع العرضية على حساب متوسط المقاطع العرضية المجاورة. يتم الحصول على حجم اللوحة المقيدة بالقسمين المتجاورين عن طريق ضرب متوسط مناطقهما $A_1C_2A_2$ في المسافة الفاصلة (h) (كما في الشكل الآتي).




**تقدير الموارد عن طريق استيفاء المقاطع العرضية. حيث $A_1$ و $A_2$ مساحتي القيود المتمعدنة على المقطع العرضي** (Abzalov, 2016)

تُستخدم هذه الطريقة بشكل شائع وأثبتت دقتها وكفاءتها العالية للتحكم في الإنتاج في المناجم التي تقع تحت الأرض.

**تعمل على النحو الآتي:**

- يتم رسم خرائط لجسم الخام والصخور المضيفة بشكل منهجي وأخذ عينات منها على الأسطح المتقدمة لمحركات الخام تحت الأرض.
- يتم تقدير درجة وحمولة الخام المكسور لكل تقدم في محرك الخام من خلال استكمال الوجهين الصخريين، أحدهما تم رسمه قبل حفر الوجه وتفجيره والثاني هو الوجه النشط نفسه الذي تم كشفه بعد كسر الخام ونقله.
- يمكن أيضًا استخدام هذه الطريقة لتقدير الموارد والاحتياطيات، إلا أنه يتم استبدالها عادةً بالتقديرات الجغرافية الإحصائية للأجسام الخام المقيدة بالأطر السلكية.

## ■ طريقة التقدير بوساطة الألواح

تم اعتماد هذه الطريقة من قبل لجنة احتياطيات الخام التابعة للدولة الروسية (GKZ) باعتبارها تقنية مفضلة لتقدير احتياطيات أجسام الخام الجدولية. يكون إجراء التقدير هو كما يلي:

- يعرض التمعدن على سطح ثنائي الأبعاد.
- يتم تحديد لوحات الموارد، التي تسمى كتل الموارد، وفقًا لتسميات GKZ، وتحديدها في خطة ثنائية الأبعاد. ويتم تحديد الكتل مع الأخذ في الاعتبار الاستمرارية الجيولوجية والبيانات المتاحة. عادةً ما يتم تقييد الجزء العلوي و/أو السفلي من الكتل بواسطة محركات تحت الأرض يتم أخذ عينات

منها بواسطة عينات القنوات. يتم جمع عينات القناة خلال فترات منتظمة تتراوح عادة بين 2 و3 أمتار. تكون جوانب الكتل مفتوحة في المراحل الأولى من الاستكشاف.

عندما ينضج المشروع، لا سيما في مرحلة الجدوى، يتم تحديد جوانب الكتل بواسطة الارتفاعات تحت الأرض. يتم استكشاف المساحة الداخلية للكتل عن طريق الحفر.

- يتم تقدير الموارد لكل كتلة عن طريق حساب متوسط درجة الطول لجميع التقاطعات وحساب متوسط السُمك الحقيقي للوح. يتم تقدير حمولة الكتلة عن طريق ضرب مساحة الكتلة على المخطط ثنائي الأبعاد في متوسط سمكها ومتوسط الكثافة الظاهرية الجافة للتمعدن في الكتلة.
- تُستخدم العينات الموزعة على طول نقاط اتصال الكتلة (كنشاط) لتقدير الكتلتين الموجودتين على جانبي جهة الاتصال المحددة.

# التعدين في البحار

طوال تاريخ البشرية في استخدام المحيطات والبحار، كانت الوظائف الاقتصادية والعسكرية ذات أهمية قصوى. لقد عملت البحار على الانفصال والالتحام، حسب الزمن والظروف التي تعيشها الشعوب. وسواء كان ذلك من أجل الغذاء، أو النقل، أو الاتصالات، أو الحماية، فإن استخدام المحيطات عادة ما ينطوي على علاقات سياسية متبادلة - جيدة وسيئة - بين الشعوب. وقد تجلت هذه الحالة بشكل خاص في العقود الأخيرة، ولا تزال مستمرة حتى يومنا هذا. والواقع أن المرء لا يستطيع أن يدرس أو يفهم الشؤون البحرية المعاصرة بشكل كامل دون أن يضع في الاعتبار سياسات المحيطات محليًا ووطنيًا ودوليًا. مع نمو سكان العالم ومع دفع أنظمة استخدام الموارد لدينا أكثر فأكثر إلى المحيطات، اضطرت المجتمعات إلى التقارب البحري مع بعضها. وكانت النتيجة، في كثير من الأحيان، رد فعل لحماية ما يملكه المرء بالفعل أو الاستيلاء اليوم على ما يخشى المرء أنه قد لا يكون موجودًا غدًا. وقد أدت مثل هذه التصورات والعلاقات إلى الهدر والإحباط والصراع والتسوية بين الشعوب.

## • لماذا التعدين في قاع البحر؟

خلال القرن الماضي، أصبح العلماء تدريجيًا أكثر معرفة بإمكانيات المحيطات كمصدر للمعادن. منذ أواخر الستينات وحتى أوائل الثمانينات، كان رجال الدولة ورجال الأعمال الدوليون والعاملون في صناعة التعدين متحمسين لاحتمالات دفع حدود إنتاج النفط في الجرف القاري نحو البحر واستخراج المعادن من قاع البحار العميقة. وبحلول منتصف الثمانينات، تحول هذا المزاج إلى تشاؤم، فيما يتعلق بقاع البحر العميق. ما الذي تسبب في هذا التحول الدراماتيكي في الرأي الذي يرى أن التعدين في قاع البحار العميقة لن يستمر لمدة خمسة عشر عامًا على الأقل، وعلى الأرجح لن يستمر حتى فترة طويلة من القرن الحادي والعشرين؟

## • مزايا التعدين في المحيطات

تبرز العديد من المزايا للتعدين في المحيطات على النقيض من الإنتاج البري:

- ♦ العديد من خامات قاع البحر أغنى من الرواسب البرية.
- ♦ توفر المياه احتياجات النقل الرخيصة نسبيًا، سواء من الناحية اللوجستية أو التوزيعية.
- ♦ المرافق (الموانئ) لتحميل إمدادات التعدين وتفريغ المنتجات المعدنية موجودة بالفعل.
- ♦ ويمكن بناء عمليات المعالجة البرية في مناطق مستقرة سياسيًا وفي مناطق إمدادات العمالة والطاقة المرغوبة على وجه التحديد.
- ♦ توجد قيود أقل في اللوائح البيئية وقوانين تقسيم المناطق.
- ♦ يمكن لدول العالم أن تحصل على قدر أكبر من الاستقلال في تلبية احتياجاتها المعدنية الاستراتيجية.

## • عيوب التعدين في المحيطات

**العيوب الرئيسية للتعدين في المحيطات هي:**

- قد تصل المسافات من مواقع التعدين إلى الأسواق إلى عدة آلاف من الكيلومترات.
- يتطلب بناء معدات التعدين والمعالجة وإتقان التكنولوجيا الهندسية الكثير من الوقت واستثمارات رأسمالية كبيرة.
- قد تكون تكاليف التوقف عن العمل بسبب الطقس كبيرة.
- ويجب حل المشاكل البيئية غير المعروفة في قاع البحر العميق وعمود الماء.

- وقد تتفاقم المشاكل الحالية لأسواق المعادن العالمية المتخمة، مما يسبب صعوبات لمنتجي المعادن البرية المستخرجة أيضا من المحيطات.
- قد تحدث مشاكل سياسية واقتصادية مرتبطة بإنشاء هيئة دولية تتولى إدارة التعدين في قاع البحار العميقة ويمكنها التعدين في حد ذاتها.

ومن بين هذه العيوب العديدة، تتطلب ظروف سوق المعادن الحالية والقضايا السياسية تدقيقًا خاصًا. وستكون الأحداث في هذه القطاعات حاسمة بالنسبة لمستقبل التعدين البحري.

في منتصف الثمانينات، لم تكن معظم صناعات التعدين تنتج بكامل طاقتها، وبعضها لم يكن حتى بنسبة 50 %. والقليل فقط ينتج بأكثر من 80 % من طاقته. وفي عام 1983، من بين ثمانية عشر معدنًا مختارًا تم إنتاجها حاليًا أو من المحتمل أن تكون متاحة في المحيطات، لم يكن متوسط الإنتاج السنوي يصل إلى 75 % من طاقتها. ولذلك فإن تقييم أسواق المعادن المتخمة حاليًا واحتمال استمرار هذا الوضع سيكون جزءًا مهمًا من عملية صنع القرار في شركات التعدين حول ما إذا كان سيتم استخراج قاع البحر العميق أو توسيع برامج تطوير النفط إلى مناطق الجرف القاري العميقة.

يعتمد استخراج أي معدن من قاع البحر على:

- مدى قدرتها على المنافسة اقتصاديًا وتكنولوجيًا مع الموارد البرية.
- توافر البدائل التي تلبي الصفات الفيزيائية والكيميائية المحددة التي يحتاجها مستهلكو المعادن.
- ما إذا كانت هناك كميات كبيرة من المواد المستخرجة بالفعل والقابلة لإعادة التدوير متاحة.
- تغيير الاهتمامات الاستراتيجية للحكومات الوطنية.

## • الوضع السياسي

تشكل القضايا السياسية المرتبطة بالجهود الحالية لإنشاء نظام للتعدين في المحيطات عائقًا رئيسيًا أمام المضي قدمًا في التعدين في قاع البحار العميقة. إن البلدان الأقل نموًا مصممة على الحصول على حصة أكبر من الثروة التي يمكن أن توفرها الموارد المعدنية في قاع البحار العميقة.

والعديد من الدول الصناعية عازمة بنفس القدر على عدم تعريض رفاهية سكانها واقتصادها الوطني للخطر. ومع ذلك، تتفق معظم الأطراف المهتمة على ضرورة التوفيق بين هذه المواقف المتباينة بحيث تتم إدارة التعدين في المحيطات بكفاءة وأكثر إنصافًا في ظل سياسات تلبي الاحتياجات الاقتصادية والسياسية والاجتماعية والبيئية لجميع مواطني العالم والمواطنين داخل الدول.

## • أحواض المحيطات

تحوي المحيطات على منطقتين جيولوجيتين أساسيتين: منطقة قارية ومنطقة قاع البحار. ولأننا لا نستطيع رؤيتها مباشرة، فمن السهل أن نتصور أحواض المحيطات على أنها هياكل تشبه الوعاء متجانسة بسلاسة وتتعمق تدريجيًا. لا شيء يمكن أن يكون أبعد عن الحقيقة، لأن تضاريس قاع البحر غالبا ما تكون عبارة عن فسيفساء من الجبال، والأودية، والجروف، والسهول.

تتكون الطبقة الخارجية والأرق للأرض (نحو 0.3 % من نصف قطرها) من نوعين من الصفائح العملاقة المتحركة: القشرة المحيطية (البازلت بشكل رئيسي) والقشرة القارية (الجرانيت بشكل رئيسي). معظم القشرة القارية أقدم جيولوجيًا، وتزن أقل، وأكثر سمكًا من القشرة المحيطية. يبلغ متوسط

سمك القارات نحو 40 كيلومترًا، ولكن في حالة وجود سلاسل جبلية عالية، قد يصل سمكها إلى 70 كيلومترًا. يتكون امتداد القشرة القارية باتجاه البحر من الجرف القاري، والمنحدر القاري، والارتفاع القاري - المعروفة مجتمعةً باسم الحافة القارية. يُعرّف الجرف القاري (متوسط عرضه 65 كيلومترًا) عادةً بأنه مناطق قاع البحر التي يقل عمق مياهها عن 200 متر. عند ارتفاع نحو 130 مترًا، يبدأ الرف عادة في الميل نحو الأسفل بسرعة، بمتوسط انحدار يبلغ 4.3 درجة. هذه المنطقة هي المنحدر القاري. يبدأ الارتفاع القاري عندما يصبح الانحدار أقل حدة، عادة على عمق يتراوح بين 1400 متر و3200 متر.

تنحدر هذه المنطقة نحو الأسفل بتدرج لطيف نسبيًا وتمتد إلى مسافات متفاوتة إلى حد كبير حتى يصل قاع البحر إلى ارتفاع نحو 4000 متر ويصبح جزءًا مما يسمى بالسهل السحيق، أي قاع البحر العميق. تحوي مناطق وسط المحيط على بعض من أحدث صخور الأرض، لأن العمليات الجيولوجية هنا تشكل قشرة محيطية جديدة في مناطق الانتشار (التباعد)، المكونة من التلال والكسور.

مناطق الانتشار - التي تتشكل في الأصل على شكل كسور صغيرة وضيقة داخل القارات - تؤدي في النهاية إلى إنشاء (من خلال تكتونية الصفائح) أحواض المحيطات. يفترض الجيولوجيون أن مناطق الانتشار هي مناطق تظهر فيها أجزاء من خلايا الحرارة الداخلية الشبيهة بالحمل الحراري والطبقة العليا المهاجرة من الوشاح (الغلاف الموري)، وتشكل معادن كبريتيد متعددة الفلزات حرارية مائية عندما تتفاعل الصهارة الساخنة مع مياه البحر سواء على سطح قاع البحر أو تحته. عندما تندفع الصهارة إلى الأعلى وتبرد، يتم تحويلها إلى جانب أو آخر من منطقة الانتشار، لتصبح جزءًا من صفيحة محيطية مهاجرة، والتي، بعد عدة ملايين من السنين، من المقرر أن تصطدم

(تتقارب) مع قارة وتندس تحتها. تقع في طريقها، وتساعد في كثير من الأحيان على تكوين سلاسل جبلية ساحلية بركانية متمعدنة. وأثناء هجرة الصفيحة، قد تتشكل تراكمات معدنية على سطحها على شكل قشور مستمرة وعلى شكل عقيدات فردية. يتم تجاوز الصفائح المحيطية، جزئيًا بسبب اندساسها تحت القارات، بواسطة الصفائح القارية التي تكون بدورها مدمجة داخل الصفائح البازلتية الصلبة. وربما تتحرك القارات وصفائحها البازلتية الأساسية «التي ربما تحركها تيارات مرنة» ببطء (بمعدلات مختلفة) عبر صفيحة محيطية مجاورة منغمسة.

بالتزامن مع حركاتها التكتونية الجانبية، تتعرض المواد الصخرية الموجودة في القارات للتجوية ونقلها إلى المحيطات المجاورة. تخلق الأنهار والأمواج الساحلية المحيطية والتيارات الطويلة على الشاطئ الغرينيات (الرمال والحصى الغرينية الحاملة للمعادن). عندما تتوفر الرواسب والظروف الفيزيوغرافية والبترولية المناسبة، تتشكل الهيدروكربونات (النفط والغاز) وتصبح محاصرة.

## • أنواع معادن المحيطات

يمكن تصنيف المعادن المحيطية إلى عدة مجموعات واسعة: مجاميع البناء، والمواد الصناعية، والآلات الغرينية، والهيدروكربونات، والكبريتيدات الحرارية المائية، والعقيدات والقشور المتعددة المعادن، ومياه البحر. إن الموارد المعدنية الأكثر تواجدًا في المحيطات هي مياه البحر. وفي المستقبل، يمكن لمياه البحر أن توفر كميات أكبر من تلك المعادن المستخرجة منها حاليًا وغيرها أيضًا، مثل اليورانيوم. على الرفوف القارية، أنواع المعادن الرئيسية هي: مجاميع البناء، والمواد الصناعية، والغرينيات، والهيدروكربونات. لقد حصل عمال المناجم منذ فترة طويلة على مواد البناء والهيدروكربونات من مناطق الجرف القاري الضحلة، وهم حاليًا يندفعون إلى المياه العميقة لاستخراج النفط.

توفر الغرينيات البحرية القصدير والذهب والبلاتين وستصبح أكثر أهمية في المستقبل. وعلى الرغم من عدم إنتاجها حاليًا، إلا أنه سيتم استغلال فوسفورات الجرف القاري (المفيدة جدًا في إنتاج الأسمدة). خلال العقدين الماضيين، حولت اتحادات التعدين انتباهها إلى المعادن التي يصعب الوصول إليها ولكنها قد تكون مهمة في قاع البحار العميقة. لقد أنفقوا ملايين الدولارات لتحديد وتقييم العقيدات المتعددة المعادن (المنغنيز الحديدي) التي تغطي قاع البحر في العديد من المحيطات، وخاصة على أعماق تتراوح بين 4000 متر و6000 متر. إن تطوير تقنيات التعدين والمعالجة اللازمة لاستعادة المعادن المرغوبة من العقيدات – النيكل والنحاس والكوبالت والمنغنيز – يتطلب استثمارات أكبر. وصلت إحدى الشركات حاليًا إلى مرحلة متقدمة من الأعمال التحضيرية لاستخراج الطين المعدني الحراري المائي من الخنادق العميقة بالبحر الأحمر.

وفي الآونة الأخيرة، أصبح أصحاب المشاريع مهتمين بالكبريتيدات الضخمة المتعددة الفلزات الحرارية المائية المرتبطة بمراكز انتشار أخرى في أعماق المحيطات، كما هو الحال في شرق المحيط الهادئ. وفي غضون السنوات القليلة الماضية فقط، أثارت القشور المتعددة المعادن (المنغنيز الحديدي) التي تغطي الجبال البحرية وجوانب الجزر البركانية اهتمام العلماء واتحادات التعدين في أعماق المحيطات (Earney, 2002).

## • معادن قاع البحر العميق

لطالما كانت المعادن الموجودة في أعماق المحيطات مصدر جذب لكل من الأشخاص العاديين والعلماء. يقوم الباحثون البحريون باستكشاف قاع البحر بشكل مكثف وأخذ عينات وتحليل صخوره ورواسبه. ومن هذه الدراسات يقومون بتطوير فرضيات حول العمليات المسؤولة عن تكوين المعادن في قاع البحر ويفكرون في الأهمية المحتملة لهذه المعادن للبشرية.

### ◆ العقيدات والقشور الحديدية المنغنيزية

عقيدات المنغنيز الحديدي (عقيدات المنغنيز) وقشور المنغنيز الحديدي (القشور) لها توزيع واسع ولها تركيبة مشتركة تهيمن عليها أكاسيد المنغنيز والحديد. ويمكن استغلال كل من عقيدات المنغنيز والقشور في المستقبل، ولكن لا تزال أمامنا مهمة ضخمة لرسم خريطة لها وأخذ عينات منها بعناية أكبر، وتطوير واختبار آلات وطرق لاستخراج ومعالجة المعادن الموجودة فيها. لن يتم الحصول على هذه الرواسب من «الذهب الأسود» بسهولة من المحيطات.

### ◆ عقيدات المنغنيز

كانت خرسانات الحديد والمنغنيز البحيري معروفة لدى الأوروبيين الشماليين لعدة قرون، ولكن لم يتم اكتشاف العقيدات البحرية حتى عام 1868م. في البداية، كانت هذه الكتل الخرسانية الداكنة التي غالبًا ما تشبه البطاطس بمثابة فضول علمي. ولم تبدأ المجتمعات العلمية والتجارية في اعتبار عقيدات المنغنيز مصدرًا قابلًا للاستغلال للمعادن، مثل النحاس والنيكل والكوبالت، والمنجنيز إلا في خمسينات القرن العشرين، ومع نشر العمل الأساسي لجون ميرو (الذي أجرى بحثًا أساسيًا في تحليل عقيدات المنغنيز). على الرغم من أن

هذه المعادن الأربعة هي في الوقت الحاضر ذات أهمية كبيرة لاتحادات التعدين، إلا أن معادن أخرى - مثل الزنك والفاناديوم والموليبدينوم - قد تصبح مهمة أيضًا.

## ◆ تشكل العقيدات

تختلف العقيدات في الحجم من حجم حبة البازلاء الصغيرة إلى حجم الشمام الكبير، وتحدث في أشكال مختلفة - كروية، وإهليلجية، ونباتية (عناقيد العنب)، وغير منتظمة.قد يكون سطحها ناعمًا و/أو حبيبيًا، حيث يوجد كلا القوام على العقيدات نفسها. وعادة ما يكون السطح العلوي أكثر نعومة من السطح المدفون والذي غالبًا ما يكون خشنًا وغير منتظم. الكسور الداخلية شائعة وعادةً ما تكون مملوءة بالطين.

الاختلافات في المحتوى المعدني لطبقات النمو تعطي العديد من العقيدات مظهرًا مخططًا عند تقسيمها؛ عادة ما يكون لون سطحها من الأسود إلى البني المحمر الداكن.

## ◆ التوزيـــــع

توجد عقيدات المنغنيز في جميع المحيطات، على الرغم من أنها ليست شائعة في المحيط المتجمد الشمالي . تكمن عقيدات المنغنيز الحقيقية أو مدفونة جزئيًا أو كليًا في الرواسب الناعمة، عادةً في أعماق البحار، على عكس القشور التي تحدث في أعماق أقل عمقًا وعلى ركائز صلبة خالية إلى حد كبير من الرواسب الدائمة. لقد كانت الارتباطات الكيميائية للعقيدات وطبقاتها معروفة منذ سنوات عديدة، ولكن الوسائل التي يتم من خلالها الحفاظ على العقيدات في واجهة المياه الرسوبية لا تزال مثيرة للجدل وغير مفهومة بالكامل. ومن المقبول عمومًا أن العقيدات تتشكل من خلال التراكم من مصدر مزدوج للعناصر

المعدنية – مياه البحر ورواسب قاع البحر، وخاصة الأخيرة. تختلف خصائصها بشكل كبير من منطقة محيطية وبيئة إلى أخرى، حتى داخل عينة معينة. العقيدات هي الأكثر وفرة حيث إن:

- معدلات الترسيب منخفضة نسبيًا.
- النوى موجودة.
- أعماق المياه تتراوح ما بين 3000 إلى 6000 متر.
- النشاط القاعي يساعد على منع دفن العقيدات.
- تحدث تيارات سفلية قوية.
- توجد إمكانية أكسدة عالية في البيئة الترسيبية.
- لا توجد حالة اختزال لسطح رواسب قاع البحر، وهي غياب الأكسجين.

أحد العوامل المحددة لوفرة وحجم العقيدات هو الوقت الذي تعرضت فيه لعمليات التكوين. معدل تراكمها (باستثناء المعادن ذات الأصل الحراري المائي) بطيء جدًا، فقط بضعة ملليمترات خلال مليون سنة. وهكذا بشكل عام كلما كانت منطقة قاع البحر أبعد عن مركز انتشار قاع البحر، كلما زاد احتمال كبر حجم العقيدات، نتيجة لزيادة عمر قاع البحر مع المسافة من مركز الانتشار.

## ◆ النـــوى والترســـيب

لكي يبدأ تكوين العقيدات، يجب أن يكون هناك نوع ما من النواة، على سبيل المثال، المواد البركانية أو شظايا العقيدات أو المواد الحيوية مثل عظم أذن الحوت أو سن سمكة القرش، والتي يمكن أن يحدث التراكم حولها. إذا أصبحت النوى المحتملة مدفونة تحت الرواسب، يتم منع تكوين أكاسيد المنغنيز. وبالتالي فإن معدل الترسيب في قاع البحر هو العامل الرئيسي في توزيع عقيدات المنغنيز.

يحوي المحيط الأطلسي على كمية كبيرة نسبيًا من الرواسب التي تحملها

الأنهار القارية، في حين أن المحيطين الهندي والهادئ - مع وجود عدد أقل من الأنهار التي تتدفق إليهما - يكون لديهما ترسبات أقل بكثير. يتمتع المحيط الهادئ أيضًا بعمق كبير ومناطق ذات تيارات سفلية قوية تساعد في الحفاظ على نوى العقيدات المحتملة خالية من الرواسب. قد تساهم هذه الظروف في أولوية المحيط الهادئ في مجموعات العقيدات وربما في محتواها المعدني الغني نسبيًا.

## ◆ التراكـــم والمحتـــوى المعدنـــي

في عام 1891، نشر موراي وريناردتقريرًا عن رحلات تشالنجر الاستكشافية. واقترحوا أن المنغنيز قد ينشأ من مصادر محيطية، مثل البازلت البحري ومياه البحر. فضل ريناردمياه البحر كمصدر وموراي البازلت البحري. ركز موراي في أبحاثه المبكرة على العلاقة بين أدلة الحطام البركاني البحري في أعماق البحار وتراكم المنغنيز. لقد شعر أن تكوين المنغنيز قد يتفاقم بسبب ثاني أكسيد الكربون البركاني. وفي وقت لاحق (في عام 1894) أدرك أهمية المنغنيز المشتق من الأنهار والجداول، وكذلك الرواسب البحرية الضحلة. تبدو تصريحاته مقتصرة على الأكاسيد البحرية الضحلة، في حين بدا متمسكًا بفرضيته السابقة حول أصل العقيدات السحيقة: « في الواقع، تشير جميع الملاحظات إلى أن كمية ثاني أكسيد المنغنيز في هذه الرواسب السحيقة لها علاقة مباشرة بوفرة الصخور والمعادن المرتبطة بها وطبيعتها الأساسية، ومدى تغير هذه المعادن وجزيئات الصخور».

في أواخر الخمسينات من القرن الماضي، عزا إدوارد غولدبرغ وغوستاف أرينيوس معادن العقيدات إلى المصادر القارية التي ذابت في مياه البحر ثم

ترسبت منها لاحقًا، وفي الستينات، اقترح إنريكو بوناتي وي. رامونهانروي نايودو (وآخرون) أن تنشأ معادن العقيدات من الانصبابات البركانية البحرية، مع تفاعلات قوية بين مياه البحر والحمم الساخنة، حيث يتم ترشيح كميات كبيرة من الحديد والمنغنيز وعناصر أخرى من الحمم البركانية، ويتم بعد ذلك فصل المنغنيز جزئيًا عن الحمم البركانية. الحديد و«ثم يترسب في قاع المحيط بالقرب من الانصباب، وبالتالي يشكل العقيدات».

يُعتقد أن مصدر المعادن (الرواسب أو مياه البحر) يساهم في حدوث اختلافات في شكل العقيدات وعلم المعادن، حتى داخل العقيدات. أظهر العمل الذي أجراه فيرنر راب أن الأسطح السفلية للعديد من العقيدات تحوي على قيم عالية من النيكل والنحاس والزنك والموليبدينوم والرصاص، في حين أن الأسطح العلوية معكوسة. اقترح بيتر هالباخ وراينر فيلر (من بين آخرين) أن الأسطح السفلية تعكس عمليات الترسيب التحويري المرتبطة بترشيح الرواسب، في حين تمثل الأسطح العلوية الرواسب المكتسبة من مياه البحر. تحدث المعادن الموجودة في عقيدات المنغنيز في ثلاث مراحل عامة: معادن المنغنيز ومعادن أكسيد الحديد والمعادن الإضافية. معادن المنغنيز الرئيسية هي تودوروكيت $(Mn_{+2}, Ca,Mg)\ Mn^{+4}\ O_7 \cdot H_2O$; بيرنيسايت $Na_4Mn_{14}O_{27} \cdot H_2O$; والفيرناديت $(Mn, Co^{+3})\ Mn_6O_{13} \cdot H_2O$.

وفقًا لبنيامين هاينز وستيفن لو وديفيد بارون: «يرتبط النحاس والنيكل والموليبدينوم والزنك وبعض الكوبالت عمومًا بمرحلة الفيرناديت عن طريق استبدال $Mn^{+2}$...»، مما يساعد على «تثبيت البنية البلورية للمنجنيز في البيئة البحرية». ومع ذلك، لاحظ ديفيد بايبر، وجي آر باسلر، وجيمس بيشوف، وجود القليل جدًا من المنغنيز ثنائي التكافؤ في دراسة حديثة لعقيدات المنغنيز. ولا

يعتقد فرانك مانهايم أن Co يرتبط بمراحل الحديد في العقيدات، بل يرتبط كل من Co وFe بالمراحل الهيدروجينية (حيث تتعرض قمم العقيدات لمياه البحر)، وهو ما يفسر الارتباط بين المعدنين في العقيدات.

أهم معادن أكسيد الحديد تشمل الأكاجانيت، والفيروكسيهيت، والجويتيت، والليبيدكروسيت. يرتبط التيتانيوم والرصاص أيضًا بمعادن أكسيد الحديد الموجودة في العقيدات. المعادن الإضافية، وهي تلك التي تحدث بكميات صغيرة جدًا، تشمل الزيوليت والسيليكات الصفائحية والبراكين الفتاتية والبيولوجية، حيث تشتمل الأخيرة على معادن مثل الأراغونيت والأباتيت والكالسيت.

وقد حدد الباحثون أكثر من سبعين عنصرا في عقيدات المنغنيز. وينبع التنوع، جزئيًا، من الخصائص الممتازة لتنظيف مياه البحر (عن طريق الامتزاز) لأكاسيد الحديد والمنغنيز، وخاصة الأخيرة. تلك العقيدات التي تحوي على كميات كبيرة من التودوروكيت عادة ما تكون غنية بالنحاس والنيكل. العقيدات هي الأغنى بالنحاس والنيكل حيث تدعم المحيطات التجمعات الأكثر وفرة من الكائنات الحية العوالق، كما هو الحال في المنطقة الاستوائية في وسط المحيط الهادئ. ومع تراكم أمطار العوالق في قاع البحر، يتم إعادة تدوير العناصر المعدنية في العقيدات.

يُظهر المنغنيز ارتباطًا طفيفًا بالعمق، على الرغم من أن البيانات تشير إلى انخفاض في القيم القصوى وربما زيادة في القيم الدنيا مع زيادة العمق. لم يظهر أي تحليل للعقيدات وجود أكثر من 32 % من المنغنيز تحت أعماق 5300 متر، وأبلغ واحد فقط عن وجود أقل من نحو 13 % من المنغنيز تحت أعماق 6000 متر (Earney, 2002).

عندما تتشكل العقيدات على أعماق أكبر من 3000 متر، فإنها عادة ما

تحـوي علـى نسـبة أعلـى مـن النحـاس والنيـكل مقارنـة بالأعمـاق الضحلـة. يصـل الحـد الأقصـى لمحتـوى النيـكل والنحـاس إلـى نحـو 5000 متـر. لكـن علاقـة العمـق ليسـت خطيـة. عنـد نحـو 2,900 إلـى 3,000 متـر، توجـد عتبـة للعمـق، نـادرًا مـا يتجـاوز قيـاس النيـكل والنحـاس (مجتمعـين) أكثـر مـن 1 % (Earney, 2002).

لكـن في الآونـة الأخيـرة، أشـار هالبـاخ ومانهـايم إلـى أن العقيـدات (والقشـور) التـي تحـوي علـى كميـات كبيـرة مـن الكوبالـت تتشـكل في المناطـق التـي يكـون فيهـا مسـتوى الأكسـجين منخفضًـا؛ أرجـع مانهـايم هـذه القيـم العاليـة إلـى إثـراء الكوبالـت مقارنـة بالمنغنيـز في المـاء.

لـم يتـم تحديـد الكائنـات البيولوجيـة (مثـل العوالـق النباتيـة) كمصـدر مهـم للكوبالـت، لأن الكوبالـت «يتـم إزالتـه مـن ميـاه البحـر بواسـطة العوالـق النباتيـة بشـكل أقـل فعاليـة مـن المعـادن الانتقاليـة الأخـرى»، أي النحـاس والنيـكل. تعتبـر علاقـة الكوبالـت بالعمـق أكثـر تعقيـدًا مـن علاقـة النيـكل والنحـاس. تبلـغ تركيـزات القيمـة في القشـور حـدًا أقصـى عنـد نحـو 1000 متـر إلـى 2000 متـر؛ ثـم تنخفـض بسـرعة إلـى 3000 متـر حيـث تنخفـض ببطـء مـع زيـادة العمـق. وتحـت عمـق 3000 متـر، نـادرًا مـا يصـل حجـم الكوبالـت إلـى أكثـر مـن 0.6 %.

متوسـط المحتـوى المعدنـي في عقيـدات المحيـط الهـادئ أعلـى بشـكل ملحـوظ مـن تلـك الموجـودة في المحيطـين الأطلسـي والهنـدي. تحـوي عقيـدات المحيـط الهـادئ، باسـتثناء العينـات المأخـوذة مـن منطقـة CCZ، علـى نحـو 1.5 مـرة مـن كميـة المنغنيـز الموجـودة في عقيـدات المحيـط الأطلسـي. وتبلـغ قيمـة النيـكل في عقيـدات المحيـط الهـادئ نحـو 2.4 مـرة في المحيـط الأطلسـي و 1.8 مـرة في المحيـط الهنـدي. تبلـغ قيمـة النحـاس نحـو 4.2 و 2.2 مـرة أكثـر مـن تلـك الموجـودة في المحيطـين الأطلسـي والهنـدي علـى التوالـي. متوسـط محتـوى الكوبالـت البالـغ 0.27 % في عقيـدات المحيـط الهـادئ هـو نفسـه الموجـود في المحيـط الأطلسـي؛ ويبلـغ متوسـط قيمـة

الكوبالـت في المحيـط الهنـدي 0.21 %.

### ◆ قشور المنغنيز الحديدي

في الآونـة الأخيـرة، أصبـح علمـاء البحـار أقـل اهتمامًـا بالعقيـدات في قـاع البحـار العميقـة وأكثـر انخراطًـا في دراسـات قشـور المنغنيـز الحديـدي، وخاصـة تلـك الغنيـة بالكوبالـت. يعتقـد الكثيـرون في صناعـة التعديـن والمجتمـع العلمـي أنـه يمكـن اسـتخراج بعـض قشـور المنغنيـز الحديـدي الغنيـة بالكوبالـت قبـل بـدء إنتـاج العقيـدات تجاريًـا. هنـاك عـدة أسـباب تفسـر هـذا الـرأي:

- تحـوي القشـور عـادةً علـى كميـة أكبـر مـن الكوبالـت، كمـا تحـوي أيضًـا علـى معـادن أخـرى موجـودة في العقيـدات (النيـكل والنحـاس والزنـك والبلاتـين) ممـا يمنحهـا محتـوى معدنيًـا إجماليًـا أكبـر.
- وهـي تحـدث في ميـاه أقـل عمقـا بكثيـر مـن تلـك الموجـودة في أفضـل العقيـدات، والتـي يقـع معظمهـا في مناطـق سـحيقة عميقـة جـدًا.
- فهـي تقـع غالبًـا ضمـن المناطـق الاقتصاديـة الخالصـة التـي يبلـغ طولهـا 200 ميـل للـدول السـاحلية، ممـا يجعلهـا أكثـر سـهولة في الوصـول إلـى الأسـواق وآمنـة مـن الناحيـة السياسـية.

### • التـــوزيع

علـى الركائـز الصلبـة وحيـث لا توجـد رواسـب ناعمـة، تتشـكل معـادن الحديـد والمنغنيـز كقشـور وليـس كعقيـدات، علـى الرغـم مـن أن بعـض العقيـدات قـد تتشـكل حـول نـوى منفصلـة في هـذه البيئـات. تم التعـرف علـى إثـراء الكوبالـت في قشـور المنغنيـز منـذ أوائـل الخمسـينات مـن القـرن الماضـي عندمـا وجـد الباحثـون أنهـا مرتبطـة بجـزر المحيـط الهـادئ والجبـال البحريـة. في أواخـر السـتينات وأوائـل السـبعينات مـن القـرن العشـرين، قـام علمـاء مـن معهـد هـاواي للجيوفيزيـاء بفحـص

قشور المنغنيز الحديدي في أرخبيل هاواي.

تابعت هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية في عامي 1983 و1984 هذه النتائج، وجمعت البيانات التي أظهرت « أن أجزاء كبيرة من المنحدرات العليا لبعض الجبال البحرية والتلال قد تكون مغطاة بما يتراوح بين 2 سم إلى أكثر من 4 سم من الأكسيد الأسود الذي يهيمن عليه المنغنيز والحديد ولكنه يحوي على الكوبالت والنيكل والرصاص والسيريوم والموليبدينوم والفاناديوم والعديد من المعادن الثانوية الأخرى». تم فحص عدد قليل من رواسب المحيط الهادئ في عام 1986 أثناء رحلة بحرية جنوب جونستون أتول، وقد وجد أن سمكها يصل إلى 15 سم. ويحوي غرب المحيط الأطلسي أيضًا على رواسب مهمة، خاصة على هضبة بليك الواقعة على الساحل الجنوبي الشرقي للولايات المتحدة. يبلغ سمك بعض المناطق في هضبة بليك 5 سم.

## • التراكم والمحتوى المعدني

كما هو الحال في تكوين العقيدات، يعد الوقت عاملًا رئيسيًا في تطور القشرة المنغنيزية الحديدية. وفقًا لمانهايم، فإن ركائز الجبال البحرية التي يبلغ عمرها 15 مليون سنة على الأقل هي فقط التي كان لديها الوقت الكافي لاكتساب تراكمات كبيرة من القشور، ويجب أن يتراوح عمر الجبال البحرية ما بين 60 إلى 80 مليون سنة حتى يكون لها تطور قشري كبير حقًا.

تتشكل قشور الكوبالت بشكل أبطأ من عقيدات المنغنيز. كلما كان معدل تكوينها أبطأ، زاد محتواها من الكوبالت. وقد لاحظ الباحث مانهايم: «يبدو أن القشور الغنية بالكوبالت هي أبطأ الرواسب المعدنية والصخرية المعروفة في تكوينها، حيث تتراكم بمعدل طبقة جزيئية (وحدة سماكة الخلية تبلغ 4.7 أنجستروم) كل شهر إلى ثلاثة أشهر مما يسمح بالمسامية». لكنه حذر من

أن «معدلات تراكم القشرة الناتجة عن التأريخ بواسطة بنات اليورانيوم يجب تفسيرها بعناية لأنه لا يمكن تطبيقها إلا على المليمتر العلوي أو نحو ذلك من القشور الغنية بالكوبالت. وهي لا تقدم معلومات حول الفجوات السابقة والتغيرات في معدل النمو». ويبين فحص الجبال البحرية (وكذلك الأجزاء المغمورة من الجزر) أن جوانبها تتمتع بأكبر تطور قشري، خاصة بين أعماق 500 متر و2500 متر.

مع زيادة العمق، تصبح الرواسب أقل سمكًا والتغطية أكثر انتظامًا، ربما يكون ذلك نتيجة لحركات أسفل المنحدر للكاحل والرواسب الناتجة عن الانحدار والانزلاق، بالإضافة إلى تيارات «عمود تايلور Taylor Column «التي لم يفهمها علماء المحيطات بشكل كامل بعد. قد يتم أيضًا منع تراكم القشرة في المياه الضحلة نسبيًا عن طريق الرواسب الناشئة عن المخلفات المرجانية. وكما أن العمق مهم لتوزيع القشور ومعدل نموها، فإنه يرتبط بالمثل بالمحتوى المعدني. وقد أثبتت أن القشور التي تحوي على أعلى نسبة من الكوبالت توجد في وسط وجنوب وسط المحيط الهادئ، كما هو الحال في مجموعات كينجمان ريف، وجزيرة باليرا المرجانية، وجزيرة مارشال.

يتم تقديم تصنيف نوعي معمم لمختلف مجموعات الجزر والجزر المرجانية، استنادًا إلى حسابات الدرجة والمناطق المسموح بها. تحوي القشور بشكل عام على كمية من الكوبالت تتراوح بين 1.4 إلى 2.7 مرة أكثر من العقيدات، ولكن قيم النيكل والنحاس والزنك عادة ما تكون أقل. تتم إزالة الكوبالت من مياه البحر المحيطة بواسطة الأكاسيد من خلال الترسيب الانتقائي. وبخلاف هذا البيان، وفقًا لمانهايم، فإن كيفية تأثر محتوى الكوبالت بالظروف الفيزيائية المختلفة في البيئة البحرية لا تزال غير مفهومة تمامًا. ومع ذلك، فقد استعرض بإيجاز العديد من الفرضيات المقدمة لتفسير الاختلافات في محتوى الكوبالت في

القشور، والتي يوازي الكثير منها تلك المقدمة لشرح المحتوى المعدني للعقيدات. تم اقتراح تغيير الماء البارد للبازلت كمصدر للكوبالت، لكن هذه الفرضية لا تفسر سبب احتواء القشور الموجودة على الارتفاعات الأعلى على كمية أكبر من الكوبالت مقارنة بتلك الموجودة بالقرب من البازلت في قاع البحر العميق.

هناك فرضية أخرى تقول إنّ المعادن الحساسة للضغط (الفيرناديت والتودوروكيت) تؤثر على تراكم الكوبالت، لكن الفيرناديت يتواجد في جميع الأعماق، لذلك لا ينبغي أن يكون الفرق في محتوى الكوبالت ملحوظًا. وعلى عكس ارتباطها بالنيكل والنحاس، يبدو أن العوالق النباتية لا تستخرج ما يكفي من الكوبالت لتزويد رواسب قاع البحر بكميات كبيرة من الكوبالت القابل للتدوير. تشير الفرضية النهائية إلى أن قشور الكوبالت تتشكل بشكل أفضل حيث يكون الماء غنيًا بالأكسجين (مما يوفر أكبر إمكانية للأكسدة). تتم مواجهة هذا الاقتراح من خلال لفت الانتباه إلى القشور الغنية بالكوبالت التي توجد في المناطق التي تعاني من نقص الأكسجين نسبيًا في منطقة المحيط الهادئ الاستوائية. ومما يزيد من تعقيد النقاش الدائر حول تفسيرات محتوى القشور من الكوبالت (وكذلك المعادن الأخرى) مشكلة تكوين الجبال البحرية والجزر، والهجرة، وتغير الارتفاع المرتبط بالنقاط الساخنة وتكتونية الصفائح.

### ◆ الكبريتيدات المتعددة الفلزات

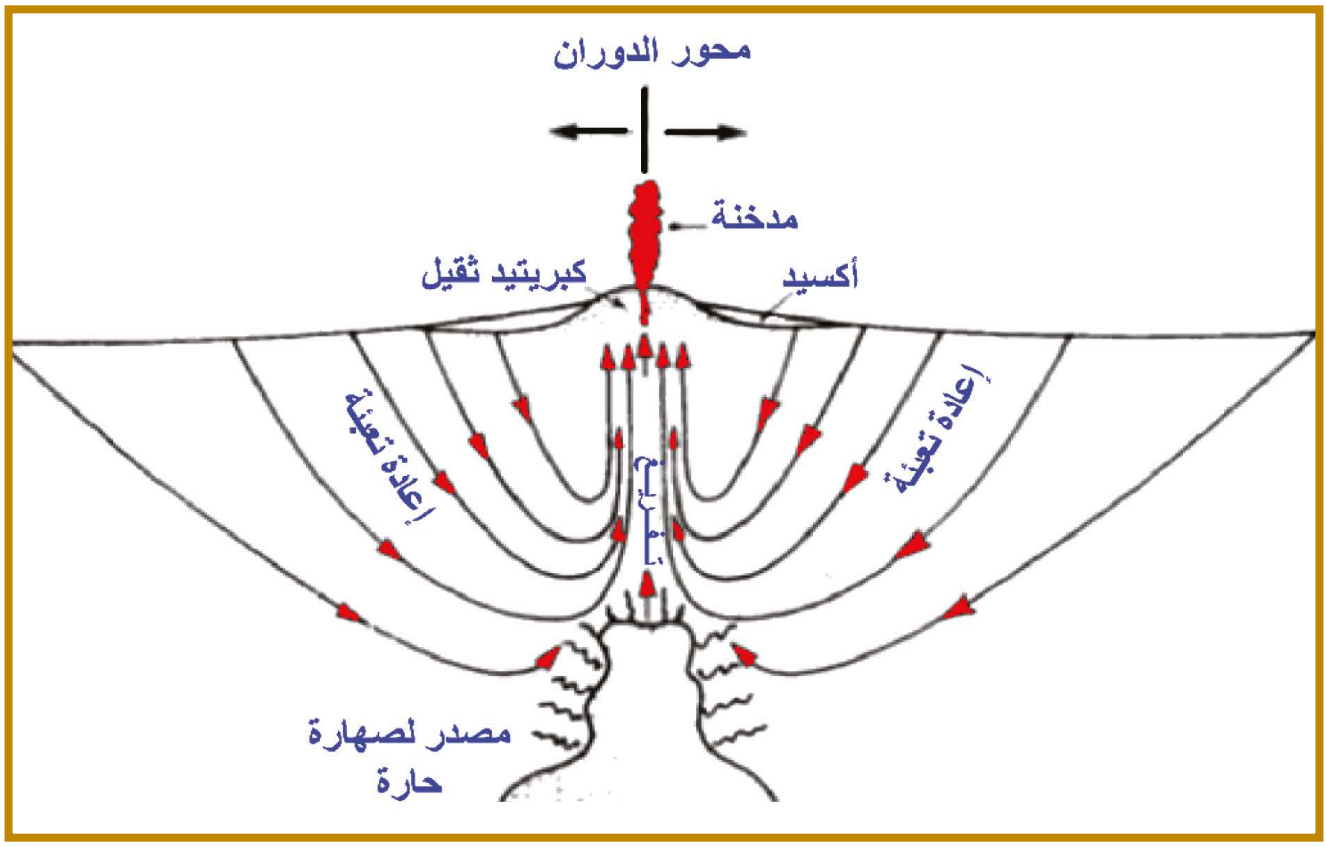
تحوي الأرض على أكثر من اثنتي عشرة صفائح محيطية في حالة تدفق تكتوني مستمر تقريبًا، وتتباعد وتتقارب وتتحول. يهتم الجيولوجيون البحريون بشكل خاص بحدود هذه الصفائح، حيث يحدث هنا جزء كبير من تكوين المعادن في قاع البحر. ومع ذلك، لم يتم استكشاف سوى نحو 1 % من هذه الحدود بشكل كاف. هناك ثلاثة أنواع من حدود الصفائح: المتحولة، والمتقاربة، والمتباعدة. ويرتبط كل نوع بعمليات فيزيائية تساعد في تكوين مجموعات معدنية معينة. سيتم التركيز هنا على الحدود المتقاربة، وموقع الاكتشافات الأخيرة

للكبريتيدات المتعددة المعادن، والخامات التي قد يكون لها أهمية كبيرة لمستقبل التعدين في قاع البحر.

## • الحـــدود المتقاربـــة

إن الصفائح المحيطية مدفوعة بقوى فيزيائية داخلية داخل الأرض لم يتم فهمها بالكامل بعد. يُعتقد أن هذه القوى تعتمد على ديناميكيات انتقال الحرارة بالحمل، حيث ترتفع الصهارة العميقة من الغلاف الموري نحو قاع البحر في مناطق وسط المحيط ثم تتراكم في الغلاف الصخري البازلتي المجاور والمبرد بالفعل. وتكون العملية مستمرة نسبيًا بحيث يتم إزاحة الغلاف الصخري المتكون حديثًا بعيدًا عن مركز الانتشار. وتصنف مراكز الانتشار هذه على أنها حدود متباعدة وتمتد لنحو 54000 كيلومتر حول العالم.

عندما تتحرك الصهارة إلى أعلى الغلاف الموري، فإنها تتلامس مع صخور الغلاف الصخري التي تحوي على مياه البحر. ومن خلال الشقوق الانكماشية والصدوع المستحثة تقنيًا، تتسرب مياه البحر إلى الأسفل والأفق من قاع البحر لتصبح جزءًا من نظام الحمل الحراري المنتشر. عندما تدور المياه عبر قاع البحر، فإنها تسخن وتتصل بالصهارة الموجودة بالأسفل. خلال هذه العملية، فإنه يأخذ في حل المعادن المعدنية. يتم بعد ذلك نقل هذه المحاليل الحرارية المائية إلى أعلى ليتم تفريغها من خلال فتحات نشطة («مداخن سوداء [أو بيضاء]») حيث يترسب الحديد وكبريتيدات المعادن الثقيلة (وكذلك الكبريت الأصلي) من المحلول (كما في الشكل الآتي).




نموذج دوران مياه البحر بمركز الانتشار (يوضح التفريغ وإعادة التعبئة والترسيب الضخم للكبريتيد ) (Earney, 2002).

مـع مـرور الوقـت، تقـوم هـذه الرواسـب ببنـاء منصـات وتـلال تعلوهـا فتحـات تشـبه المدخنـة، تحـوي علـى كبريتيـدات الزنـك والنحـاس والحديـد والفضـة والكوبالت والذهـب وغيرهـا. بعـض المداخـن، كمـا هـو الحـال في منطقـة مرتفعـات شـرق المحيـط الهـادئ الواقعـة جنـوب باجـا كاليفورنيـا (عنـد خـط عـرض 21 درجـة شـمالاً)، يصـل ارتفاعهـا إلـى 20 متـرًا وعرضهـا عـدة أمتـار. قـد ترتفـع الأعمـدة المنفوخـة عـدة مئـات مـن الأمتـار لتشـكل أكاسـيد مائيـة «تسـتقر ببـطء لتتراكـم كرواسـب معدنيـة» والتـي غالبًـا مـا تحـدث علـى طـول جوانـب التـلال الوسـطى للمحيـط.

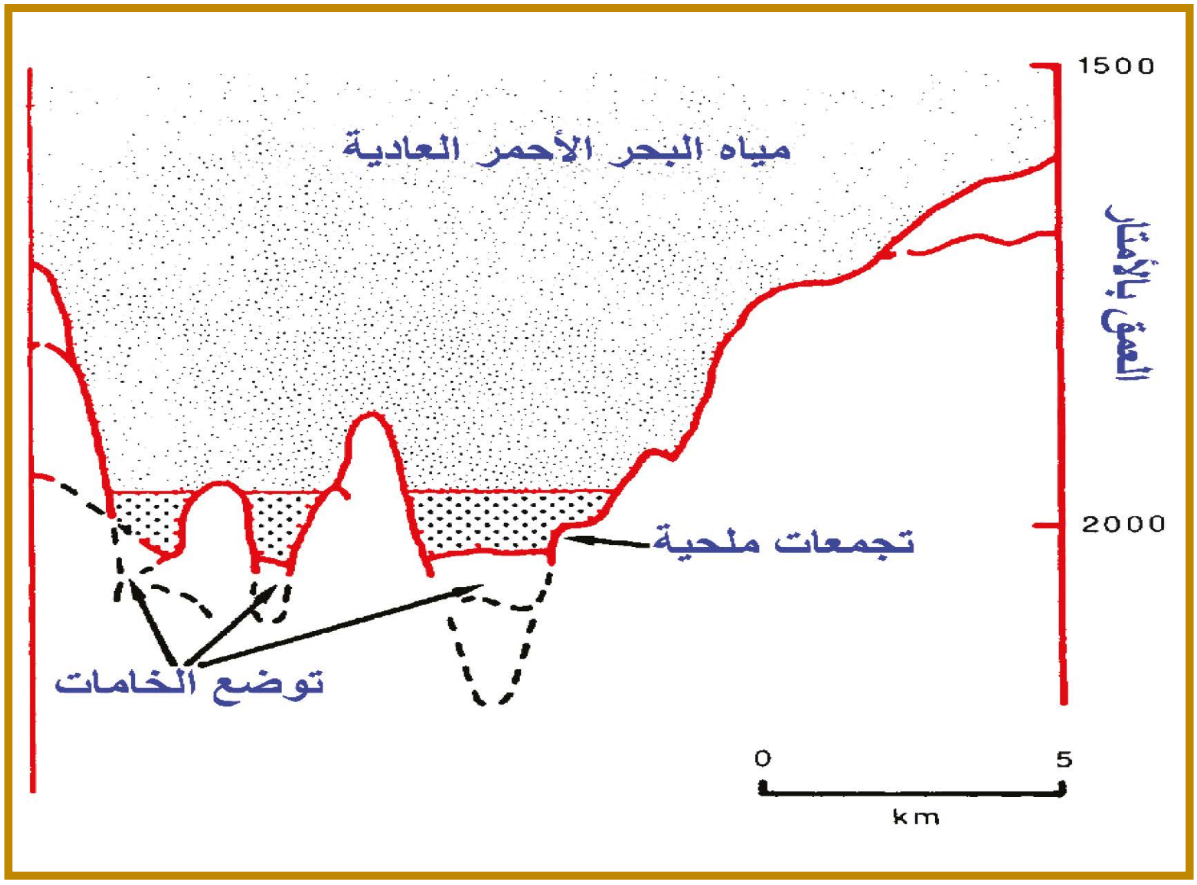
وتشير الأدلة حتى الوقت الحالي إلى أنه كلما زادت سرعة تباعد مركز الانتشار، زادت فرصة تنفيس المدخنة السوداء الحرارية المائية. حتى وقت قريب، لم يتم اكتشاف فتحات في المناطق ذات معدل انتشار (نصف معدل) أقل من 2 سم/عام، في حين أن تلك ذات معدل النصف < 2 سم/عام لديها بعض الفتحات وتلك ذات معدل النصف < 6 سم/عام غالبًا لديها الكثير.

ومع ذلك، أكد الباحث بيتر رونا، الذي كتب لمجلة التعدين البحرية في عام 1985، على أن المراكز بطيئة الانتشار (التي تشكل أكثر من 50 % من الحدود المتباينة) لا ينبغي استبعادها باعتبارها تفتقر إلى إمكانات التمعدن الحراري المائي. وفي العام نفسه، اكتشف فريق من العلماء الحكوميين والجامعيين بقيادة رونا أول تنفيس حراري مائي من نوع المداخن السوداء ورواسب معدنية ضخمة من الكبريتيد في موقع في الوادي المتصدع في سلسلة جبال وسط المحيط الأطلسي البطيئة الانتشار، بالقرب من خط العرض 26 درجة شمالاً، وخط الطول 45 درجة غربًا. أظهر هذا الاكتشاف أن مراكز الانتشار البطيء يمكن أن تحوي على «سلسلة كاملة من أنواع الرواسب المعدنية الحرارية المائية»، والتي لها أهمية للاستكشاف المستقبلي في مراكز أخرى بطيئة إلى متوسطة الانتشار مثل جوردا ريدج الواقعة داخل المنطقة الاقتصادية الخالصة التي يبلغ طولها 200 ميل بحري قبالة سواحل ولاية أوريغون وكاليفورنيا الأمريكية.

## • معـــادن منطقـــة البحـــر الأحمـــر

من الأمثلة الممتازة على مركز بطيء الانتشار عالي التمعدن هو صدع البحر الأحمر، الذي يقع بين شبه الجزيرة العربية السعودية والقارة الأفريقية. وفي حين أن الكثير من المحاليل الحرارية المائية الناشئة التي تدخل المياه فوق معظم مراكز الانتشار متفرقة، فقد أصبحت في البحر الأحمر شديدة التركيز، مما يجعل المنطقة مصدرًا محتملاً غنيًا بالمعادن. تحوي منطقة انتشار البحر

الأحمـر علـى متبخـرات بحريـة سـميكة تعلـو المحاليـل الحراريـة المائيـة الناشـئة. وتتشـكل المحاليـل الملحيـة السـاخنة والكثيفـة المحتويـة علـى معـادن أثنـاء مرورهـا عبـر هـذه المتبخـرات، وتصبـح محاصـرة (بسـبب كثافتهـا) في العديـد مـن الأحـواض التـي يصـل عمقهـا إلـى 2000 متـر. عندمـا تبـرد المحاليـل الملحيـة الناشـئة في الجـزء العلـوي منهـا وتتلامـس مـع ميـاه البحـر المغطـاة، تتشـكل الرواسـب وتسـتقر في قـاع الأعمـاق لتصبـح طينًـا معدنيًـا (كمـا في الشـكل الآتـي).




الرواسب الغنية بالمعادن الموجودة في أعماق البحر الأحمر (Earney, 2002)

بالإضافة إلى نشأة المعادن، يمكن أن تكون الحدود المتباعدة، في ظل ظروف معينة، موقعًا لتكوين الهيدروكربونات، كما يتضح من إنتاج النفط اليوم في

البحر الأحمر. وعندما يقتصر التباعد ضمن هوامش ضيقة جدًا، تصبح المادة العضوية محاصرة ومن ثم يتم دفنها بواسطة الرواسب القارية المجاورة. ومع التحول المناسب، قد تتطور الهيدروكربونات.

## • الحـــدود المتقاربـــة

عندما يخرج جزء من الصفيحة من خارج الغلاف الموري، فإن جزءًا آخر، حيث تقع القارة في طريقها، يعود (عن طريق الاندساس) إلى الغلاف الموري. تخلق هذه العملية ضغطًا وحرارة هائلين، مما يتسبب في ذوبان تدريجي لكل من الصفيحة المندسة وأجزاء من الصفيحة القارية المجاورة. عندما يتم دفع الصفيحة المندسة إلى الأسفل، فإن القشرة المحيطية التي تحوي على إثراءات معدنية مثل الكروم والفضة والذهب والنيكل والنحاس والزنك ومعادن مجموعة البلاتين قد تذوب، مع إعادة تركيز المعادن المعدنية في الصخور البركانية البركانية في قارة مجاورة مثل جبال الأنديز في غرب أمريكا الجنوبية أو سلسلة جزر بركانية مجاورة مثل اليابان والفلبين وإندونيسيا. في بعض الأحيان، قد يتم كشط أجزاء من البازلت المحتوي على المعادن من القشور المحيطية ودفعها إلى الأرض لتكوين الأفيوليت، كما هو الحال في جزيرة سيربوس حيث تم استخراج خامات النحاس منذ فترة طويلة.

وأخيـرًا، عندما تصبح الرواسب العضوية محاصرة ومدفونة ومتغيرة في الخنادق العميقة التي تشكلت أثناء الاندساس، يمكن أن تتطور الهيدروكربونات. على سبيل المثال، يوجد في عرض البحر في بيرو العديد من الحقول النفطية المتاخمة لمنطقة الاندساس الخاصة بها.

## • الحـــــدود التحوليـة

عندما تتحرك الصفائح بالتوازي مع بعضها البعض، قد يتطور تمعدن مماثل لما يحدث على طول حدود الصفائح المتباينة. ومع ذلك، فإن هذا التمعدن ليس عادة بنفس الحجم (Earney, 2002).

# التعدين في الفضاء الخارجي

يختلف إجراء عمليات التعدين على الكويكبات أو القمر أو المريخ في الفضاء الخارجي اختلافًا كبيرًا عن ممارسات التعدين القياسية على الأرض. تركز الحالة الأرضية على العثور على نتوء أو عينة أساسية لبعض المعادن الواعدة، ثم رسم خريطة للعرق المعدني أو الجسم في ثلاثة أبعاد.

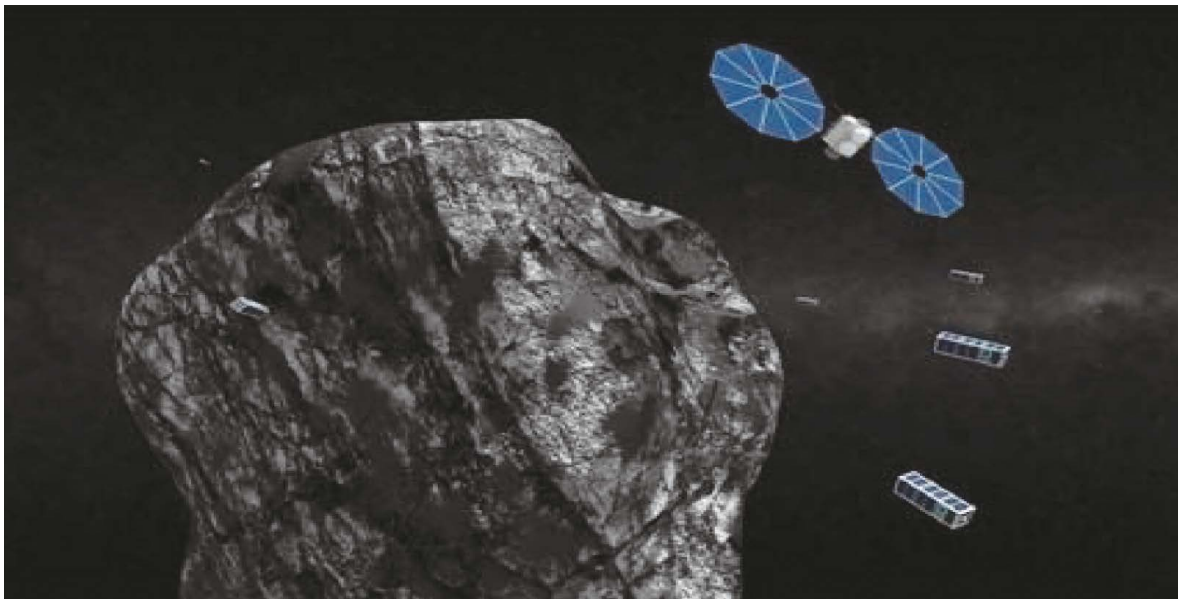
يتم تحليل (فحص) عينات من العرق لتحديد تركيزها، ويتم إنشاء نماذج تفصيلية لعملية التعدين لتحديد مقدار الكتل التي يجب حفرها للوصول إلى الجسم المعدني، وتكلفة التنقيب والنقل المحلي، وتكلفة نقل المعادن إلى موقع المعالجة، وإثراء المعدن المطلوب، وتكلفة استخراج العنصر المرغوبة من المعدن عبر العمليات الكيميائية. وقد تكون هناك حاجة إلى كواشف وأنواع وقود كيميائية معينة، مثل الهواء (الأكسجين) والماء ووقود الديزل والفحم، ويجب حساب التكاليف المرتبطة بها.

وأخيرًا، يجب تحديد تكلفة توصيل المنتج النهائي إلى موقع استخدامه. فقط إذا كانت الإيرادات من بيع المنتج تتجاوز بشكل كبير إجمالي تكاليف العملية، يمكن أن يكون الرواسب المعدنية مؤهلة لتسمى خامًا. الخام ليس معدنًا ذا قيمة محتملة؛ إنه معدن مربح بشكل واضح. سنتعرف في هذا الفصل على أحدث الأساليب التي تتبع في التعدين في الفضاء، وكيف يمكنه دعم احتياجات البشرية من المعادن في المستقبل.

## • الخامات على الكويكبات

يكمن أول الاختلافات العميقة بين تكنولوجيا التعدين الأرضية وتلك اللازمة لتعدين الكويكبات في تاريخ الأرض الطويل ككوكب مختلف تمامًا ويتم إعادة تدويره باستمرار.

لقد تم استخلاص عناصر السيدروفيل Siderophile (الأليفة للحديد المعدني) وعناصر الشالكوفيل Chalcophile (الأليفة للكبريت) بكفاءة في قلب الأرض، وتركزت سيليكات الحديد والمغنيسيوم الكثيفة في الوشاح، كما تم صهر البقايا المنخفضة الكثافة والغنية بالمواد المتطايرة والغنية بالمعادن القلوية والسيليكا. أما الماء والعناصر الأخرى غير المتوافقة فإنها تطفو إلى الأعلى لتشكل القشرة والمحيطات والغلاف الجوي.

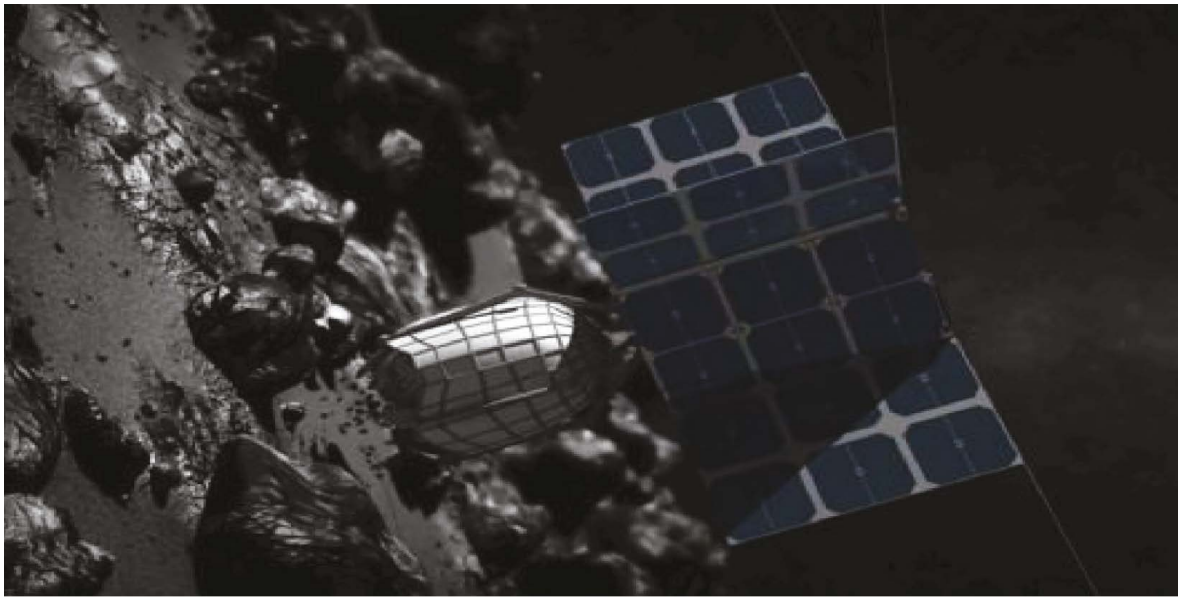


توفر السفينة الأم للكويكب CubeSats التي تقدمها DSI العديد من CubeSats منخفضة التكلفة لإجراء تحقيقات مشتركة لاستكشاف الكويكبات القريبة من الأرض. (Lewis, 2015)

توجد العديد من المعادن «الثمينة» و«الاستراتيجية» بكميات صغيرة في القشرة، ويرجع ذلك أساسًا إلى التراكم المتأخر للمواد الكويكبية بعد أن تكون القشرة قد تشكلت بالفعل؛ الغالبية العظمى من محتوى الأرض من هذه العناصر موجودة في القلب.

عـادةً مـا يحـدث تمعـدن الخـام في قشـرة الأرض بسـبب تأثيـر المـاء السـاخن، وأحيانًـا فـوق الحـرج والـذي يذيـب المعـادن وينقلهـا وترسـبها بشـكل انتقائي. ويحدث الترسـيب المعدنـي في كثيـر مـن الأحيـان علـى طـول الشـقوق في صخـور الريـف أو عنـد الفتحـات البركانيـة أو الحراريـة المائيـة. مـن الشـائع جـدًا أن تكـون هـذه العـروق رفيعـة وغيـر منتظمـة الشـكل ويصعـب رسـم خرائـط لهـا، وتتجـول عبـر أجسـام الصخـور الناريـة الصلبـة.

الظـروف علـى الكويكبـات مختلفـة تمامـا. مـن الواضـح أن معظـم النيـازك لـم تـذوب ولـم تتمايـز أبـدًا. فقـط كوندريتـات CI هـي التـي تقـدم الدليـل علـى انحـلال وهجـرة وترسـب عـروق المعـادن: هـذه هـي العـروق البيضـاء الرقيقـة لمعـادن الكربونـات والكبريتـات التـي تمـر عبـر أحجـار CI.



ستختار مركبة DragonFlies الصخور الصغيرة الواعدة والصخور والثرى لإعادتها إلى الأرض لإجراء تحليل مكثف (Lewis, 2015).

تتطلب التركيبات النظائرية لمركبات الكبريت في هذه النيازك أن يحدث الماء السائل عند درجة حرارة قريبة أو أقل من 0 درجة مئوية، وفي وجود عامل مؤكسد. عند درجات الحرارة المنخفضة هذه، يكون عدد قليل من المعادن قابلاً للذوبان بدرجة كافية ليتم نقلها وتركيزها عن طريق النقل المائي. ولذلك فمن السهل أن نرى أن المفهوم الأرضي المتمثل في العثور على العروق ومتابعتها لا ينطبق بشكل عام على الكويكبات. إن الميزة العظيمة للحالة البدائية للكوندريت هي أن المواد الثمينة والاستراتيجية لم يتم استخراجها وإخفائها عن الأنظار أو الوصول إليها. إن النسبة الصغيرة من الكويكبات والنيازك التي هي نتاج الذوبان والتمايز عانت في الغالب من اصطدامات مدمرة تركت قطعًا كبيرة (والتي يمكننا بعد ذلك وصفها بالكويكبات الصغيرة) من المواد الأساسية والوشاح وحتى القشرة الأرضية، والتي تعد مصادر معظم الحديد والحديد الحجري والكوندريت.

على سبيل المثال، فإن الكوندريتات، دون أي مساعدة من المعالجة الحرارية المائية، تقارب التركيب الكيميائي لكوكب أرضي بكامله: يتم خلط النواة والوشاح والقشرة والمواد المتطايرة (في الكوندريت C) معًا دون فرصة للتمايز. وبالتالي فإن تركيزات المعادن الثمينة والإستراتيجية في أي قطعة عشوائية من أي كويكب كوندريتي عشوائي تكون أعلى منها في أغنى أجسامها الخام المعروفة الموجودة على الأرض.

## • الهبـــوط على الكويكبـــات

تلتقـي المركبـات الفضائيـة بشـكل روتينـي وتلتحـم مـع بعضهـا بعضًـا. يعـود تاريـخ تطويـر هـذه التقنيـات إلـى بعثـات جيمينـي وسـويوز المبكـرة (ومركبـة سـويوز الفضائيـة غيـر المأهولـة التـي تتنكـر في هيئـة مركبـة فضائيـة «للبحـث العلمـي» مـن سلسـلة كوزمـوس) في أواخـر السـتينات. تجميـع وتشـغيل المحطتـين الفضائيتـين سـاليوت وميـر السـوفييتيتين مـع زوارهمـا سـويوز وبروجـرس، والبعثـات القمريـة المأهولـة لبرنامـج أبولـو الأمريكـي، اعتمـدت علـى الالتقـاء المـداري والالتحـام. فهـل يمكننـا أن نسـتنتج أن الهبـوط علـى كويكـب لـن يكـون أمـرًا مميـزًا؟ لا.

بـادئ ذي بـدء، تضمنـت عمليـات الالتقـاء والالتحـام خـلال العقـود الماضيـة مركبـات خاضعـة للرقابـة تتفاعـل بشـكل تعاونـي للحفـاظ علـى مواقعهـا وتوجهاتهـا النسـبية. سـتكون إحـدى المركبـات الفضائيـة بمثابـة هـدف ثابـت بينمـا تقـوم الأخـرى بالمنـاورة بنشـاط لإحـداث الالتقـاء والالتحـام. حملـت كلتـا المركبتـين الفضائيتـين محـولات إرسـاء وأجهـزة متخصصـة لتمكينهمـا مـن القفـل بإحـكام مـع ختـم محكـم الغلـق. ومـع ذلـك، فـإن الكويكبـات ليسـت خاضعـة للتحكـم ولا متعاونـة، ومـن المؤسـف أنهـا تفتقـر، علـى الأقـل في الوقـت الحالـي، إلـى محـولات الالتحـام. قـد تكـون بعـض المناطـق عبـارة عـن مسـاحات كبيـرة مـن الفـولاذ المقـاوم للصـدأ؛ والبعـض الآخـر قـد يكـون عبـارة عـن حطـام عميـق ومعبـأ بشـكل فضفـاض يحـوي علـى صخـور مـن جميـع الأحجـام، وقـد يكـون بعضهـا هشًـا جـدًا وغيـر مسـتقر «القـلاع الخياليـة» مـن الغبـار الناعـم. بالإضافـة إلـى ذلـك، تـدور الكويكبـات وفقًـا لجدولهـا الزمنـي الخـاص، وهـو مـا لا يتوافـق مـع إرشـادات المهمـة المخطـط لهـا مسـبقًا.

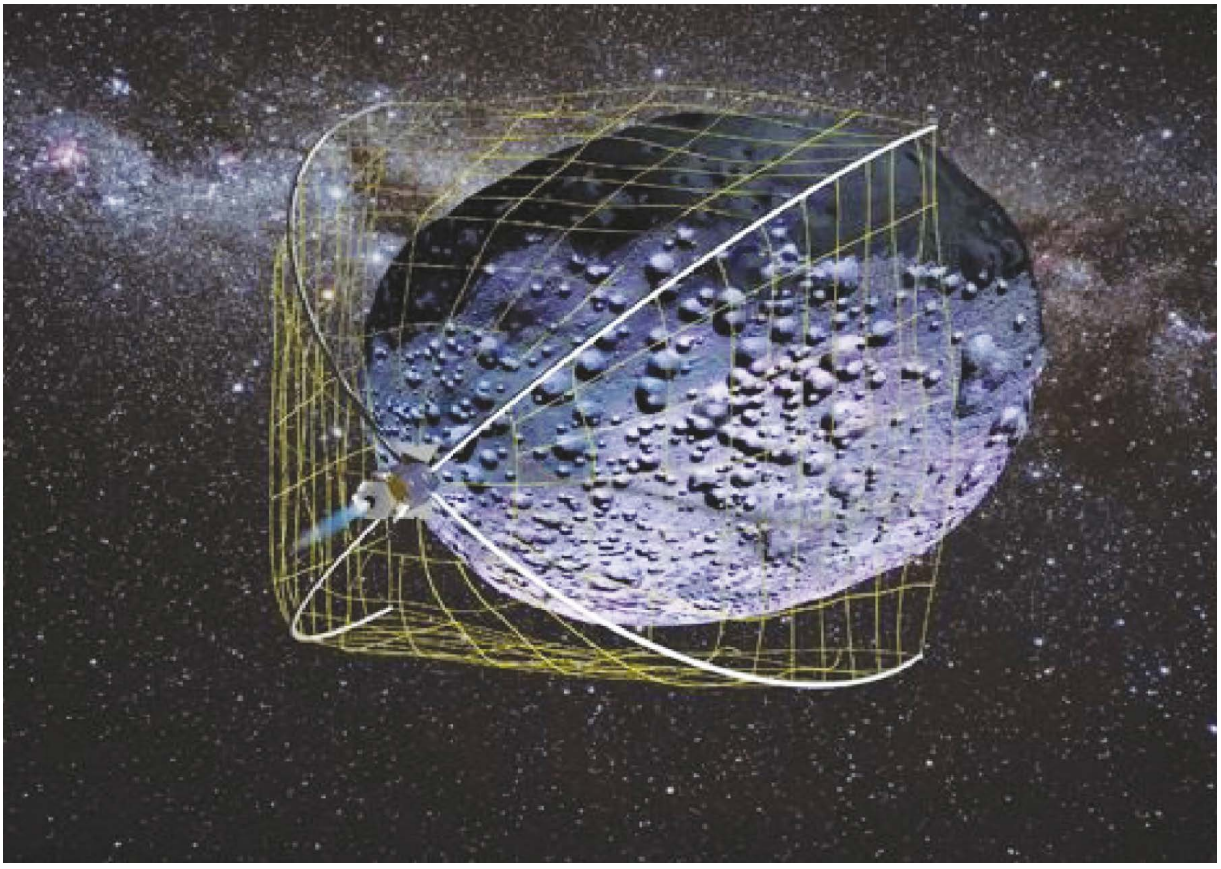
الغالبيـة العظمـى مـن الأجسـام القريبـة مـن الأرض، تلـك التـي يقـل قطرهـا عـن 100 متـر، هـي شـظايا تصـادم تم إنتاجهـا في الأصـل في أحـداث تصـادم مدمـرة عنيفـة. غالبًـا مـا تكـون فتـرات التنـاوب لديهـا بضـع دقائـق. والعديـد منهـا غيـر

منتظم الشكل لدرجة أنها تشترك في حركات متقلبة لا يمكن وصفها من حيث الدوران حول محور واحد محدد جيدًا. مثل هذه الكويكبات الصغيرة معرضة أيضًا لتأثيرات ضغط الإشعاع الشمسي المباشر (تأثير بوينتنغ-روبرتسون Poynting-Robertson Effect) والقوى الناتجة عن الانبعاث غير المتماثل للطاقة الحرارية (تأثير ياركوفسكي Yarkovsky Effect)، لذا فإن التعرض الطويل لأشعة الشمس قد لا يؤثر فقط على حركتها المدارية، ولكن أيضًا كأنك قمت بتدويرها مثل دواليب الهواء في مهب الريح.

يمكن للأجسام الصغيرة التي تدور بسرعة أن تصل إلى معدلات دوران عالية جدًا بحيث لا تكون الجاذبية الضعيفة للكويكب كافية لتجميعها معًا. في الواقع، أي جسم صخري تستغرق فترة دورانه أقل من نحو ساعتين (اعتمادًا على كثافة الجسم) تكون سرعة دورانه «استوائية» أكبر من السرعة المدارية.

إن حقيقة أننا نرى عددًا كبيرًا جدًا من الكيانات الجديدة الصغيرة التي تدور بسرعة قد اقترحت للعديد من المراقبين أنها يجب أن تكون «متراصة» قوية. ومع ذلك، فإن حساب قوة الشد المطلوبة للحفاظ على تماسك الجسم ضد اضطراب الدوران يكشف أنه حتى درجة متواضعة من «الالتصاق» ستكون كافية للحفاظ على سلامة الجسم. يمكن توفير هذا التماسك عن طريق قوى الاستقطاب، حيث تصطف الشحنات + و– الأيونية على سطح حبة واحدة مع أو تحفز الشحنات التكميلية – و+ على سطح حبة مجاورة، مما يؤدي إلى قوة جذب صافية صغيرة تسمى قوة فان دير فالس.

وبالتالي، فحتى الكويكب المكون من كومة من الركام والذي يدور لمدة بضع دقائق قد يتماسك معًا بفضل هذه اللزوجة الطبيعية. لدينا خبرة مع الكثبان الرملية على الأرض، والتي غالبًا ما تصل إلى منحدرات شديدة الانحدار وغير مستقرة بسبب نقل الحبوب عن طريق الرياح، ومن الطبيعي أن نتصور المنحدرات الشديدة على الكويكبات على أنها غير مستقرة وغادرة.



**إحدى التقنيات المقترحة لالتقاط كويكب صغير وإيقافه عن الدوران، حيث يتم الإمساك به بوساطة هيكل شبكي خفيف الوزن (Lewis, 2015).**

لكن حبيبات الرمل على الأرض تنزلق بسهولة لأن نقاط الاتصال الخاصة بها يتم تشحيمها بالهواء، وهي سلعة غير موجودة في الكويكبات. هناك أسباب أخرى لعدم الخوف من دفن مركبتك الفضائية بسبب الانهيارات الأرضية على الكويكبات: إن تسارع الجاذبية على سطح كويكب قطره 100 متر، على سبيل المثال، سيكون نحو 0.1 ملم/ثانية$^2$، مما يجعل الانهيار الأرضي (حتى لو لم تكن هناك قوى مقاومة فان دير فالس) بطيئًا جدًا بحيث يكون مملًا تمامًا.

أما بالنسبة للدوائر السريعة الصغيرة، فإن الوضع أقل تهديدًا: على كامل سطح الكويكب تقريبًا، فإن أي انهيار أرضي يحدث عن غير قصد بواسطة مركبة الهبوط سوف ينتقل إلى الأعلى (ويهرب)، وليس إلى الأسفل على مركبة الهبوط. في الواقع، يجب أن تكون مركبة الهبوط نفسها مثبتة لإبقائها على الكويكب. تمتلك الأجرام الصغيرة سريعة الدوران طاقة دوران إجمالية قليلة بسبب صغر كتلتها وسرعة دورانها: كويكب قطره 10 أمتار (محيطه 30 مترًا) مع فترة دوران مدتها 10 دقائق تبلغ سرعة دورانه عند خط الاستواء 3 متر / دقيقة، أو 5 سم/ ثانية فقط.

## • العمليـــات التعدينيـــة على الكويكـــب

يتم تحديد البيئة السطحية للكويكب من خلال الفراغ الشديد والجاذبية المنخفضة جدًا. يمتلك كويكب نموذجي يبلغ قطره كيلومترًا واحدًا جاذبية سطحية تبلغ نحو 0.3 ملم/ثانية$^2$ (0.00003 مرة تسارع الجاذبية الأرضية) وسرعة الهروب تبلغ نحو 1 متر/ثانية (تقاس الجاذبية السطحية كحاصل ضرب نصف القطر في الكثافة؛ وتقاس سرعة الإفلات كحاصل الضرب نصف القطر مضروبًا في الجذر التربيعي للكثافة). يعد الهبوط على كويكب والإقلاع منه أمرًا سهلًا؛ في الواقع، المشكلة الأكبر هي تجنب الخروج غير المقصود الناجم عن قوى رد الفعل المتمثلة في التحرك والحفر وما إلى ذلك.

فالغلاف الجوي على الكويكب لن يوفر موردًا «قابلا للتعدين» فحسب؛ يمكن استخدامه أيضًا في التقاط الهواء والكبح الجوي. لكن لا يوجد جو مقيم دائم على الكويكب: تتراوح السرعة الحرارية لجزيئات الغاز عند درجات حرارة سطح الكويكب من نحو 1 كم/ثانية للغازات الخفيفة مثل الهيدروجين والهيليوم إلى نحو 100 متر/ثانية للغازات الثقيلة مثل الزينون أو سداسي فلوريد الكبريت.

نظرًا لأن هذه السرعات الحرارية تتجاوز بكثير سرعة الهروب للكويكب، فإن أي غاز ينطلق من داخل الكويكب أو عن طريق حدث تصادم، أو يتم تنفيسه بواسطة مركبة فضائية متسربة، سوف يتسرب فورًا إلى الفضاء. وهناك سوف يتأين الغاز سريعًا بواسطة الأشعة الشمسية فوق البنفسجية، وسيتم اجتياح الأيونات خارج النظام الشمسي بواسطة المجال المغناطيسي في الرياح الشمسية بسرعة عدة مئات من الكيلومترات في الثانية.

وبطبيعة الحال، فإن عملية التعدين ستعتبر أي غازات قد تطلقها بمثابة سلع ثمينة، تستحق الحفاظ عليها بعناية وعدم إطلاقها بلا مبالاة في الفضاء. إذا كانت احتمالية حدوث «تلوث صناعي» خطير بالغازات منخفضة جدًا، فماذا عن التلوث الغباري؟ إن الغبار الناتج عن أنشطة التعدين بسرعات أقل من سرعة هروب الكويكب سوف يتساقط قريبًا، في غضون 100 دقيقة أو أقل عادة، على سطح الكويكب. أي غبار يتسرب سوف يدخل مدارًا حول مركز الشمس، ويخضع للتأثيرات طويلة المدى لقوة بوينتنغ-روبرتسون، وفي النهاية يتجه نحو الشمس. سيتطلب الأمر برنامجًا مكثفًا لتعدين الكويكبات حتى البدء في التنافس مع المصادر الطبيعية للغبار الناتج عن اصطدامات الكويكبات ونشاط المذنبات. من الواضح أن العمليات التي تنطوي على محركات الاحتراق الداخلي لا علاقة لها بالجسم الذي لا يوفر الوقود ولا الهواء. يجب توفير الطاقة الميكانيكية كهربائيًا من مصادر مثل البطاريات أو الخلايا الشمسية أو مولدات الطاقة الشمسية الديناميكية أو المفاعلات النووية.

هناك تحديات (غير متكافئة) لجميع هذه الأساليب: البطاريات مناسبة فقط للاستخدام على المدى القصير، وتصبح ضخمة جدًا، وبسبب تكاليف الإطلاق، باهظة الثمن بشكل لا يمكن تحمله لفترات استخدام أطول من بضعة أيام. إن المفاعلات النووية مدمجة وقوية، ولكنها تثير غضب أنصار حماية

البيئة الذين ينظرون إليها وكأنها تشيرنوبيل صغيرة على وشك أن تسقط على رؤوسنا. إن أولئك الذين يتذكرون السقوط غير المنضبط للقمر الصناعي السوفييتي لمراقبة المحيطات كوزموس 954 الذي كان يعمل بالمفاعل النووي في كندا في عام 1978، لديهم أسباب للقلق.

باختصار، إن إمدادات الطاقة النووية، على الرغم من المزايا التشغيلية التي تتمتع بها، وبغض النظر عن سلامة التصاميم الحديثة، غير ممكنة من الناحية السياسية. هناك أيضًا اعتبار طويل المدى بأن المفاعلات النووية في الفضاء ليست موردًا متجددًا: تعتبر الكويكبات، التي تخلو من أي خامات ذات صلة، مصادر رهيبة لليورانيوم والثوريوم، مما يجعل إعادة التزود بالوقود في الفضاء لمفاعل أو مولد كهربائي حراري للنظائر المشعة Radioisotope (RTG) Thermoelectric Generator مستحيلًا.

وهكذا يتبقى لدينا الطاقة الكهربائية المشتقة من الطاقة الشمسية. تتمثل مزايا مصدر الطاقة هذا في أنه خفيف ونظيف وله عمر استخدام طويل. وعلى الرغم من أن الخلايا الشمسية تتحلل على مدى عقود من الاستخدام، إلا أن هناك احتمال أننا، على نفس النطاق الزمني، قد نتقن فن استخلاص عناصر أشباه الموصلات وتصنيع الخلايا الشمسية من المعادن المشتقة من الفضاء.

العيب الرئيسي للخلايا الشمسية ينشأ من الحاجة إلى العمليات على مسافات كبيرة من الشمس، حيث تكون شدة ضوء الشمس منخفضة. في الحزام الخارجي، على بعد 3.2 وحدة فلكية من الشمس، تكون شدة ضوء الشمس أقل بعشر مرات مما هي عليه في مدار الأرض، بالقرب من 130 واط لكل متر مربع، مقارنة بـ 1350 واط / متر مربع عند الأرض. يمكن تعويض هذه المشكلة جزئيًا باستخدام مرايا معدنية ذات أغشية رقيقة خفيفة الوزن جدًا

لالتقاط ضوء الشمس وتركيزه على الخلايا الشمسية. إن محطة المعالجة التي تسير في منطقة قريبة من الأرض من 1 وحدة فلكية (الحضيض الشمسي) إلى 3.2 وحدة فلكية (الأوج) وتعود إلى كل مدار حول الشمس يجب أن تتكيف مع هذا الاختلاف الدوري الكبير في كثافة الطاقة الشمسية.

أي تركيب على سطح كويكب يحفر في السطح يجب أن يتم تثبيته بطريقة ما، خشية أن تنقلب قوة رد الفعل الناتجة عن الحفر، أو التحرك، أو إطلاق المنشأة إلى الفضاء. هناك العديد من الأفكار حول كيفية تثبيت مركبة الهبوط على سطح كويكب صغير، ولم يتم اختبار أي منها عمليًا بعد.

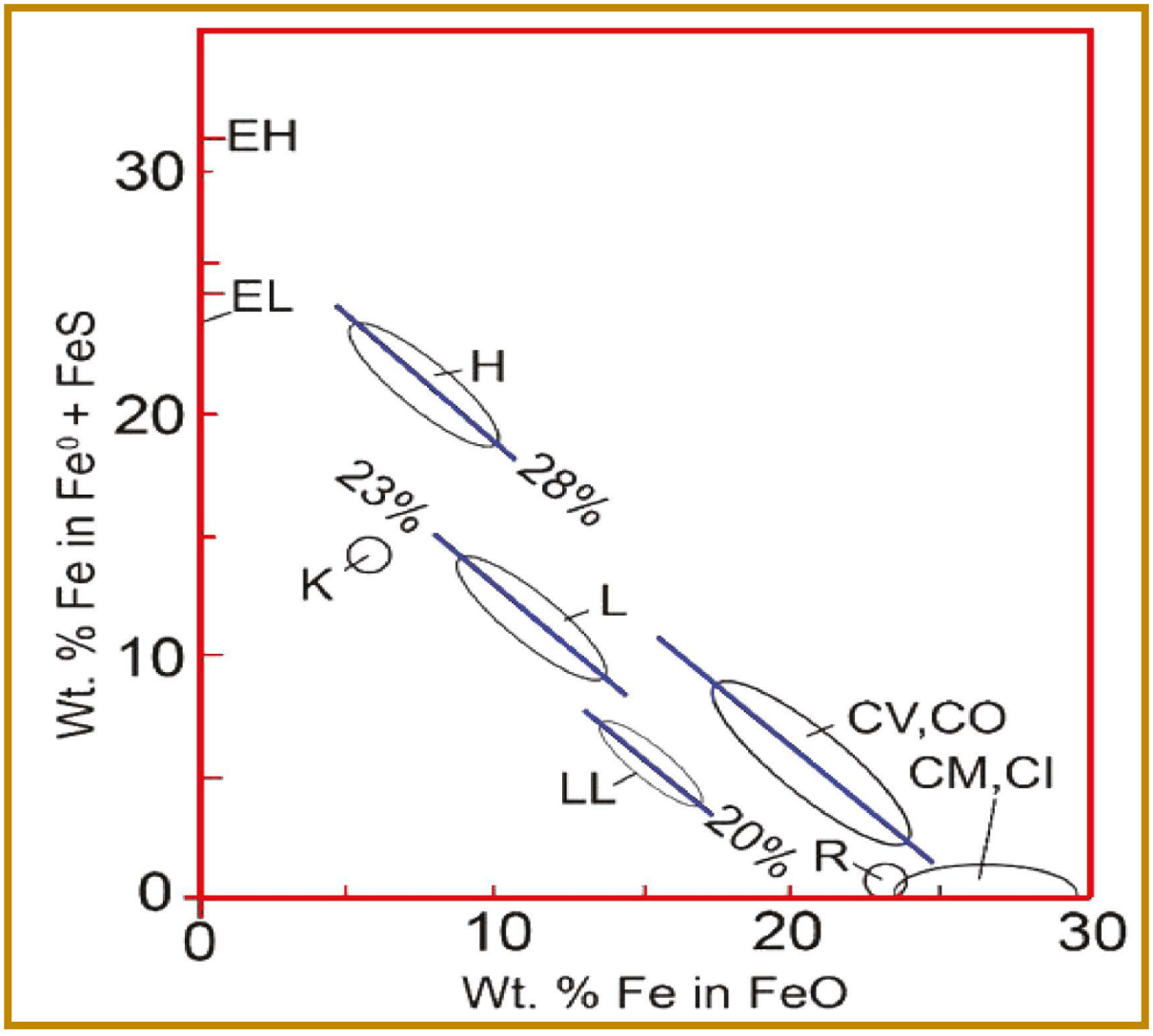
تتطلب مهمة التعدين تثبيتًا آمنًا على السطح بأي من الوسائل المتعددة. أولًا، يمكن «توتيد» كويكب صغير بواسطة أداة اختراق صغيرة متصلة بحبل طويل وخفيف. سيؤدي دوران الكويكب إلى لف الحبل على طول الطريق حول الكويكب، حيث يتم سحب المركبة الفضائية إلى السطح بواسطة الحبل حتى تتمكن المركبة من العثور على الطرف السفلي من الحبل والتعامل معه، بالقرب من موقع الاختراق. ويمكن بعد ذلك أن يخضع الحبل لعملية «شد الحزام» لتأمين النظام على الكويكب. يعتمد نجاح أجهزة الاختراق على الخصائص الفيزيائية للسطح: فالسطح القوي جدًا من شأنه أن يمنع الاختراق ببساطة؛ السطح الضعيف جدًا قد يسمح بالاختراق ولكنه يمنع التثبيت الآمن. هناك أيضًا قلق من أن المركبة قد ترسو على حطام معدني ضعيف جدًا، وهي طبقة غبار تفتقر إلى قوة الشد وغير قادرة على تثبيت المركبة الفضائية في مكانها. كما تم اقتراح استخدام «شبكة الفراشة» ذات الشبكة العريضة، ولكنها تبدو عملية فقط بالنسبة للكويكبات الصغيرة جدًا بسبب محدودية الكتلة. ومن الواضح أن المزيد من التفكير والتجريب حول هذه المفاهيم أمر سليم.

## • التعديـــــن على الكويكـــــب

لقد خلصنا بالفعل إلى أن التعدين في الوضع الأرضي المعتاد، أي حفر الأنفاق أو إزالة الأثقال لتتبع العرق المعدني، نادرًا ما يكون ذا صلة بتعدين الكويكبات أو لن يكون له أي صلة على الإطلاق. بسبب التباين التركيبي الواسع والاختلافات الهائلة في القوة بين مجموعات النيازك المختلفة وعائلات الكويكبات المقابلة لها، فإن تقنيات التعدين المناسبة تختلف تبعًا لذلك. لقد أوضحنا أنه، من وجهة نظر تركيبية صارمة، تتمتع الكوندريتات الكربونية بأغنى مزيج من الموارد. إذا لم تكن المواد المتطايرة هي هدفنا الرئيسي، فإن الكوندريتات العادية هي خيار واضح لأنها تحوي على جميع العناصر غير المتطايرة بنسب شمسية (كونية) تقريبًا. وكميزة إضافية، من السهل نسبيًا سحق الكوندريتات العادية (يلزم ضغط بضع مئات من البارات)، والكوندريتات الكربونية هي الأسهل من بين جميع فئات النيازك التي يمكن سحقها (1 إلى 10 بار يكفي للكوندريتات CI وCM).

تغطي المادة المكسرة مسبقًا، والتي تسمى الثرى، أسطح الكويكبات الأكبر حجمًا، وتتوفر في بعض الأحيان على الكويكبات الصغيرة التي تتعرض عمومًا لتآكل تصادمي شديد. وبشكل عام يعد سحق الصخور الصلبة عملية صعبة مما يضع ضغطًا شديدًا على المعدات الميكانيكية. ومن المفيد أن نحاول تجنب المخططات التي تعتمد على سحق الصخور الصلبة.

يعد تعدين الأكوندريت بشكل عام أقل أهمية بشكل واضح. وجميعها تقريبًا (باستثناء اليوريليت) فقيرة متطايرة، وتحوي فقط على آثار صغيرة جدًا من المعدن الحر. فهي ليست فقيرة بالموارد فحسب، بل إنها قوية جدًا باعتبارها صخورًا نارية. من بين جميع فئات الكويكبات.




**الاتجاهات التركيبية في الكوندريتات. مخطط Urey-Craig لوفرة الحديد المخفض (المعدن بالإضافة إلى FeS) مقابل الحديد المؤكسد في الكوندريت. تتوافق الخطوط القطرية للانحدار 1- مع إجمالي محتوى الحديد الثابت؛ تشير H إلى مجموعة الكوندريت عالية الحديد، وL إلى مجموعة الحديد المنخفض، وLL هي مجموعة الحديد المنخفض-المنخفض. تتجمع كوندريتات CI وCM وCV وCO وكوندريتات R المتشابهة تركيبيًا (الخالية تقريبًا من المعادن) معًا؛ تقع الكوندريتات E المخفضة بشدة بالقرب من 0 % FeO (عادةً <0.03 %) (Lewis, 2015).**

فإن نوع V وأنواع الأكوندريت الأخرى لها أكبر تشابه مع البازلت القمري أو الخبث الذي يتم التخلص منه في عمليات معالجة المعادن على الأرض. وقد يتبادر إلى الذهن أحد عوامل الجذب المتخصصة في المواد الأكوندريتية: يحوي اليوريليت على ما يصل إلى 1 % من الماس الأسود الصغير (الكربونادو)، وهو مادة كاشطة صناعية فائقة. ومن الممكن تصور أن هذا الماس يستحق العودة به إلى الأرض، ولكن من المرجح أن يتم العثور على استخدام له في الفضاء. يلفت وجود اليوريليت الانتباه أيضًا إلى الصعوبات المحتملة لسحق وطحن الصخور التي تحوي على مواد أقوى من معدات الطحن لدينا.

يمثل تعدين الكويكبات نوع M تحديات هائلة. الكويكبات M الكبيرة، وبعضها عبارة عن نوى مجردة من الكويكبات الكبيرة التي واجهت تصادمات كارثية، قد تقدم لنا كتلًا معدنية متراصة مستعصية على الحل بأبعاد عشرات الكيلومترات.

المعدن قوي جدًا يتحدى التكسير والحفر والقطع والكسر. ومع ذلك، هناك جانب مثير للاهتمام في الكويكبات M يجب أن نأخذه في الاعتبار: قد تصبح الجوانب الليلية للكويكبات M في حزام الكويكبات الداخلي باردة بدرجة كافية لانخفاضها إلى ما دون درجة الحرارة الانتقالية الهشة والمرنة للسبيكة المعدنية.

تحت درجة الحرارة هذه (التي تعتمد على التركيب) قد يؤدي حدث الاصطدام إلى تحطيم المعدن مثل الزجاج، مما يفتح احتمال أن تحوي بعض هذه الكويكبات M على حطام يتكون من الغبار والحبوب وكتل أكبر من الفولاذ المقاوم للصدأ. سيكون من السهل جمع هذه المواد وحجمها مناسب للمعالجة. ومع ذلك، فإن الأجسام القريبة من الأرض من النوع M، عادة ما تكون أقرب إلى الشمس من الحزام، ومن غير المرجح أن تصبح باردة بدرجة كافية لتتحطم. لكن أنشطة التعدين الأولية على الكويكبات من المرجح أن تتضمن

جمع الثرى الكوندريتي على المناطق القريبة من الأرض من الفئة S أو Q. يحوي الثرى الكوندريتي العادي، مثل الكوندريت نفسه، على كميات وفيرة من الزبرجد الزيتوني، والبيروكسين، والكاماسيت، والتينيت، والترويليت، والفلسبار بلاجيوجلاز.

عامل الجذب الرئيسي هنا هو المعادن الحديدية، وخاصة الحديد والنيكل. يحوي الثرى الكوندريتي الكربوني، الخالي من المعدن، على مادة عضوية ومعادن طينية ومغنتيت، مما يجعل الماء والمواد المتطايرة الأخرى عامل الجذب الرئيسي، ولكنه يسمح أيضًا باستخراج المعادن الحديدية من الأكاسيد والكبريتيدات. تجدر الإشارة إلى أن الكويكبات من النوع S هي بالتأكيد عينة غير متجانسة من عدة أنواع نيزكية متنوعة، بما في ذلك كل من الكوندريت والأكوندريت فقيرة الموارد. سيكون من المخيب للآمال بشدة إرسال مهمة باهظة الثمن لتعدين المعادن إلى كويكب من نوع كوندريت عادي، فقط لنكتشف عند الوصول أنه عبارة عن كويكب من نوع أكوندريت خالٍ من المعادن.

## • إثـــراء المعـــادن

إن إثراء المعدن Mineral Beneficiation يعني ببساطة تركيزه. هناك اعتباران منفصلان مرتبطان بالإثراء: كفاءة جمع المعدن المطلوب، والدرجة التي يمكن بها فصل الشوائب غير المرغوب فيها عنه. المعادن المشتقة من الصخور المتعددة المعادن المسحوقة، سواء تم سحقها بواسطة آلة أو من خلال العمليات الطبيعية، عادة ما تحوي على أجزاء من معادن أخرى مرتبطة بها بقوة. لإنتاج مركز معدني للمعالجة، سنستفيد كثيرًا من الحاجة إلى درجة عالية من تحرير الحبوب المعدنية؛ في الواقع تحريرها من الشوائب عديمة الفائدة.

إن مشكلة تحضير المعادن المنفصلة النقية موجودة في كل مكان؛ في الواقع، المشكلة أسوأ على القمر، حيث تولد التأثيرات العنيفة نسبة كبيرة من القطرات المنصهرة. ونظرًا لأن تسارع جاذبية القمر أكبر بآلاف المرات من تسارع كويكب يبلغ قطره كيلومترًا واحدًا، فإن هذه القطرات لا تضيع في الفضاء، ولكن يتم إعادة تراكمها بكفاءة على سطح القمر. تلتحم قطيرات التبريد هذه بأي شيء تلمسه، منتجة هياكل معقدة معدنيًا تسمى الملزنات Agglutinates، وهي تشكيلة عشوائية من جزيئات الصخور التي يتم لحامها معًا بقوة بواسطة الزجاج الذي يتكون من التبريد السريع لقطرات الذوبان. حتى في منطقة القمر الغنية بالمعادن المرغوبة، مثل أحواض البحيرات التي تحوي على نسبة كبيرة من الإلمنيت، فإن المواد المتراكمة تربط الكثير من الإلمنيت في جزيئات مركبة كبيرة يمكن من خلالها تحرير الإلمنيت النقي بشكل معقول (أو أي معدن آخر) ليس عملي.

يتضمن فرز المعادن نوعين أساسيين من التمييز: التمييز الذي يعتمد على ما يسميه علماء الديناميكا الحرارية الخصائص «المكثفة» للمعدن (التركيب الكيميائي، والمغناطيسية، والكثافة، وما إلى ذلك) التي تعكس خصائصه الجزيئية الداخلية، والخصائص «الواسعة» (الحجم والكتلة والمساحة) التي تعكس مدى الجزيئات. لكن جميع أنواع الإثراء تنطوي على لعب قوتين من قوى الطبيعة ضد بعضهما بعضًا، وغالبًا ما يكون ذلك في اتجاهين متعاكسين أو بزوايا قائمة لبعضهما بعضًا.

إن تمرير المغناطيس عبر الثرى القمري يلعب دور الجذب المغناطيسي ضد الجاذبية. إن استخدام سائل كثيف لفصل معدنين (أحدهما أكثر كثافة من السائل والآخر أقل كثافة) يلعب دور الجاذبية ضد الطفو. ولا تعمل أي من العمليتين في حالة انعدام الجاذبية. حتى غربلة الأوساخ البسيطة لفرز المواد حسب الحجم تعتمد على الجاذبية. تعويم الزبد، حيث يتم استخدام مادة

مضافة مثل الفاعل بالسطح لترطيب المعادن المرغوبة بشكل انتقائي واحتجازها في طبقة رغوية، لا يعمل أيضًا في حالة انعدام الجاذبية.

بالنسبة للمواد النقية ذات نطاق واسع من أحجام الحبيبات، يفشل أيضًا الفصل الكهروستاتيكي (التلاعب بالقوة الكهروستاتيكية ضد الجاذبية). إنها قاعدة عامة أن تقنيات الإثراء المألوفة قد تم تطويرها على الأرض، حيث يعتبر وجود تسارع كبير في الجاذبية أمرًا مفروغًا منه، وبالتالي يتم استخدامها والاعتماد عليها عالميًا تقريبًا. وقد أدى هذا الوضع أيضًا إلى تثبيط السعي وراء تقنيات إثراء خالية من الجاذبية.

في بيئة الجاذبية الصغرى أو انعدام الجاذبية، يجب تحديد واستخدام بديل للجاذبية. أقرب ما يمكن أن نصل إليه هو القصور الذاتي. يمكن إعادة صياغة الفصل المغناطيسي (عادة المغناطيسية مقابل الجاذبية) عن طريق تدوير المغناطيس، على سبيل المثال في نهاية الذراع الدوار أو الحبل، أو عن طريق اهتزازه، من أجل «تدوير» أو «التخلص» من المغناطيس غير أو الضعيف بالقصور الذاتي. خبث مغناطيسي، كما يفصل كلب مبتل نفسه عن الماء.

## • معالجـــة المـــواد الأوليـــة

في ظل العديد من الظروف، قد تكون التقنيات الكيميائية هي الطريقة المفضلة للقيام بعملية الفصل والتنقية. ومن الأمثلة على ذلك التحلل الحراري للأملاح المائية أو السيليكات الورقية لإطلاق بخار الماء. إن فصل وعزل البخار عن المواد الصلبة عملية مألوفة وسهلة على الأرض؛ وفي الجاذبية الصغرى، فإن مثل هذا الانفصال ليس بهذه السهولة. يتم احتجاز الغبار بسهولة وإدخال الشوائب غير المرغوب فيها بسهولة إلى تيار غاز المنتج مثل بخار الماء.

يبدو الترشيح خيارًا واضحًا للحفاظ على نقاء تيار الغاز، ولكن أي مرشح جيد بما يكفي للحفاظ على النقاء لن يحد بشدة من تدفق الغاز فحسب، بل سوف يصبح مسدودًا تمامًا بالغبار بسرعة كبيرة. من المحتمل أن يكون توفير آلية لتنظيف مثل هذا المرشح أكثر صعوبة وتكلفة وعرضة للفشل من استخدام فاصل الغبار «الإعصاري»، حيث يتم تدوير تيار الغاز لطرد الغبار من الغاز إلى جدران الجهاز تحت تأثير القوة الطاردة المركزية. هذه التقنية لها تطبيق واسع النطاق في الصناعات المعدنية والكيميائية على الأرض، وحتى أنها تستخدم في بعض المكانس الكهربائية المنزلية التجارية. بمجرد توليد تيار غازي، مثل التسخين الشمسي للمواد الكربونية الكويكبية لطرد بخار الماء، يجب تنظيف الغاز من الغبار الناعم وتكثيفه في ماء سائل. يجب إزالة الشوائب المتطايرة التي تتكثف مع الماء السائل أو تذوب فيه قبل أن يتم اعتماد الماء للاستخدام داخل مركبة فضائية أو موطن.

قد تشمل هذه الشوائب الأمونيا وأول أكسيد الكربون والميثان وكبريتيد الهيدروجين وسيانيد الهيدروجين، بالإضافة إلى غازات مهيجة أو سامة أخرى. من المحتمل وجود آثار للنيتروجين وثاني أكسيد الكربون، ولكنها لا تشكل خطرًا. أفضل طريقة للتنقية الكيميائية عادة ما تكون الأكسدة الحفزية، ولكن تفاصيل العملية تعتمد على وفرة ونسب الملوثات. من شأن الاستخلاص الكامل للمواد المتطايرة من مادة كوندريت CI أن يوفر خليط غاز يحوي على الهيدروجين والأكسجين والكربون والكبريت والنيتروجين والكلور وآثار عناصر أخرى. يؤدي التسخين المعتدل لمادة CI إلى تفاعل المادة العضوية مع المغنتيت الموجود $[Fe_3O_4]$ لإطلاق ثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون وإنتاج معدن حر، وهي عملية تعرف باسم الاختزال التلقائي. يمكن أن يتجاوز المخزون الإجمالي للمواد المتطايرة القابلة للاستخراج 46 % من إجمالي كتلة مادة النيزك.

البالاسيتيات Pallasties هي أعضاء في مجموعة النيزك الحجري الحديدي. تظهر هذه العينة من البلاسيتيت بلورات الزبرجد الزيتوني (Lewis, 2015).

يمكن أن تشمل المنتجات المفيدة النهائية الماء والأكسجين والهيدروجين وثاني أكسيد الكربون والهيدروكربونات والنيتروجين وحمض الكبريتيك وحمض الهيدروكلوريك ولبنات البناء العضوية مثل الأحماض الأمينية. تتكون البقايا غير العضوية وغير المتطايرة بعد استخراج هذه العناصر من نحو 33 % من سبيكة الحديد والنيكل المعدنية الأصلية (19 % أخرى من كتلة النيزك الأصلية)، مما يترك بقايا سيليكات إلى حد كبير يبلغ مجموعها 35 % من كتلة المادة الخام.

يمكن للترشيح الحمضي لهذه البقايا أن يستخرج الفوسفات والمعادن القلوية والأتربة القلوية، مما يضيف P وNa وK وCa وMg إلى قائمة العناصر الحيوية الأساسية المستخرجة بالفعل. المعدن الحديدي المنفصل عن الكوندريتات العادية، أو من المعالجة الكيميائية للكوندريتات الكربونية، يشبه إلى حد كبير مادة النيازك الحديدية: Fe، Ni، Co، PGMs، والعديد من أهم عناصر أشباه الموصلات. سيؤدي الصب المباشر للمعادن من الكوندريت العادي أو الحديد أو الحديد الحجري إلى إذابة كميات كبيرة من الكبريتيدات، وخاصة الترويليت، في المصهور. إن المسبوكات التي تحوي على نسبة عالية من الكبريت ليست ضعيفة جدًا فحسب، ولكنها أيضًا معرضة بشدة للتآكل. هناك حاجة إلى بعض الطرق لتنقية الحديد والنيكل من هذه الفئات من النيازك لجعل المعادن الحديدية مفيدة.

إحدى التقنيات الواعدة لتنقية هذه المعادن هي التطاير مثل الكربونيلات الغازية للحديد والنيكل. يتم تنفيذ هذا الإجراء، الذي يسمى عملية موند Mond-process، عن طريق تعريض المعدن لغاز أول أكسيد الكربون (CO) عند ضغط يقارب 100 ضغط جوي ودرجة حرارة نحو 100 درجة مئوية. ويتم بعد ذلك ترك PGMs وعناصر أشباه الموصلات كبقايا. ومع ذلك، فإن الكبريت يشتهر بأنه سم لعملية الكاربونيل، مما يجعل من الضروري إزالة الكبريت تمامًا قبل المعالجة بثاني أكسيد الكربون. لقد تم بالفعل تبخير المعادن الحديدية المصنوعة عن طريق الاختزال التلقائي لكوندريتات CI قبل تكوين المعادن، لكن المعادن الأصلية في الكوندريتات العادية تتشابك على نطاق واسع مع FeS، مما يجعل استخراجها وفصلها وتنقيتها أكثر تعقيدًا وصعوبة.

على الأرض، يبدأ إنتاج النيكل على نطاق واسع عادةً بخام كبريتيد ويزيل الكبريت بدقة (عن طريق التحميص في الهواء) قبل محاولة تحويل النيكل إلى الحالة المعدنية لاستخراج عملية موند. تطلق عملية التحميص كميات هائلة

من ثاني أكسيد الكبريت، مما يجعل المصاهر جيرانًا غير مرحب بها. تعمل العمليات الطبيعية على أكسدة وترطيب ثاني أكسيد الكبريت لتكوين قطرات من حمض الكبريتيك والأمطار الحمضية الصناعية.

يعد استخراج المعادن غير الحديدية مثل الألومنيوم (Al) والتيتانيوم (Ti) من أصعب المعادن، لأن كلاهما يدخل في معادن مستقرة جدًا يصعب تركيزها وتنقيتها وتحللها. جميع عمليات استخراج الألومنيوم من الفلسبار تستهلك الكثير من الطاقة. إن التحليل الكهربائي للصهارة على صهارة السيليكات السائبة سوف يستخرج بالفعل المعادن، بما في ذلك الألومنيوم، ويحرر غاز الأكسجين، ولكن رواسب الكاثود عبارة عن خليط معقد من عدة عناصر مختلفة (Fe, Ni, Mg,Si, Ca, Al، إلخ) والتي لا تفعل ذلك. سبائك بشكل جيد مع بعضها بعضًا. إن فصل وتنقية هذا الخليط من المعادن يعد عملية مكلفة وصعبة.

هناك العديد من الأسباب لتحديد المواد المتطايرة والمعادن الحديدية باعتبارها أكثر المنتجات المرغوبة من المواد الخام الكويكبية. العناصر H وC وO وFe وNi وفيرة ومفيدة وقابلة للاستخراج بوسائل بسيطة نسبيًا وموفرة للطاقة. المنتجات السائدة للمعالجة المبكرة لمواد الكويكب هي الهواء والماء والمغذيات المائية ووقود الصواريخ (خاصة الماء والوقود القابل للتخزين) والحديد عالي النقاء وسبائك الفولاذ Fe-Ni-Co. وسيكون الاستخدام المؤقت للمخلفات الناتجة عن استخراج هذه العناصر بمثابة حماية من الإشعاع.

# ســـــلامة المناجـــــم

يعد موقع التعدين الحديث مكانًا مختلفًا عن ذلك الذي كان موجودًا في عام 1989م. وعلى عكس غالبية المناجم التي كانت تعمل في جميع أنحاء العالم في ذلك الوقت، لم تعد العديد من المناجم عبارة عن عمليات سكنية؛ وبدلًا من ذلك، يتم تشغيلها من خلال قوة عمل «متنقلة للداخل أو للخارج». تضاف كل هذه العوامل إلى التحديات التي يواجهها مديرو المناجم لتوفير مكان عمل آمن لجميع العاملين في موقع التعدين. وحتى الزائرون العرضيون للمنجم مطالبون بالامتثال لمتطلبات السلامة الصارمة والمسؤوليات التشريعية الملقاة على عاتق إدارة المنجم لضمان صحة وسلامة جميع الأشخاص.

**وتشمل التدابير ما يأتي:**

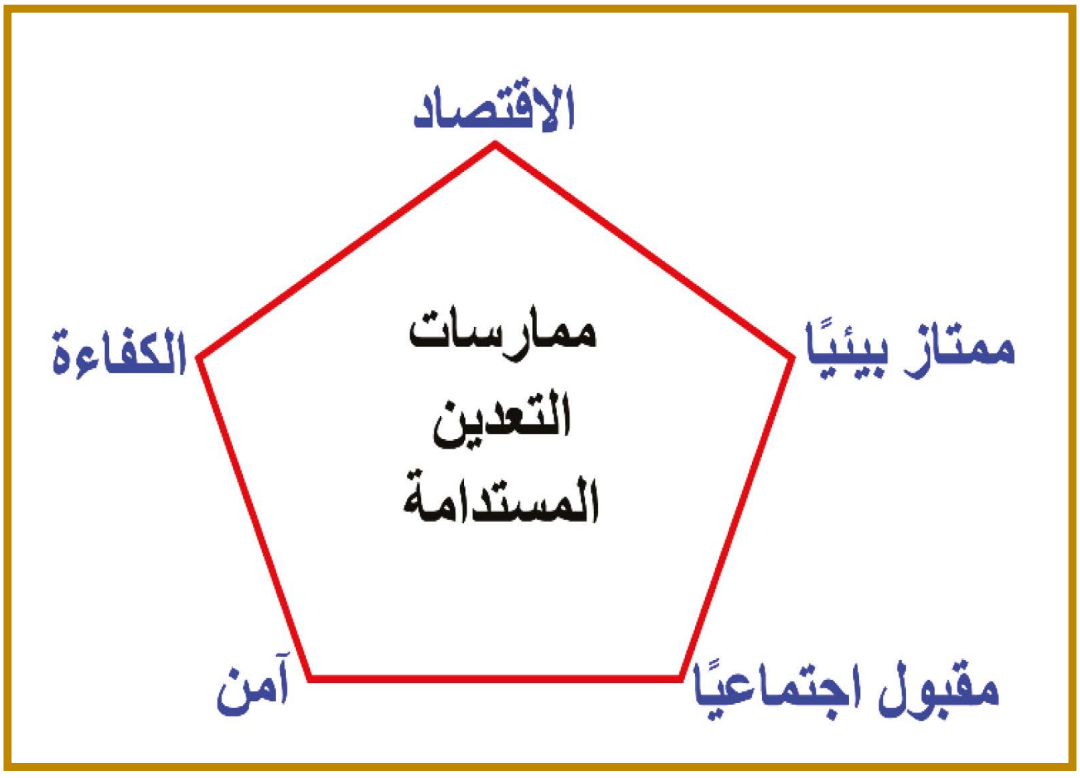
- الإجراءات الأمنية عند بوابة أو مدخل المنجم.
- اختبارات الأدوية والكحول العشوائية أو الإجبارية.
- برنامج تعريفي للسلامة.
- الإشراف المستمر من قبل الموظف.

واحدة من أهم القضايا بالنسبة لمديري المناجم هي تحقيق بيئة عمل آمنة في منجمهم. «صفر ضرر» هي العبارة التي تلخص مهمة العديد من شركات التعدين والمقاولين وموظفيهم. من المحتمل أن يكون الدافع وراء ذلك هو إحدى النقاط الآتية أو جميعها:

- لم يعد المجتمع يقبل أن تكون الإصابات جزءًا ضروريًا من عملية التعدين.
- إذا حدثت حالة وفاة في موقع منجم، فقد يكون هناك قلق مجتمعي، والذي ينمو إلى الغضب إذا حدثت حالات وفاة متعددة.

- قد يتصرف السياسيون بما يتعارض مع مصلحة المنجم ولكن في مصلحتهم.
- تعزيز إنفاذ الهيئات التنظيمية، مما يعني أنه: يمكن إغلاق المناجم أو سجن المديرين أو تغريمهم.
- يمكن أن تكون الخسائر البشرية والمالية هائلة.
- ترتبط المكافآت والتقدم الوظيفي بأداء السلامة.

تعد السلامة أحد أبعاد ممارسات التعدين المستدامة، إلى جانب الأبعاد المهمة الأخرى للاقتصاد والبيئة والمجتمع والكفاءة (كما في الشكل الآتي).




**ممارسات التعدين المستدامة** (Laurence, 2011)

وتمثل ثلاثة من هذه الأبعاد - الاقتصاد، والبيئة، والمجتمع - ركائز التنمية المستدامة. في مجال التعدين، من المهم أيضًا مراعاة السلامة والكفاءة.

ترتبط الكفاءة مباشرة بالمورد وتشمل التحسين والتميز التقني ورعاية المورد وما إلى ذلك (Laurence, 2008). يجب أن تشمل السلامة في صناعة التعدين الدورة الكاملة للاستكشاف والتطوير والبناء والعمليات وإعادة التأهيل والإغلاق والخروج النهائي. وبطبيعة الحال، فإن الأنشطة المرتبطة بها مثل معالجة المعادن والصهر والنقل كلها جزء من الصناعة، ويجب تطبيق التميز في السلامة هناك أيضًا.

في المناقشات المتعلقة بسلامة المناجم، لا تكون المصطلحات «خطيرة» و«حوادث» محددة بما يكفي لإضفاء الوضوح. بدلًا من استخدام كلمة خطير، يكون مصطلح خطر أكثر معنى عند وصف بيئة العمل في مواقع التعدين.

توجد مخاطر في صناعة التعدين، ولكن يمكن تحديدها وإدارة المخاطر الناتجة عنها. لقد تم اعتماد تقنيات إدارة المخاطر عالميًا في صناعة التعدين الأسترالية، وقد حققت انخفاضًا كبيرًا في الإصابات المهدرة للوقت وغيرها من تدابير أداء السلامة.

وعلى المنوال نفسه، تشير كلمة حادث ضمنًا إلى أن قوى طبيعية لا يمكن السيطرة عليها ربما تكون متورطة في حدث ما. تفضل الصناعة استخدام مصطلح حادث، مع العلم أن مثل هذه الأحداث يمكن الوقاية منها، في حين أن الحوادث لا يمكن منعها. على الرغم من أن محتوى هذا الفصل يركز على صناعة التعدين الأسترالية كنموذج، إلا أنه يمكن تطبيق الدروس المستفادة من تجاربهم في أي مكان.

## • تعريـف السـلامة

يُعرّف المعيار الأسترالي 1470:1986، الذي يحمل عنوان الصحة والسلامة في العمل، السلامة بأنها «توفير ومراقبة أنظمة بيئة العمل والسلوك البشري التي تعطي معًا حرية نسبية من تلك الظروف والظروف التي يمكن أن تسبب ضررًا شخصيًا».

ويُعرّف مجلس المعادن الأسترالي (MCA)، وهو أعلى مجموعة ضغط لصناعة التعدين في ذلك البلد، الوعي بالسلامة بأنه «الحالة الذهنية التي ندرك فيها باستمرار احتمالية حدوث ضرر ونتصرف وفقًا لذلك في جميع الأوقات». وعلى موقعها على شبكة الإنترنت، يصف MCA رؤيته للسلامة بأنها «صناعة معادن أسترالية خالية من الوفيات والإصابات والأمراض».

يعتقد MCA أنه:

- يمكن الوقاية من جميع الوفيات والإصابات والأمراض.
- لا توجد مهمة على درجة من الأهمية بحيث لا يمكن القيام بها بأمان.
- يمكن تحديد جميع المخاطر وإدارة ما ينجم عنها.
- يتحمل كل شخص مسؤولية شخصية عن سلامة وصحة نفسه والآخرين.
- يمكن دائمًا تحسين أداء السلامة والصحة. (MCA, 2009)

يمكن العثور على قيم وبيانات مماثلة على مواقع الويب الخاصة بشركات التعدين الكبرى في أستراليا وفي جميع أنحاء العالم. لطالما كان التعرض للغبار والضوضاء والمواد الخطرة يشكل خطرًا مهنيًا على عمال المناجم. ولا تزال حالات ورم الظهارة المتوسطة، وداء الأسبستوس، وداء السحار السيليسي، وتغبر الرئة تظهر لدى عمال المناجم بعد سنوات عديدة من التعرض. على الرغم من

أن القضايا الصحية لا تقل أهمية عن قضايا السلامة، وفي كثير من الحالات، تكون أكثر خطورة ويمكن أن تستغرق وقتًا أطول للظهور، فإن تركيز هذا الفصل ينصب على سلامة المناجم بدلًا من قضايا الصحة المهنية.

ومن المهم أيضًا ألا يتعرض العمال للإصابة من خلال استخدام الآلات. ساعدت الميكنة والأتمتة في تقليل أي تفاعلات سلبية بين البشر والآلات. ومع ذلك، لا تزال العديد من المناجم تستخدم تقنيات الحفر المحمولة، ولا تزال تحدث حالات إصابة الإجهاد المتكررة في الذراعين واليدين والأصابع. وبالمثل، تبقى إصابات الظهر عنصرًا رئيسيًا في جميع مطالبات تعويض العمال في صناعة التعدين.

## • قيـــاس الســـلامة في التعديـــن

هل التعدين صناعة آمنة؟ هل السلامة مصطلح نسبي أم مطلق في مجال هذه الصناعة؟ قد يزعم البعض أن التعدين آمن مقارنة بالصناعات المماثلة الأخرى، مثل صيد الأسماك في أعماق البحار، وقطع الأشجار، وصناعات البناء والنقل. وقد يزعم آخرون أنها ليست آمنة، مقارنة بالصناعات النووية والكيميائية.

يعد تحديد كيفية قياس السلامة خطوة أولى مهمة قبل محاولة مقارنة التعدين بالصناعات الأخرى. في مجال التعدين، المقياسان الأكثر استخدامًا هما معدل تردد الإصابات والوفيات في وقت العمل الضائع (LTIFR) Lost-time injury frequency rate، عادةً ما يتم التعبير عن هذه التدابير بمعدلات تكرار، على سبيل المثال، معدل تكرار الإصابة لوقت العمل الضائع، والذي يشير إلى عدد أحداث الإصابة في وقت العمل الضائع التي تحدث لعدد معين من ساعات العمل (Laurence, 2011). ومع ذلك، فإن استخدام هذا المقياس وحده

يترك الصناعة عرضة للانتقادات المعتادة لموثوقية هذا العامل. ومن المعروف أنه يمكن التلاعب بإصابة وقت العمل الضائع، خاصة في هذا العصر الذي يتسم بقوائم العمل المرنة.أحد المقاييس التي لا يمكن التلاعب بها هو عدد الوفيات التي تحدث في مواقع التعدين. وعلى الرغم من أنه يمكن القول بشكل مقنع أن عدد الموظفين في المناجم قد زاد، إلا أن الأعداد بعيدة كل البعد عن رؤية MCA المتمثلة في «صناعة خالية من الوفيات والإصابات والأمراض». يتم قياس خطر الوفيات من خلال معدل تكرار الإصابة القاتلة (FIFR؛ أي عدد الإصابات القاتلة لكل مليون ساعة عمل).

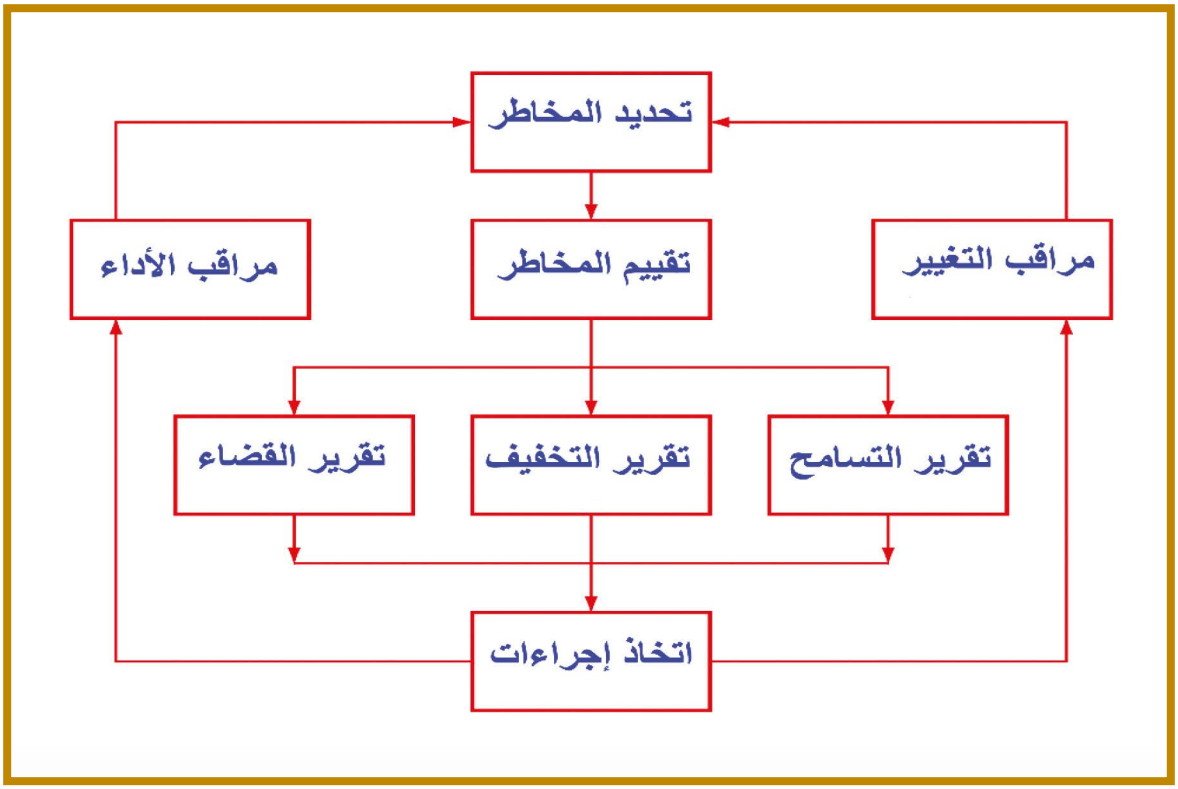
## • مفهـــــوم المخاطـــــر

تسجل صناعة المعادن ما يقرب من 10 وفيات سنويًا، استنادًا إلى متوسط متجدد لمدة 10 سنوات (MCA, 2009). ويبلغ عدد القوى العاملة في صناعة المعادن نحو 120 ألف عامل، مما يعني أن نحو 1 من كل 12 ألف عامل يُقتل كل عام. فهل هذا خطر مقبول؟ على الرغم من عدم وجود أي وكالة حكومية في العالم لديها معدل مقبول محدد للوفيات المرتبطة بالعمل، فقد أظهرت العديد من الدراسات أن المجتمع مرتاح للصناعات التي تقتل أقل من موظف واحد لكل 100000 سنويًا. وهذا يعني أن خطر الوفاة في صناعة المعادن مرتفع جدًا. قد يكون من المفيد البدء بفحص سجل السلامة في صناعة التعدين مقارنة بالصناعات الأخرى. ليس هناك شك في أن العديد من الصناعات لديها معدلات أعلى من الإصابات الخطيرة أو المميتة مقارنة بالتعدين. وتشير التقديرات، على سبيل المثال، إلى أن صناعة البناء تقتل شخصًا واحدًا أسبوعيًا في أستراليا. ويتسبب قطاع النقل أيضًا في وفيات أكثر من صناعة التعدين في أستراليا. وفي مقارنة نهائية ووفقًا للإحصاءات الأخيرة، في أستراليا، يقتل ما بين 5 إلى 10 أشخاص سنويًا بسبب الصواعق، وهو تقريبًا العدد نفس الذي يقتل في المناجم (Bureau of Meteorology, 2009).

## • إدارة المخاطـــر

تبنت صناعة التعدين في أستراليا مفاهيم إدارة المخاطر في كل جانب من جوانب أعمالها تقريبًا. عادة ما يتم تقييم المخاطر بموجب التشريعات ويتم إجراؤها قبل إدخال قطعة (رئيسية) جديدة من المعدات أو تنفيذ طريقة أو عملية أو نظام تعدين جديد. كان الفضل في إدارة المخاطر في تحسين أداء السلامة بشكل ملحوظ في المناجم الأسترالية.

يوضح الشكل الآتي الخطوات المتبعة عادة في إجراء تقييم المخاطر. أولًا يتم تحديد الخطر. ومن ثم يتم تقييم المخاطر التي يمثلها هذا الخطر. ويمكن القيام بذلك بطريقة نوعية أو كمية.




عملية إدارة المخاطر الأساسية (Laurence, 2011)

يُفترض عمومًا أن المخاطر هي نتاج احتمالية حدوث خسارة ناجمة عن ذلك الخطر وعواقب حدوثه. بعد تقدير المخاطر، يتم اتخاذ قرار بإزالة المخاطر أو تخفيفها أو السيطرة عليها إلى مستوى مقبول. المراقبة هي الخطوة الأخيرة في عملية إغلاق الحلقة.

المخاطر هي مصدر الضرر المحتمل. في صناعة التعدين، تتعدد المخاطر، والتحدي الذي يواجه القوى العاملة، في المقام الأول، هو أن تكون على دراية بها. أحد الأسباب التي تجعل المخاطر في التعدين كبيرة جدًا هو الطاقات الكبيرة المعنية، سواء كانت جاذبية أو ميكانيكية أو كيميائية أو كهربائية أو أنواع أخرى. يسمح تحليل المخاطر بتخطيط المخاطر الفردية على مصفوفة مما يسمح للإدارة بتخصيص الأولويات لكل منها.

## • تشـريعات سـلامة المناجـم

يجب أن يتم تنفيذ الصحة والسلامة في مكان العمل من خلال نهج ثلاثي يشمل العمال وأصحاب العمل والجهة التنظيمية. تضمن قانون الصحة والسلامة في العمل الناتج (U.K. Health and Safety Executive, 1974) الميزات الآتية:

- واجب صاحب العمل توفير أنظمة عمل ومبانٍ وبيئات عمل ومعدات آمنة وصحية، والتأكد من أن الأشخاص يعملون بأمان من خلال التدريب والتعليم والإشراف.
- واجب على كل موظف مراعاة أحكام السلامة والصحة والتصرف بالعناية الواجبة.
- القضاء على التفاصيل التوجيهية، واستبدالها بتحديد الأهداف أو تحقيق الأداء.
- التركيز على تحديد المخاطر، وإدارة المخاطر، وتقييم المخاطر.
- استخدام قواعد الممارسة والمبادئ التوجيهية لمساعدة الصناعة على الامتثال.

في أستراليا، قامت حكومة نيو ساوث ويلز (NSW) بدمج فلسفة روبنز في قانون الصحة والسلامة المهنية (NSW Government Legislation, 1983) (OHS)، والذي تم تحديثه في عام 2000 وينطبق على جميع الصناعات بما في ذلك صناعة التعدين.

هذا هو معيار الأداء أو الفعل التمكيني. أي أنه ينص على معيار الأداء المطلوب تحقيقه، ويترك للملتزمين بهذا الفعل أن يختاروا لأنفسهم الأساليب التي ستستخدم في تحقيق هذا المعيار. ومن ثم، فهي تقف، من الناحية الفلسفية، بعيدًا عن التشريعات التوجيهية التقليدية، التي تحدد للمشغلين كيفية تحقيق المعايير.

يقر قانون الصحة والسلامة المهنية بأنه سيتم تحقيق أفضل النتائج من خلال التأثير على المواقف وإنشاء إطار لتنظيم وإجراءات أفضل للصحة والسلامة من قبل الصناعة نفسها.

**الملامح الرئيسية لهذا النهج هي:**

- استبدال كتلة من التشريعات بقانون واحد ذو تطبيق عام.
- توفير التشريعات لمجموعة شاملة من الواجبات المتعلقة بالمسؤوليات الأساسية والطاغية لأصحاب العمل والموظفين والمصنعين وغيرهم، والتي ينبغي أن تكون مبادئ بسيطة وسهلة الاستخدام وذات تطبيق عام (أحكام «الواجب العام»).
- استخدام المعايير وقواعد الممارسة المعتمدة والطوعية من أجل توفير ظروف أفضل بشكل تدريجي.

وبالتالي، بموجب هذا التشريع، يتحمل كل من أصحاب العمل والموظفين واجبات الرعاية. يجب على صاحب العمل ضمان مكان عمل آمن وصحي.

يجب على الموظف أن يعتني بشكل معقول بصحة وسلامة الأشخاص (بما في ذلك أنفسهم) أثناء العمل وأن يتعاون مع صاحب العمل.

إن (IRS) هو نظام ينقل المسؤولية عن الصحة والسلامة إلى مستوى المشغل. إذا تمكن مديرو المناجم من الحصول على هذا المستوى من المسؤولية من عمالهم، فستكون هناك فرصة لضمان صحة وسلامة الموظفين، وهو واجب عام بموجب معظم تشريعات الصحة والسلامة المهنية الخاصة بالتعدين.

## • مشـــاركة المعلومـــات

كان التقدم الكبير الذي ساهم في تحسين أداء السلامة على مدى السنوات العشرين الماضية هو زيادة الانفتاح بين شركات التعدين والجهات التنظيمية الحكومية لتبادل معلومات السلامة. وعلى الرغم من أن هذا الانفتاح مهدد في بعض الولايات القضائية بسبب الدعاوى القضائية التي تعقب بعض الحوادث، إلا أن هناك قدرًا كبيرًا من المعلومات المتاحة، خاصة على الإنترنت. ويأتي هذا بشكل أساسي في شكل تنبيهات تتعلق بالسلامة، وتقارير عن الحوادث المهمة، ونشرات.

## • العامـــل البشـــري

تشير مجموعة من الأدلة إلى أنه على الرغم من وجود أفضل الأنظمة والإجراءات، إلا أن الحوادث والحوادث تقع، والعديد منها ناتج عن المخاطرة أو الخطأ البشري. على سبيل المثال، «أظهر التاريخ الحديث في صناعة التعدين في كوينزلاند أن الحوادث والحوادث حدثت نتيجة لأخطاء غير مقصودة أو إجراءات لا تعترف بالمخاطر الشخصية الموجودة. في كثير من الأحيان، تكون الحوادث الخطيرة نتيجة للمخاطرة الواعية، مثل اتخاذ الطريق السهل أو اتخاذ طريق مختصر أو عدم التفكير في المخاطر في مكان عملك قبل بدء العمل. وليس

من غير المألوف أن نجد أن الضحايا كانوا على علم بالمخاطر المحتملة للحوادث قبل وقوع الحادث» (Queensland Department of Mines and Energy, 2002). و«عدد قليل جدًا من الأشخاص يتعرضون لحوادث لا توجد إجراءات معمول بها، ولدينا درجة كبيرة من الحوادث نتيجة لخرق الأشخاص للقواعد، أو تجاهلهم للقواعد، أو ببساطة عدم معرفتهم بها....» (Pitzer, 2000). وجدت دراسة حديثة عن السلوكيات المحفوفة بالمخاطر لمشغلي المناجم المستمرين في مناجم الفحم تحت الأرض أن أكثر من 90 % من الموظفين الذين أجريت معهم مقابلات «أعربوا عن مخاوفهم» بشأن قواعد وأنظمة السلامة.

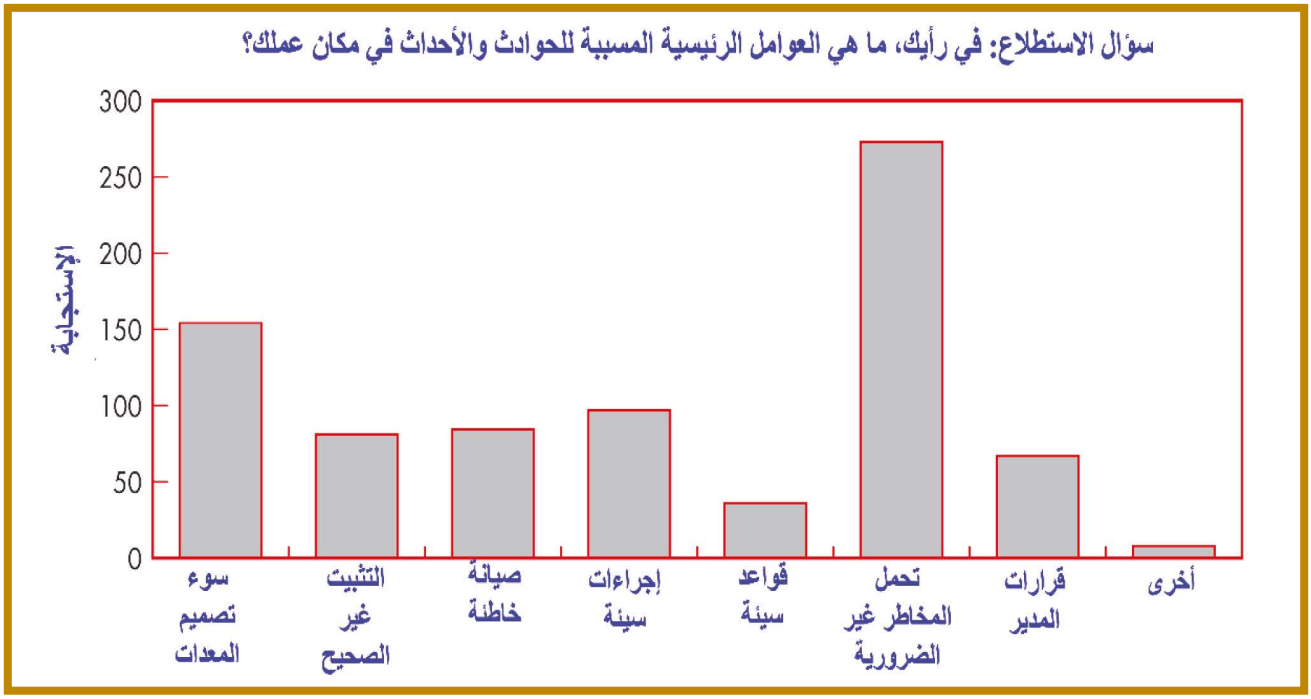
وكان هناك تمييز واضح بين العمل ضمن القواعد والعمل بشكل طبيعي، حيث يشير الأخير إلى أسرع طريقة ممكنة لإكمال المهمة. «المسألة ليست ما إذا كانت القواعد عملية أم لا، أو ما إذا كان ينبغي اتباع القواعد ببساطة أم لا. وإنما المسألة الأكثر خطورة هي أن الغالبية العظمى من الموظفين (بما في ذلك النواب/المشرفين) يقومون بتشغيل آلات خطيرة كل يوم في مناجم تحت الأرض مع اعتقاد أساسي بأن قواعد السلامة غير ذات صلة أو زائدة عن الحاجة أو غير ضرورية أو مفرطة'. إذا كان هذا هو الحال، فإن أحد الموارد المهمة للحد من السلوك المحفوف بالمخاطر للموظفين يعاني من نقص خطير» (Pitzer, 2000). وجدت دراسة أخرى لـ 39 كارثة منجم للفحم متعددة الوفيات، معظمها في الولايات المتحدة والمملكة المتحدة وأستراليا، أنه تم اكتشاف انتهاكات خطيرة لقوانين التعدين بين 33 منها (Braithwaite & Grabosky, 1985). وتبين أن الانتهاكات الجسيمة إما تسببت في وقوع الكارثة، أو كانت من مكونات الأسباب، أو أدت إلى تفاقم أثر الكارثة. تم دعم هذه النتائج من خلال دراسة أجريت عام 1991، بتكليف من إدارة الموارد المعدنية في نيو ساوث ويلز، والتي وجدت أن 83 % من الحوادث المميتة الناجمة عن تحركات الطبقات في مناجم الفحم تحت الأرض في الفترة 1972–1990 كانت مرتبطة بانتهاكات القواعد (Roylett et al., 1991).

كان الخطأ البشري حاضرًا في وقت واحد مع انتهاكات القواعد في أكثر من نصف الحوادث المميتة التي تم تحليلها. وقد تم التوصل إلى أن الوفيات ستستمر في الحدوث ما لم تجد الإدارة استراتيجيات للتركيز على تطوير قواعد دعم أفضل، والامتثال للقواعد، وتحسين التكنولوجيا «لمواجهة الخطأ البشري». أشارت التحقيقات اللاحقة إلى أنه، بصرف النظر عن انتهاكات القواعد، فإن السبب الرئيسي الذي ساهم في هذه الحوادث هو عدم كفاية تصميم المناجم، بما في ذلك الأعمدة الأصغر حجمًا. قامت دراسة تكميلية حول حوادث سقوط الأسطح والأضلاع، بتكليف من إدارة الموارد المعدنية في نيو ساوث ويلز في عام 1999، بتحديث نتائج دراسة (Roylett et al. 1991)، ووجدت أنه «لتقليل الوفيات الناجمة عن سقوط الأسطح بشكل فعال، يجب على الصناعة التحكم في العوامل السلوكية السببية والمرتبطة بهذه الوفيات. وعلى وجه الخصوص، عمال المناجم الذين يعملون تحت سقف غير مدعوم ولا يعملون وفقًا لقواعد الدعم» (Pereira, 1999).

وركز مشروع بحث آخر على تطوير قواعد وأنظمة أكثر فعالية لسلامة المناجم (Laurence, 2002). وقد تم تحليل ردود ما يقرب من 500 من عمال المناجم وتم وضع بعض المبادئ التوجيهية البسيطة، لا سيما فيما يتعلق بمحتوى القواعد. وكانت التوصيات هي أنه لا ينبغي للإدارة والمنظمين الاستمرار في إنتاج المزيد والمزيد من القواعد واللوائح لتغطية كل جانب من جوانب التعدين. لن يقرأ عمال المناجم أو يفهموا هذا المستوى من التفاصيل.

إن اللوائح الإرشادية التفصيلية، وإجراءات العمل الآمن التفصيلية، وخطط إدارة السلامة الضخمة لن «تتصل» بعامل التعدين. وينبغي أن يكون الهدف هو العمل ضمن إطار أقل عدد ممكن من القواعد، ولكن قواعد ذات جودة عالية.

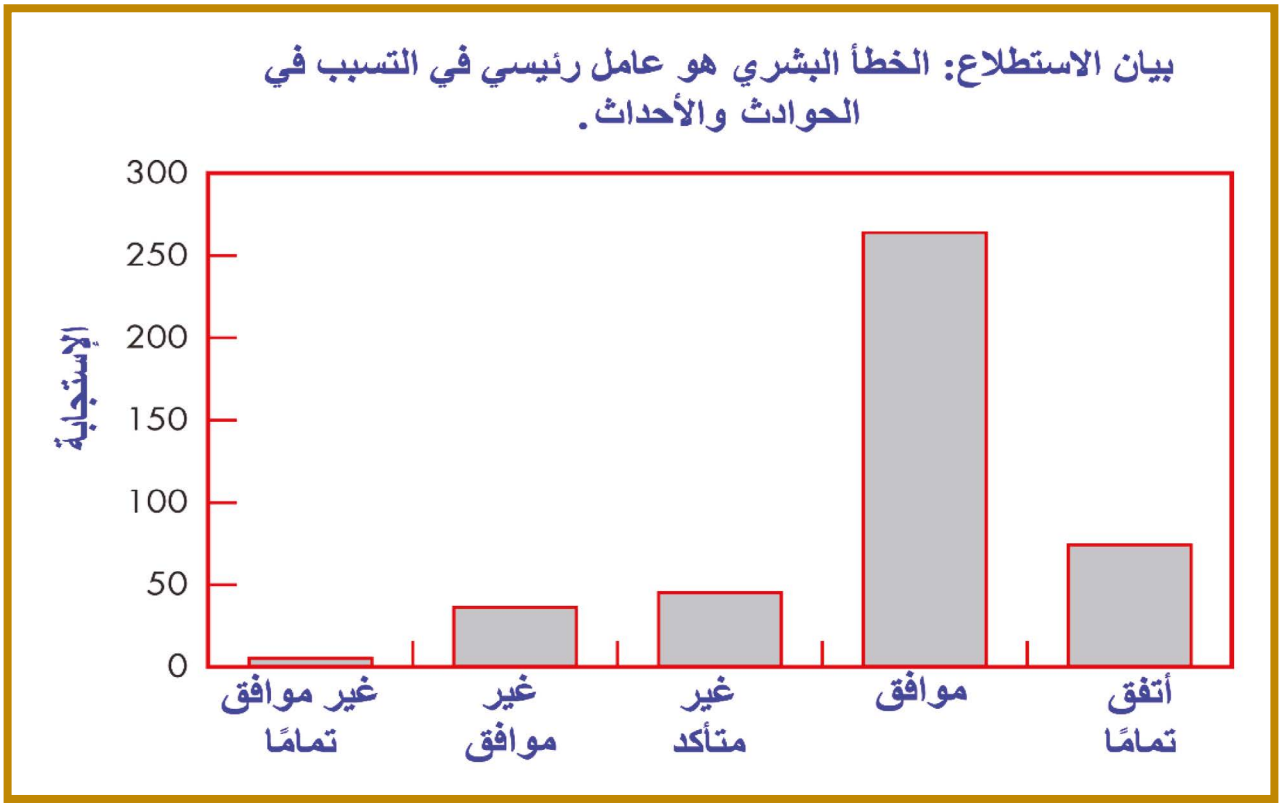
وبطبيعة الحال، فإن تحقيق قواعد وأنظمة أكثر فعالية ليس هو الحل الوحيد لمكان عمل أكثر أمانًا. ومن المحتمل أن يكون التركيز أقل على المحتوى والمزيد على العملية، ولا سيما ضمان وجود ثقافة سلامة إيجابية وأن قنوات الاتصال مفتوحة وتعمل بشكل جيد. وقد تم تأكيد ذلك في الاستطلاع عندما نادرًا ما يتم إلقاء اللوم على عبارات «قواعد سيئة ببساطة» أو «قواعد سيئة» في وقوع حوادث أو أحداث أو المخاطرة أو ارتكاب الأخطاء. وفي كثير من الأحيان كانت مشاكل التنفيذ والتواصل والتعلم هي العوامل السببية الرئيسية. كما تم سؤال عمال المناجم عما يعتبرونه الأسباب الرئيسية للحوادث والأحداث. واعتبرت المخاطرة غير الضرورية هي الاستجابة الأكثر أهمية، كما هو مبين في الشكل الآتي.




نتائج مسح عمال المناجم لأسباب الحوادث والأحداث في مكان العمل. (Laurence, 2011)

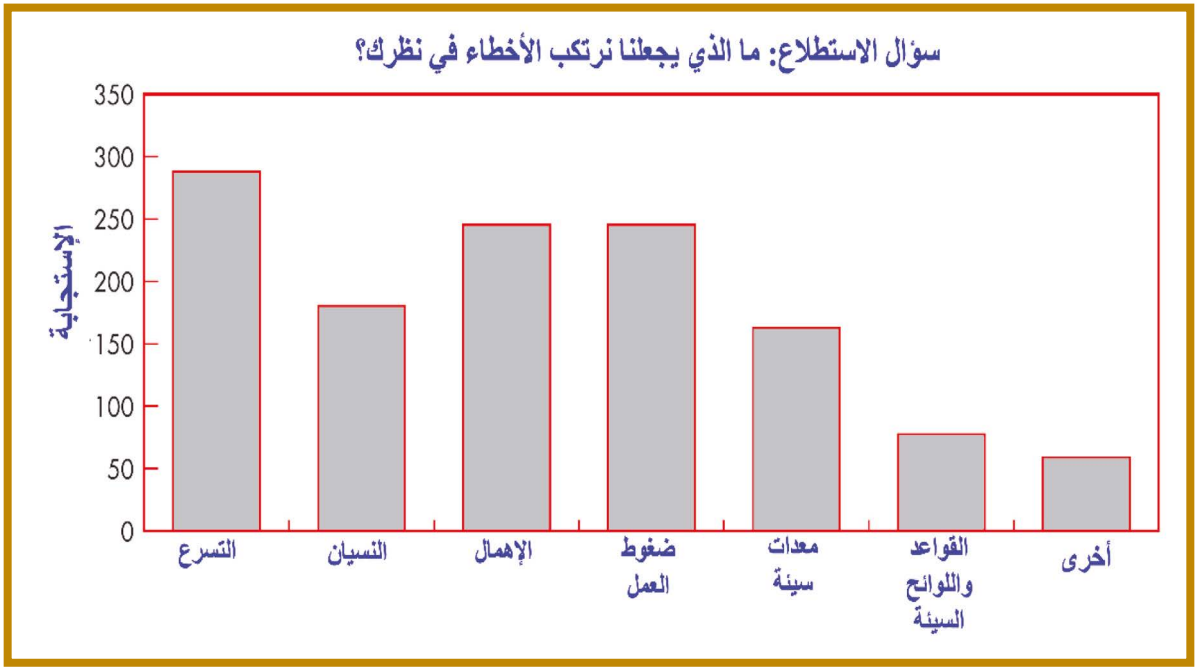
يتـم تعريـف الخطـأ البشـري بواسـطة الباحـث رياسـون (1990م) علـى أنـه «فشـل الإجـراءات المخطـط لهـا في تحقيـق الغايـات المرجـوة منهـا، دون تدخـل بعـض الأحـداث غيـر المتوقعـة.» يمكـن تقسـيم الأخطـاء إلـى تلـك التـي كانـت فيهـا الخطـة كافيـة ولكـن الإجـراءات فشـلت في السـير كمـا هـو مخطـط لهـا، أو تلـك التـي كانـت فيهـا الإجـراءات مطابقـة للخطـة ولكـن الخطـة لـم تكـن كافيـة. تُعـرف الأولـى بالـزلات والهفـوات والعثـرات، والثانيـة بالأخطـاء.

كان هنـاك اتفـاق عـام بـين القـوى العاملـة في التعديـن علـى أن الخطـأ البشـري هـو سـبب رئيسـي للحـوادث، كمـا هـو موضـح في الشـكل الآتـي.




نتائج مسح عمال المناجم فيما يتعلق بالأخطاء البشرية والحوادث (Laurence, 2011)

السـبب الرئيسـي وراء ارتـكاب الأشـخاص للأخطـاء هـو التسـرع، وفقًـا لقـوة العمـل، كمـا هـو موضـح في الشـكل الآتـي.




تظهر نتائج مسح عمال المناجم أسباب الخطأ (Laurence, 2011)

وفي تحليله لـ 25 حادثة تنطوي على وفيات أو إصابات خطيرة، وجد الباحث جوي أن العديد منها كان سببها فشل أنظمة الإدارة. وكان الخطأ البشري النشط أيضًا سببًا مهمًا. لم يكن الخطأ مقصودًا بشكل عام: «الخطأ البشري الأكثر نشاطًا يحدث عندما ينوي الشخص القيام بالأشياء بشكل صحيح». ومن بين الحوادث الـ 25، كانت 46 % منها عبارة عن مخالفات؛ 31 % أخطاء؛ 8 % الانزلاق/الهفوات؛ و15 % لا يوجد خطأ بشري نشط. وفي بعض هذه الحوادث، قام عمال المناجم بما يأتي:

- لم يكونوا على علم بالقواعد.
- كانوا على علم بالقواعد ولكن لم يفهموها.

- تطبيق القواعد عن طريق الخطأ.
- تجاهل القواعد.
- انتهكت عمدا القواعد.
- خاطروا.
- لم نتمكن من تحديد المواقف الخطرة.
- كانوا سيئي التدريب أو يفتقرون إلى الخلفية التعليمية الكافية (Joy, 1999b).

يتم إدراج مثل هذه الحوادث على صفحات الويب الخاصة بكل مفتشية المناجم الحكومية في نيو ساوث ويلز، وكوينزلاند، وأستراليا الغربية. ويمكن ملاحظة أن العديد من هذه الحوادث كانت ناجمة، جزئيًا على الأقل، عن:

- قلة الوعي بالإجراءات أو القواعد.
- عدم الالتزام بالقواعد أو تجاهلها.
- عدم وجود تعليمات واضحة.
- ضعف التواصل بشكل عام.
- الإنتاج له الأسبقية على السلامة.
- تجاوز أو إزالة حواجز السلامة.
- عدم كفاية التدريب.
- عدم الإلمام بالمعدات.
- التعب.

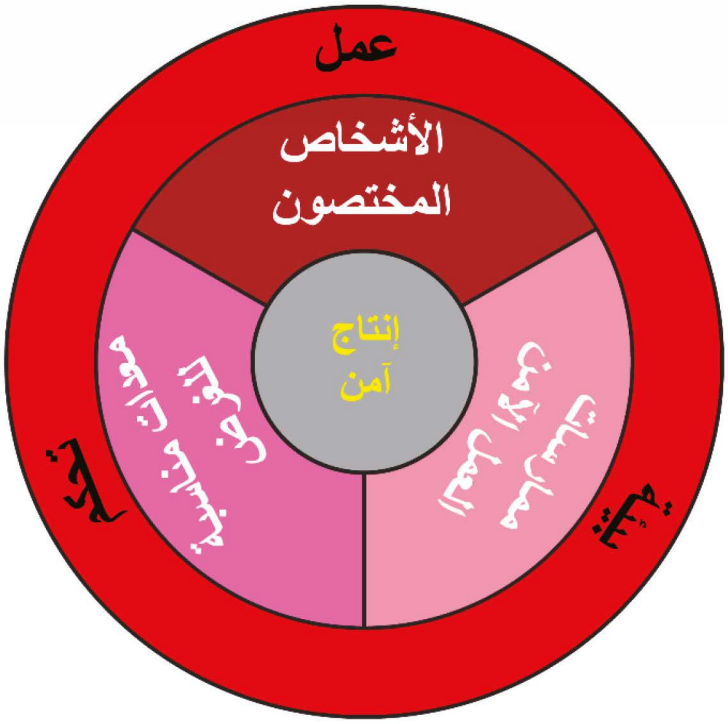
## • ممارســـة العنايـــة الواجبـــة

ومن المهم أن يدرك مديرو المناجم الحاجة إلى بذل العناية الواجبة في حالة وقوع حادث في موقع منجمهم. في حالة وقوع حادث خطير، قد ترغب الجهة التنظيمية في رؤية ما يأتي:

- الإقرار بالحادثة عبر تقرير.
- ما إذا كان قد تم إبلاغ السلطات بذلك كما هو مطلوب.
- ما إذا كان قد تم ملء تقرير الحادث.
- ما هو نظام العمل المستخدم.
- ما هي المعدات التي كانت تستخدم.
- مدى مؤهلات المصاب وخبرته في العمل بهذا النوع.
- ما إذا كان الشخص المصاب قد تم تأهيله وتدريبه.
- من هم المشرفون والمديرون ومؤهلاتهم وخبراتهم والتعليمات المقدمة للشخص المصاب.
- ما إذا كان قد تم إجراء تقييم المخاطر قبل العمل.
- ما إذا كان هناك تحليل للسلامة الوظيفية، أو إجراء تشغيل آمن، أو ما يعادله.
- دليل على وجود نظام عمل آمن.

## • نظـــام العمـــل الآمـــن

تطبق المؤسسة «نظام عمل آمن» عندما تقوم بتوظيف وتدريب أشخاص أكفاء، واستخدام معدات مناسبة للغرض، وتنفيذ أنظمة وممارسات فعالة، كل ذلك في بيئة عمل خاضعة للرقابة، كما هو موضح في الشكل الآتي.




نموذج عملية العمل أو عجلة نيرتني للعمل الآمن. (Laurence, 2011)

## • الأشـــخاص المختصـــون

لتحقيق إنتاج آمن في منجم، يجب تعيين أشخاص أكفاء في الإدارة العليا، وفي الإدارة المباشرة، وفي مواجهة الفحم. يتضمن دليل الكفاءة التعريفات والتدريب بما في ذلك التدريب التنشيطي والتقييمات والخبرة والمؤهلات التعليمية الرسمية وما إلى ذلك.

في معظم الولايات الأسترالية، يتعين على مديري المناجم أن يثبتوا في اختبار كتابي وشفوي رسمي أنهم مؤهلون لإدارة منجم. كما أنهم بحاجة إلى درجة

أو دبلوم في هندسة التعدين أو ما يعادلها. يُطلب حاليًا من مديري المناجم في نيو ساوث ويلز وكوينزلاند الحصول على شهادة G3، التي تثبت الكفاءة في دمج إدارة المخاطر في عملية التعدين.

## • المعـــــدات

من الواضح أن المعدات والآلات المستخدمة في موقع التعدين تحتاج إلى تنفيذ المهمة التي صممت من أجلها بشكل مناسب؛ يجب أن تكون «مناسبة للغرض». في الآونة الأخيرة، عملت الشركات المصنعة في شراكة مع المناجم لتحسين التعدين بشكل مستمر من منظور السلامة والراحة.

## • الأنظمـــة والممارســـات الفعـــالـــة

في منجم تحت الأرض، تشمل أمثلة الأنظمة والممارسات الفعالة خطة إدارة السلامة، وخطة إدارة التحكم الأرضي، ومسوحات التهوية، وتحليلات السلامة الوظيفية، وتقييمات المخاطر الرسمية، وما إلى ذلك.

## • بيئـــة عمـــل خاضعـــة للرقابـــة

بسبب الشكوك الجيولوجية والجيوتقنية، يصعب تحقيق بيئة عمل خاضعة للرقابة، خاصة في منجم تحت الأرض. ويمكن التغلب على ذلك إلى حد ما من خلال التأكد من أن البيانات الجيولوجية والجيوتقنية كافية لتمكين اتخاذ قرارات سليمة لإدارة الدعم الأرضي، وهو أحد المخاطر الرئيسية. عادة ما تكون تدابير الدعم الأرضي روتينية، وبالتالي يمكن اعتبارها قريبة من بيئة العمل الخاضعة للرقابة كما يمكن تحقيقها تحت الأرض.

## • تجـــنب كـــوارث المناجـــم

في الماضي، كان هناك ميل للتركيز على الأحداث ذات العواقب المنخفضة والاحتمالات العالية، والمعروفة أيضًا باسم «الانزلاقات والتعثرات والسقوط». ومن المؤكد أن القيام بذلك قد يؤدي إلى انخفاض معدل الإصابة وبالتالي إحصائيات أفضل للسلامة، وهو بالطبع أحد مؤشرات الأداء الرئيسية الشائعة لإدارة المناجم. ومع ذلك، تظهر التجربة أنه إذا كان هذا الجانب من السلامة هو محور التركيز الوحيد، فقد تضيع فرص تحديد الأحداث التي يحتمل أن تكون أكثر ضررًا، والتي تؤدي في بعض الأحيان إلى كوارث المناجم. وعلى نحو متزايد، أصبح المجتمع أقل تسامحًا مع أي إصابة أو خسارة بشرية ناجمة عن التعدين والعمليات المرتبطة به. المجتمع على استعداد لقبول قدر معين من الخسارة في التعدين، ولكن قد يحدث غضب المجتمع إذا كان الأمر يتعلق بالوفيات.

ينبغي للدفاعات أن:

- توفر الإنذارات والتحذيرات عندما يكون الخطر وشيكًا.
- استعادة النظام إلى حالة آمنة في حالة غير طبيعية.
- وضع حواجز السلامة بين المخاطر والخسائر المحتملة.
- احتواء المخاطر والقضاء عليها في حالة هروبها من الحاجز.
- توفير وسائل الهروب والإنقاذ في حالة فشل احتواء المخاطر.

## • ثقافـــة الإنكـــار

«تبدو الأدلة الجديدة موثوقة وغنية بالمعلومات إذا كانت متسقة مع معتقدات الشخص الأولية؛ تميل الأدلة المخالفة إلى رفضها باعتبارها غير موثوقة أو خاطئة أو غير تمثيلية». كانت هناك ضغوط إنتاجية قوية في مورا، والتي ربما أدت إلى الميل إلى رفض أي دليل مخالف. يطلق هوبكنز على هذه الثقافة اسم «ثقافة الإنكار Culture of Denial»، وهي «مجموعة من المعتقدات التي مكنت الإدارة من إنكار وجود أي خطر مباشر، بغض النظر عن الأدلة». ومن ثم يتم الاعتراف بالعوامل التنظيمية والنظامية باعتبارها من المساهمين الرئيسيين في كوارث المناجم. كما لعبت العوامل البشرية دورًا في كوارث التعدين هذه، وهي:

- فشل الاتصالات.
- عدم التعرف على العلامات التحذيرية.
- نقص المعرفة حول المخاطر.
- نقص التدريب.
- الأخطاء.
- الحكم الضعيف.
- المخاطرة.

عادةً ما تتبع الكوارث في صناعة التعدين استجابة سياسية و/أو بيروقراطية في شكل استفسارات وتحقيقات وتغييرات في التشريعات أو إعادة الهيكلة وإعادة توفير الموارد لإدارات المناجم. بعض الأفكار للحد من هذه الكوارث المحتملة تشمل ما يلي:

- تحسين الاتصال في كلا الاتجاهين في مواقع التعدين، من أعلى إلى أسفل ومن أسفل إلى أعلى، سوف يقلل من فرصة وقوع حادث محتمل جدًا.
- إن الاعتماد فقط على أنظمة إدارة السلامة المتطورة لا يكفي؛ فمن الضروري التأكد من فهم الموظفين للإجراءات وتدريبهم عليها.
- عدم الالتزام باللوائح القائمة يمكن أن يساهم في حدوث الكوارث، كما هو الحال مع اللوائح القديمة. ومن ناحية أخرى، فإن الالتزام الصارم بالقواعد يسبب أيضًا الكوارث، كما ظهر في انفجار تشالنجر.
- هناك حاجة لتجنب تطبيع الأحداث غير الطبيعية والوعي بالتغيرات المتزايدة في العمليات.
- إن تطوير البصيرة النشطة، أو ما وصفه رياسون (1997) «باليقظة المستمرة»، سيساعد أيضًا في الحد من الكوارث. (Laurence, 2011)

# التخطيط لإغلاق مناجم التعدين

أدركت صناعة المعادن، في السنوات الأخيرة، أهمية التخطيط المستدام والمتكامل للإغلاق. ونظرًا للطبيعة المحدودة للأجسام الخام، سيتم إغلاق جميع المناجم والمرافق ذات الصلة في نهاية المطاف، وتعتمد سمعة الصناعة إلى حد كبير على الإرث الذي تتركه. سواء كان لدى المنشأة 10 أو 20 أو 50 عامًا من العمر التشغيلي المتبقي، فإن دمج تخطيط الإغلاق في أعمال التعدين ومعالجة المعادن يمكن أن يؤدي إلى قيمة لكل من الشركة والمجتمع الأوسع. إنّ الأنشطة المرتبطة بتنمية الموارد المعدنية لها تأثير كبير على الجوانب الاجتماعية والبيئية للموقع. أي اضطراب في الموقع، حتى في المراحل الأولى من المشروع، يفرض التزامًا قانونيًا وماليًا بالإغلاق على شركة التعدين.

أصبحت المجتمعات والحكومات ومؤسسات الإقراض تدرك أكثر فأكثر فائدة التخطيط الجيد للإغلاق وتطالب به كجزء من عملية السماح بالعمليات الجديدة أو الموسعة. إن إغلاق الأصل، سواء كان منجمًا أو منشأة لمعالجة المعادن، ليس أمرًا مباشرًا بشكل عام ويتطلب التعامل مع عدم اليقين بشأن الظروف والأحداث المستقبلية المتعلقة بأسعار السلع الأساسية، وطلبات أصحاب المصلحة، والمتطلبات التنظيمية، والظروف البيئية، ودرجة الخام. من الناحية المثالية، يتم التخطيط للإغلاق بعناية ويحدث مع استنفاد الموارد المعدنية، ولكن ليس من غير المألوف أن تأتي إعلانات الإغلاق فجأة مع انخفاض أسعار السلع الأساسية أو بعض الأحداث الأخرى غير المخطط لها. يشمل تخطيط الإغلاق على أساس المخاطر عدم اليقين هذا. إغلاق الأصل هو عملية تعمل نحو نقطة النهاية التي يمكن الإشارة إليها بالاكتمال. يعد التخطيط للإغلاق الناجح مهمة معقدة ومتعددة التخصصات وضرورية لتقليل المخاطر طويلة المدى لشركة التعدين والبيئة وأصحاب المصلحة المتأثرين.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم إرشادات عملية أساسية بشأن تخطيط الإغلاق. ينبغي اعتبار المعلومات المقدمة مجرد لمحة أولى عن النظام الواسع النطاق لتخطيط الإغلاق. في السنوات الأخيرة، تم إنشاء عدد من الوثائق الشاملة والمتخصصة من قبل الحكومات والاتحادات الصناعية والمنظمات غير الحكومية حول موضوع تخطيط إغلاق الأصول والضمان المالي، مثل تلك المتاحة من خلال المجلس الدولي للتعدين والمعادن على: www.icmm.com

## • استكمال دورة حياة الأصول - أهداف خطة الإغلاق

إن عملية الإغلاق المكتملة بنجاح هي تلك التي يتم فيها إعادة تأهيل الأرض المتضررة من الأصل إلى حالة مستدامة. من الناحية المثالية، في هذه الحالة المكتملة، تتخلى شركة التعدين عن ملكية عقد إيجار التعدين لمستخدم أرض آخر مع تقليل المسؤولية المستمرة. لا يمكن تحقيق هذه الحالة المكتملة المستدامة إلا من خلال التخطيط الدقيق والمستنير على المدى الطويل. تقع مسؤولية التخطيط للإغلاق على عاتق شركة التعدين، ولكن لا يمكن أن يتم ذلك في فراغ. يجب على شركات التعدين إشراك الحكومات والمجتمعات التي تشكل جزءًا منها وأصحاب المصلحة الآخرين في التخطيط للإغلاق لتحقيق نتيجة إغلاق ناجحة.

وعلى نحو متزايد، تضع المؤسسات المالية التي تقرض رأس المال لمشاريع تنمية الموارد المعدنية معايير عالية لتخطيط إغلاق الأصول في سعيها إلى زيادة القيمة من المشروع وتقليل المخاطر.لقد تعلمت هذه المؤسسات دروسًا قاسية من الماضي حيث أدت ممارسات الإغلاق التشغيلي السيئة إلى تركات مستمرة من تلوث المياه، والمخاطر المتعلقة بالسلامة والصحة، وما نتج عن ذلك من غضب عام واستمرار الالتزامات. لدى العديد من البلدان لوائح محددة تتعلق بتخطيط الإغلاق وإكماله. ومع ذلك، لا توجد حاليًا هيئة حوكمة عالمية شاملة

تغطي إغلاق منشآت المناجم ومعالجة المعادن، ولا تزال هناك مناطق في العالم تكون فيها قواعد الإغلاق في حدها الأدنى أو لا وجود لها.

أصبح أصحاب المصلحة الخارجيون في مجال التعدين مثل المجتمعات المحلية ومجموعات الحفظ والمدافعين عن التنوع البيولوجي أكثر تطورًا بشأن نتائج ممارسات تخطيط الإغلاق الجيدة والسيئة. وإذا أتيحت الفرصة، يمكن لأصحاب المصلحة الخارجيين أن يصبحوا شركاء في التخطيط للإغلاق، بما يعود بالنفع على الجميع في نهاية المطاف. يتطلب التخطيط الجيد للإغلاق لتحقيق نتيجة استكمال التعدين المستدام التواصل والمشاركة مع أصحاب المصلحة لتطوير أهداف خطة الإغلاق المتفق عليها، والتي ينبغي أن تشمل ما يلي:

- الامتثال للمتطلبات التنظيمية أو الممارسات الرائدة في الصناعة حيث تكون المتطلبات التنظيمية المحلية غير كافية لإدارة المخاطر.
- حماية الصحة العامة والسلامة والرفاهية على المدى الطويل.
- تقدير الاستدامة البيئية.
- التخفيف من الآثار الاجتماعية والاقتصادية أثناء الإغلاق وبعده.
- توفير أساس معقول لتقدير وإدارة تكاليف الإغلاق.
- تقليل التكاليف التي تتحملها شركة التعدين والحكومة والجمهور.
- تحقيق شروط الاستخدام المستدام للأراضي على النحو المتفق عليه مع أصحاب المصلحة.
- تعزيز سمعة شركة التعدين باعتبارها شركة مواطنة مسؤولة، وضمان الحفاظ على قيمة المساهمين.

يعد التوقيت وكيفية تحقيق هذه الأهداف خلال دورة حياة الأصول أمرًا محددًا جدًا للموقع. وقد لا تسمح أنواع معينة من المناجم (مثل رواسب النحاس السماقي وغيرها من مناجم الصخور الصلبة) ومراكز معالجة المعادن بأي عملية إعادة تأهيل أو استخلاص متزامنة أو تدريجية (أو الاستخلاص وإعادة التأهيل بالتبادل) أثناء التشغيل المرحلة الأولى لأن المناطق المضطربة (مثل الحفرة المفتوحة، وحجز المخلفات، ومقالب النفايات، ومباني التركيز) تكون قيد الاستخدام المستمر أثناء العمليات. وقد تقضي الأصول من هذا النوع عقودًا عديدة في التخطيط لأنشطة الإغلاق التي ستحدث في نهاية عمر الأصول life-of asset (LOA).

من ناحية أخرى، تتمتع مناجم الفحم بشكل عام بفرصة التنفيذ والحصول على موافقة على إعادة التأهيل طوال عمر الأصل. ومع ذلك، فحتى المشاريع التي تساعد على الإغلاق التدريجي ستواجه تحديات مرتبطة بتغير خطط عمر الأصول مع ارتفاع أسعار السلع الأساسية وانخفاضها. ليس من غير المألوف أن تضطر مناجم الفحم إلى الحفر أو التغطية لإعادة التأهيل الراسخة لأن طبقات الفحم التي كان يُعتقد في السابق أنها غير اقتصادية من المقرر الآن استخراجها.

وتشكل الظروف الاقتصادية التي تسير في الاتجاه الآخر بشكل أكثر شيوعًا عقبة خطيرة أمام التخطيط للإغلاق المستدام والانتهاء النهائي من عملية الإغلاق. عادة ما يؤدي انخفاض أسعار السلع الأساسية إلى نقص الموارد اللازمة لإعادة التأهيل التدريجي (إذا استمر المنجم في العمل) وتنفيذ الإغلاق إذا تم الإعلان عن الإغلاق المفاجئ للأصل.

لتقليل تقلبات الدورات الاقتصادية وتوافر الموارد، يجب بذل جهد من جانب شركة التعدين لفهم الظروف المتغيرة والتنبؤ بها والتي قد تؤثر على تخطيط الإغلاق وتنفيذه بالإضافة إلى التغييرات المحتملة في احتياجات أصحاب المصلحة. ويجب تعديل خطط الإغلاق بمرور الوقت وتخصيص الموارد الكافية للظروف الاقتصادية الصعبة. قد تحتاج عملية ما بعد التعدين لاستخدام الأراضي والأهداف الأخرى إلى التغيير وفقًا للتغيرات في خطة طلب عمر الأصول والعوامل الخارجية.

## • دمج تخطيط الإغلاق لتحقيق الفعالية

إن التزام شركة التعدين بممارسات التخطيط الجيدة للإغلاق سيؤتي ثماره في تقليل التزامات الشركة وتحسين سمعتها لدى أصحاب المصلحة. في الماضي، كان التخطيط للإغلاق في كثير من الأحيان نشاطًا قائمًا بذاته في الأعمال، ويتم عادةً كجهد لمرة واحدة للوفاء بالتزام تنظيمي. ليس من غير المألوف أن تكون خطة إغلاق الأصول مسؤولية الوظيفة البيئية في الموقع بينما تقع خطة عمر الأصول (LOA) على عاتق مخططي المناجم ويتم التعامل مع التحديثات على المخصص المالي للإغلاق من قبل قسم المحاسبة، الذي ينصب تركيزه على تلبية المبادئ التوجيهية المحاسبية. يمكن أن يؤدي الافتقار إلى التواصل بين هذه الأقسام المختلفة إلى تخلف نطاق خطة الإغلاق وتفاصيلها بشكل كبير عن التحديثات الحتمية لخطة عمر الأصول (LOA) وأن يصبح شرط الإغلاق الموجود في الدفاتر قديمًا مع كليهما.

لمعالجة مشكلات تخطيط الإغلاق وتحقيق أهداف العمل لإدارة المخاطر، من الضروري التأكد من دمج تخطيط الإغلاق بشكل كامل في الأعمال الأساسية

للأصل. مع تغير ظروف العمل، تتغير خطط عمر الأصول (LOA)، وكذلك يجب أن تتغير خطة الإغلاق. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تتغير تفاصيل ودقة خطط الإغلاق خلال دورة حياة الأصل؛ بدءًا كمفهوم مفاهيمي ثم تصبح أكثر تفصيلًا تدريجيًا بمرور الوقت. أخيرًا، مع تغير اللوائح وتوقعات أصحاب المصلحة، يجب أن تتغير خطة الإغلاق. يجب دمج خطط الإغلاق الفعالة في عدد من المستويات بما في ذلك ما يلي:

- التكامل مع عمر الأصول (LOA) وخطة العمل طويلة الأجل. تربط خطة الإغلاق بالضرورة بين الاضطرابات السابقة والعمليات الحالية وإعادة التأهيل التدريجي والاضطراب المستقبلي المخطط له حتى نهاية عمر الأصول.

- التكامل مع شؤون أصحاب المصلحة الخارجيين. ينبغي أن يركز تخطيط الإغلاق على المشاركة مع أصحاب المصلحة الخارجيين المتأثرين بالإغلاق. وسيشمل ذلك العمل مع الحكومة والمجتمع المحلي والمنظمات غير الحكومية لفهم احتياجاتهم واهتماماتهم. إن التفاعل مع أصحاب المصلحة الخارجيين أثناء تخطيط الإغلاق لا يؤدي فقط إلى الامتثال للوائح، بل يتيح أيضًا تطوير معايير إغلاق قوية لدعم الاستخدام النهائي المقبول للأراضي والمجتمعات الأكثر استعدادًا لدعم الشركة عندما يحين وقت الانتهاء والتخلي عن عقد الإيجار.

- التكامل مع كافة التخصصات الوظيفية ذات الصلة في الموقع. وسيشمل التخطيط للإغلاق وفي نهاية المطاف تنفيذ مشروع الإغلاق نحو الاكتمال الإدارة العليا، والموارد البشرية، وهندسة المشروع، والمتخصصين في تحسين

الأعمال، ومديري البيئة، والعمليات، ومهندسي التخطيط، والشؤون المجتمعية والخارجية، والمستشارين القانونيين، وإدارة المخاطر، والشؤون المالية؛ كلها ضرورية لتحقيق الفعالية. بشكل عام، ستكون الأدوار والمسؤوليات الرئيسية التالية ضرورية للفريق متعدد التخصصات:

- تقدم الخدمات الفنية التصميم الهندسي وخطة عمر الأصول وخطة إعادة التأهيل.
- مهندسو المشروع وأخصائيو التكلفة مسؤولون عن تقديرات التكلفة وتصميم الاختبارات التجريبية اللازمة والتنفيذ من قبل إدارة المشروع.
- يتولى المتخصصون البيئيون مسؤولية تطوير معايير الإغلاق ومتطلبات الأداء من خلال العمل مع ممثلي الحكومة للوفاء باللوائح.
- المتخصصون المجتمعيون مسؤولون عن مشاركة أصحاب المصلحة وبناء سيناريو الإغلاق.
- يتحمل موظفو الشؤون المالية والمحاسبة مسؤولية توفير سجلات مخاطر الإغلاق والحفاظ عليها.
- الإدارة مسؤولة عن تحديد مؤشرات الأداء الرئيسية والمراحل الرئيسية للإغلاق.

يتم تطوير خطط الإغلاق المتكاملة ومراجعتها وتحديثها بدءًا من مرحلة مفهوم عمر الأصول (LOA) والانتقال خلال مراحل الجدوى المسبقة والجدوى والتنفيذ والتشغيل والإغلاق لمشروع تطوير المعادن. طوال هذه الفترة الطويلة، سيؤدي التكامل في المجالات الرئيسية إلى زيادة احتمالية تحقيق خطة الإغلاق لأهداف العمل عند التنفيذ.

## • إنشاء إطار عمل للإدارة

لتخطيط الإغلاق المتكامل من أجل دمج تخطيط الإغلاق بشكل كامل في الأعمال، يعد الالتزام طويل الأمد بمجموعة من المبادئ الأساسية ضروريًا من الإدارة العليا. إن التخطيط للإغلاق ليس مسعى لمرة واحدة، بل هو مسعى يتم على مدى سنوات أو عقود عديدة. الأشخاص المشاركون في التخطيط للإغلاق سوف يأتون ويذهبون؛ ومع ذلك، إذا اعتمدت الشركة إطارًا من المبادئ، فيمكن أن يستمر تخطيط الإغلاق ويتحسن خلال دورة حياة مشروع تطوير المعادن.

ينبغي النظر في قائمة المبادئ الأساسية التالية وتعديلها على النحو المطلوب لاعتمادها باعتبارها «سياسة إغلاق Closure policy» للشركة لتشكيل إطار متين يمكن لفريق تخطيط الإغلاق العمل من خلاله مع مرور الوقت.

**المبدأ الإطاري الأول: المراجعة والتحديثات المنتظمة**

- يجب الحفاظ على خطط الإغلاق طوال دورة حياة جميع أصول التطوير التعديني.
- يجب مراجعة خطط الإغلاق سنويًا بالتزامن مع عملية تخطيط عمر الأصول (LOA). يجب مراجعة خطط الإغلاق وتقديرات التكلفة المرتبطة بها عندما يكون هناك تغيير كبير في خطة عمر الأصول (LOA)، وعندما تكون هناك لوائح أو عوامل تؤثر بشكل كبير على خطة الإغلاق وتقديرات التكلفة المرتبطة بها.
- يجب أن تخضع عمليات تخطيط الإغلاق وخطط الإغلاق وتقديرات التكلفة لإجراءات إعداد التقارير والتدقيق والحوكمة، لا سيما عندما يكون هناك خطر حدوث أخطاء جوهرية في التقارير المالية أو تأثير كبير على قرارات العمل.

## • المبدأ الإطاري الثاني: إدارة مخاطر الأعمال

يجب أن يتضمن تخطيط الإغلاق تقييمًا لجميع المخاطر المرتبطة بالإغلاق بما في ذلك، على سبيل المثال لا الحصر، المخاطر المرتبطة بما يأتي:

- التزامات ما بعد الإغلاق.
- احتياجات أصحاب المصلحة الخارجيين وتطلعاتهم واهتماماتهم.
- تأجيل أو تأخير إعادة التأهيل التدريجي أثناء العمليات.
- عدم اليقين في الجوانب البيئية أو التنظيمية أو المجتمعية.
- عدم اليقين في تقديرات التكلفة.
- عدم اليقين في الجوانب الفنية للإغلاق؛ والتأخير في تنفيذ الإغلاق.

يجب تطوير إدارة مخاطر الإغلاق وفقًا لمعايير إدارة المخاطر الرسمية والإرشادات المرتبطة بها المعتمدة من قبل إدارة الشركة.

## • المبدأ الإطاري الثالث: تقديرات دقيقة للتكلفة

- يجب إعداد خطط الإغلاق وفقًا لمبادئ إدارة المشروع وتحوي على تفاصيل كافية لتحديد تكلفة الإغلاق بالقدر اللازم لإدارة مخاطر الإغلاق.
- سيتم تطوير خطط الإغلاق تدريجيًا وفقًا لمرحلة دورة حياة مشروع تطوير المعادن.
- سيتم إجراء الدراسات البيئية والهندسية لزيادة التأكد من تقديرات تكلفة الإغلاق حيث يقترب الاستثمار من الحاجة إلى تنفيذ نشاط الإغلاق المطلوب.
- يجب أن تتضمن جميع خطط الإغلاق تقديرًا لمخصص الإغلاق وفقًا للمبادئ المحاسبية الدولية.

## • عمليـــة التخطيـــط للإغـــلاق

سواء تم إنشاء خطة إغلاق من الصفر لمشروع جديد، أو مشروع استكشاف، أو ببساطة مراجعة خطة إغلاق موجودة لممتلكات تعدين كبيرة وناضجة، فإن الخطوات في عملية تخطيط الإغلاق هي نفسها بشكل أساسي. سيختلف مستوى التفاصيل والجهد المطلوب لتطوير خطة الإغلاق من خلال هذه العملية اعتمادًا على المشكلات الخاصة بالموقع ومرحلة دورة حياة المشروع.

قد يتطلب الإغلاق المفاجئ أو غير المخطط له بسبب انخفاض أسعار السلع الأساسية أو أي قرار تجاري سلبي آخر تسريع هذه العملية ويتطلب تنفيذ أشياء مثل خطط الرعاية والصيانة المؤقتة أثناء وضع اللمسات النهائية على خطة تنفيذ الإغلاق.

## • الخطوات الأساسية في التخطيط للإغلاق

**الخطوات الموصى بها لتخطيط الإغلاق هي كما يأتي:**

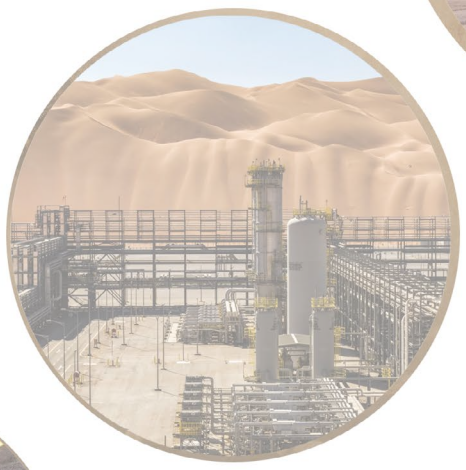
- ضبط السياق من خلال مراجعة لوائح البيانات الأساسية وخطط LOA وخطوط الأساس البيئية وخطط الإغلاق السابقة. ومراجعة أصحاب المصلحة والمشاركة حسب الحاجة لفهم مشكلاتهم. ومراجعة الوضع الحالي لخطة إعادة التأهيل التدريجي والجدول الزمني للتنفيذ لتحديد ما إذا كانت خطة LOA وخطة إعادة التأهيل التدريجي وخطة الإغلاق متوافقة.
- وضع استراتيجية ومعايير خطة الإغلاق بما في ذلك النطاق والأهداف والافتراضات ومعايير التصميم ومعايير الإنجاز. وهذا يضع الأساس لجميع الخطوات اللاحقة. ومن الضروري أن يتوصل فريق الإغلاق إلى اتفاق بشأن المعايير والاستراتيجية لإكمال التخطيط بكفاءة.

- تقييم المخاطر وتقييم خيارات الإغلاق. تشكل عملية تقييم مخاطر الإغلاق العمود الفقـــري لتخطيط الإغلاق المتكامل، وبالتالي ينبغي استخدام عملية تقييم مخاطر موحدة، مثل تلك التي طورتها أستراليا ونيوزيلندا (AS.NZS 4360:2004). يعد إشراك المجموعة المناسبة من الأشخاص ذوي المعرفة التفصيلية بالموقع أمرًا ضروريًا لتحديد جميع مشكلات المخاطر. وينبغي تطبيق تقنيات تحليل الخيارات القياسية التي يمكن استخدامها في أي مشروع كبير ينطوي على تكاليف كبيرة لضمان الدقة الكافية في توفير الأساس لخطة الإغلاق المفضلة.
- حدد خطة الإغلاق المفضلة من تحليلات الخيارات للتحكم في مخاطر الإغلاق عند مستوى مقبول. عادة ما تكون هذه الخطوة عملية تكرارية مع الخطوتين 3 و5، حيث يدخل تقدير التكلفة وملف المخاطر بالضرورة في عملية صنع القرار. سيتم تعديل خطة الإغلاق المفضلة مع التغييرات في خطة LOA والتغييرات الأخرى في السياق وملف تعريف المخاطر الخاص بالموقع مع استمرار المراجعات السنوية بمرور الوقت.
- إنشاء تقديرات تكلفة قوية لخطة الإغلاق المفضلة وفقًا لمبادئ الهندسة وإدارة المشروع السليمة. يُعد تقدير التكلفة الهندسية بمثابة الأساس لعدد من التقديرات الفرعية، بما في ذلك تقييم الاستثمار الداخلي في الأعمال التجارية، والمخصص المحاسبي للبيانات المالية والضمان المالي الحكومي أو السندات. يمكن إنشاء كل من التقديرات الحتمية والاحتمالية اعتمادًا على مستوى عدم اليقين. قد تتطلب التقنيات الاحتمالية مثل محاكاة مونت كارلو جهدًا متخصصًا ولكنها يمكن أن تتضمن بشكل فعال جدًا عدم اليقين بشأن عناصر مثل التلوث غير المحدد وتقلب التكلفة. مع اقتراب الموقع من الإغلاق، ستكون هناك حاجة إلى متخصصين في الهدم والقيمة الإنقاذية وخبراء علاجيين لتحديد تكلفة خطة الإغلاق القابلة للتنفيذ.

- وضع خطة عمل للتحسين. يتطلب التخطيط الفعال للإغلاق المتكامل تحسين قاعدة المعرفة استعدادًا لدورة المراجعة اللاحقة وما بعدها. وسيشمل ذلك المزيد من المشاورات مع أصحاب المصلحة، والدراسات الهندسية والبيئية، ودراسات توصيف الموقع، وتعريف التلوث الحالي، والاختبار التجريبي لإعادة التأهيل. قد تتطلب هذه الإجراءات تخصيص موارد كبيرة، وبالتالي من الضروري وجود خطة عمل رسمية لتحسين تحديد الجدول الزمني والميزانية.
- تحديث وثيقة الإغلاق ونظام إدارة السجلات. تمثل عملية خطة الإغلاق استثمارًا كبيرًا في الموارد البشرية والمالية على مدار سنوات عديدة. يعد وجود أرشيف للعملية والمعلومات المستخدمة والقرارات المتخذة والذي يمكن استرجاعه بسهولة أمرًا ضروريًا للمراجعات وعمليات التدقيق السنوية.

## • مخاطـــر الإغـــــلاق

يتطلب تقييم مخاطر الإغلاق تقييمًا منهجيًا ومنظمًا. وكما ذكرنا، فإن تقييم المخاطر يشكل أساس خطة الإغلاق وتقديرات التكلفة. سينصب التركيز في تقييم مخاطر الإغلاق على إنشاء ملف تعريف مقبول للمخاطر للشركة وجميع أصحاب المصلحة الآخرين عند الانتهاء من مشروع الإغلاق. ستكون أهمية المخاطر أحد الاعتبارات المهمة لفريق الإغلاق لمنع عملية التخطيط للإغلاق من التورط في تفاصيل غير ضرورية. من المفيد للفريق تحديد عتبة الأهمية النسبية في بداية عملية التخطيط للإغلاق كافتراض. سيعتمد هذا إلى حد كبير على مكان وجود الأصل في دورة الحياة، وفئة خطة الإغلاق (المفهوم، والجدوى المسبقة، والجدوى، وما إلى ذلك)، والحجم الإجمالي لخطة الإغلاق.



# الفصل الرابع

# مستقبل صناعة التعدين

| | |
|---|---|
| الاتجاهات الحديثة في التعدين | تحديات صناعة التعدين |
| اقتصاديات صناعة التعدين | الاقتصاد الدائري |
| سلاسل قيم المعادن | التعدين والتنمية المستدامة |
| دور الذكاء الاصطناعي في التعدين | تقييم الأثر البيئي |

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

# مستقبل صناعة التعدين

## مُقَدِّمَة

التعدين صناعة قديمة وعالمية تعود أصولها إلى أسس الحضارة وأثرت على العديد من الاقتصادات الكبرى عبر التاريخ. وحتى اليوم، يمثل التعدين ما يقرب من 12 % من الناتج المحلي الإجمالي العالمي، مقاسًا بالإيرادات والمنتجات المباعة. لقد كان العالم يحتاج دائمًا إلى التعدين وما زال يحتاج إليه. لكن التعدين يواجه الآن العديد من التحديات الكبيرة، والتي لم نشهد الكثير منها من قبل. إن تزايد عدد السكان والاقتصادات العالمية يعني زيادة الطلب على المعادن، وسوف يستمر هذا الاتجاه في الارتفاع. ومع ذلك، أصبح استخراج المعادن ومعالجتها أمراً صعباً على نحو متزايد، كما أصبح استنزاف موارد الأرض وتأثير ذلك على البيئات الهشة مصدر قلق اجتماعي متزايد.

هناك ثلاثة اتجاهات رئيسية تعمل على إحداث تحول جذري في الصناعة. أولاً، التحول من الديزل إلى الكهرباء. ثانيا، هناك التحول الرقمي، الذي يؤدي إلى زيادة الإنتاجية واستخدام أكثر استدامة للموارد مع خفض تكاليف المدخلات. الاتجاه الثالث هو الأتمتة، والتي ستؤدي أيضًا إلى زيادة الإنتاجية وتغيير الطريقة التي نعمل بها. يمكن لكل شركة تعمل أو تخدم قطاع التعدين أن تشارك في تشكيل المستقبل ويمكنها البدء على الفور. ستكون المناجم المستقبلية خالية من ثاني أكسيد الكربون ورقمية ومستقلة. لابد أن نعمل على تغيير الطريقة التي تعمل بها المناجم، ونخلق بيئة رقمية آمنة ونظيفة ومستدامة، مع قوة عاملة تقوم بمهام مثيرة ومحفزة.

تواجه صناعة التعدين العديد من التحديات الكبيرة للنمو المستقبلي، لذا فإن التغيير في التعدين مدفوع بالتقنية والابتكارات والعمليات الأفضل والمتطلبات الاجتماعية وحتى الفرص الجديدة. بينما ننفض الغبار عن الكرة البلورية ونفحص ما يخبئه المستقبل لصناعة التعدين، قد تحمل أربعة مسارات مفتاح النجاح في المستقبل (التحول الرقمي: المنجم «الذكي». - تقنية وأدوات التعدين: الروبوتات والآلات والطائرات بدون طيار - الاستدامة وحماية البيئة تقودان الاتجاهات المستقبلية - حدود جديدة: أعماق البحار والفضاء وإعادة الاكتشاف).

ومن الممكن أن يؤدي التنفيذ الذكي للتقنيات الرقمية مثل إنترنت الأشياء الصناعية (IIoT) والأتمتة إلى تحويل التعدين، مما يجعله أكثر أمانًا وإنتاجية وكفاءة واستدامة وربحية، وبالتالي أكثر قدرة على مواجهة التحديات. عندما نأخذ في الاعتبار أنه على مدار الخمسة عشر عامًا الماضية، ارتفع متوسط تكلفة إنتاج النحاس بأكثر من 300 %، في حين انخفضت الدرجة بنسبة 30 %، فإن هذه الكفاءات الجديدة توفر طريقة فعالة من حيث التكلفة لزيادة الربحية، أحد أكبر المجالات الواعدة هو قدرة إنترنت الأشياء الصناعية على تحويل العمليات اليدوية والميكانيكية باهظة الثمن وغير الفعالة إلى عمليات رقمية. تتيح تقنية إنترنت الأشياء الصناعية (IIoT) لمؤسسات التعدين جمع كميات هائلة من البيانات حول عملياتها عن بعد وفي الوقت الفعلي من خلال أجهزة استشعار متصلة بالإنترنت. يمكن بعد ذلك التعامل مع هذه البيانات واستخدامها لتحسين الكفاءة في الموقع، وضمان بيئة آمنة لعمال المناجم ومراقبة الحالة التشغيلية للآلات.

وما لا يعرفه الكثيرون هو أن قطاع التعدين يحمل مفتاح التطور التكنولوجي اللازم لجعل العالم أكثر خضرة. يعد التعدين محركًا مهمًا لتقدم المجتمعات.

مع بدء العالم في انتقاله البطيء نحو إزالة الكربون، يحتاج إنتاج التقنية الخضراء إلى زيادة كبيرة ويلعب التعدين دورًا مركزيًا في هذه الثورة. لإنتاج العناصر اللازمة للانتقال، يحتاج العالم إلى زيادة إنتاج المعادن مثل: النحاس (المستخدم في كل الأجهزة التكنولوجية تقريبًا)، النيكل (المستخدم في البطاريات، الهواتف، أجهزة الكمبيوتر)، الكوبالت (يستخدم في الأدوات المتقدمة وبطاريات تخزين أيون الليثيوم) والمعادن الأرضية النادرة (المستخدمة في مجموعة من التقنيات الخضراء مثل توربينات الرياح والألواح الشمسية، وكذلك في المعدات الإلكترونية). العديد من هذه المعادن حاليًا عند مستويات إنتاج منخفضة، وبالتالي لتلبية الطلب المستقبلي المطلوب لمستقبل أكثر استدامة، نحتاج إلى زيادة كبيرة في التعدين. مثل المراحل السابقة من التقدم الكبير، تعد صناعة التعدين ضرورية.

في حين أن الطلب طويل الأجل على العديد من سلع التعدين قوي، إلا أن هناك عقبات يجب التغلب عليها. لن تكون جميع مناجم السلع الأساسية التي تواجه المستقبل اقتصادية - على سبيل المثال، توجد بعض المعادن المهمة بكميات صغيرة وفي ظروف جيولوجية صعبة، مما يجعل تكاليف الإنتاج صعبة. إن التوفيق بين التقنية والموارد المناسبة سوف يفصل بين المشاريع الناجحة وغير المستدامة بكل معنى الكلمة. وفي الوقت نفسه، تقع بعض المعادن المهمة على مقربة من الصناعات والمجتمعات الأخرى.

التحدي الآخر الذي يواجه الصناعة هو تقليل انبعاثات الكربون الناتجة عن عملية التعدين نفسها. وكما هو الحال مع العديد من الصناعات، فقد بدأت هذه الرحلة، ولكن أمامها طريق طويل لتقطعه. ولتحقيق أهداف انبعاثات الكربون، سنعتمد على التقنيات الجديدة. وفي حين أن هذه التقنيات لم يتم تطويرها بعد على المستويات التشغيلية، فإن التاريخ يشير إلى أن مثل هذه التطورات يمكن

تحقيقها بسرعة عندما يكون الاستثمار متوافقا مع التطور. لدى قطاع التعدين الكثير ليفخر به، ولكن هناك أيضًا العديد من التحديات التي يجب مواجهتها، وأبرزها تحديد دوره في خلق عالم أكثر خضرة. ولتحقيق النجاح، سيكون من المهم للقطاع أن يلبي التوقعات المتزايدة للمجتمعات. وبالنسبة لأولئك الذين يعتبرون صناعة التعدين مجالًا جيدًا للاستثمار، عليهم أن يتذكروا جيدا أنه قد لن ينجح كل من لديه مشروع معادن مهم.

**إن من أولويات البحث والتطوير للمعادن الحرجة:** تنويع إمدادات المواد الحيوية بما في ذلك الإنتاج والتصنيع المحلي, تطوير البدائل وتعزيز عملية إعادة التدوير وإعادة الاستخدام الأكثر كفاءة. يقوم البحث والتطوير حاليا في جميع أنحاء العالم بدفع غلاف ما هو ممكن بالنسبة لمستقبل التعدين ابتداء من المناجم المستقلة بالكامل مع المركبات بدون سائق والآلات الروبوتية إلى الابتكار الذي يمكن أن يقلل من النفايات عن طريق إعادة استخدام منتجات التعدين الثانوية للآخرين للاستخدامات التجارية.

وعموما، ليس هناك شك في أن صناعة التعدين تواجه بعض التحديات الكبيرة. إن الطلب المتزايد على المعادن والفلزات إلى جانب الضغط لزيادة الإنتاج بفعالية من حيث التكلفة يضع العديد من عمليات التعدين في موقف صعب. ولحسن الحظ، يوفر التحول الرقمي والتقنيات الجديدة لشركات التعدين فرصا ذهبية لتصبح أكثر كفاءة، وتعزيز الإنتاج، وخفض التكاليف مع جعل بيئة العمل أكثر أمانا. وعلى الرغم من أن الضغط من أجل الاستدامة وحماية البيئة قد يواجه رياحا معاكسة، فإن عمليات التعدين أصبحت على نحو متزايد خضراء وتستفيد أيضا من الدفع نحو المواد اللازمة لبناء السيارات الكهربائية ومصادر الوقود المتجددة للطاقة. وأخيرًا، فإن الفرص المستقبلية للتعدين في أعماق البحار والفضاء والمناجم المهجورة تعني أن الصناعة لديها المزيد من الحدود التي يتعين عليها التغلب عليها.

# الاتجاهات الحديثة في التعدين

على الرغم من أن الاتجاهات الحالية في مجال التعدين قد تم التطرق اليها في الفصول السابقة، إلا أن العديد من جوانب هذا الموضوع تستحق المزيد من الدراسة هنا.

## • خصائص المادة الخام

لقد تقبلت الصناعة بالفعل حقيقة أن غالبية المعادن المستقبلية في العالم ستأتي من عمليات تشغيل منخفضة الجودة، وكبيرة الحجم، وعالية الحمولة، وميكنة جدًا. وقد بدأ هذا الاتجاه بالفعل مع التحرك نحو عمليات استخراج الفحم ذات الحمولة العالية، والحفر المفتوحة الضخمة لاستخراج النحاس (وأحيانًا الذهب)، وتعدين الخام الذي كان يعتبر قبل خمسين عامًا مثيرًا للاهتمام ولكن استخراجه غير اقتصادي، وبالتالي غير قابل للاستغلال تقريبًا. ستبقى العمليات الأصغر لها مكان، ولكن الاتجاه نحو عمليات الكهوف الضخمة، والحمولة العالية، والتعدين الآلي سوف يزيد من وتيرة العمل.

في الواقع، مع التلاشي السريع لاحتمال اكتشاف جسم خام جديد عالي الجودة يمكن استخراجه بسهولة، قد يأتي الوقت قريبًا لاعتبار الترشيح في الموقع لبعض الرواسب المعدنية منخفضة الجودة وعالية الحمولة أمرًا جذابًا. على الرغم من أن المواد المضيفة يجب أن تكون نفاذية نسبيًا وأن يكون المعدن قابلًا للاستخراج بسهولة عن طريق الترشيح الحمضي أو القلوي لكي تكون طريقة الاستخراج هذه عملية، إلا أنه قد يكون جذابًا استخراج بعض الرواسب المعدنية ذات الدرجة المنخفضة والحمولة الكبيرة نسبيًا بهذه الطريقة، حيث تكون الطرق التقليدية سيكون غير اقتصادي. وعلى الرغم من أنه من الواضح أنه لا يمكن استخراج كل المعادن بهذه الطريقة، إلا أنه في كثير من الحالات تستجيب هذه الرواسب للترشيح الاقتصادي في الموقع.

## • العوامل الاجتماعية والبيئيــة

للأسف، قد يبدو للبعض أن فكرة التعدين هي مغامرة مشرفة، غالبًا ما تتم في مناطق بعيدة وغير مضيافة، والتي تهدف إلى إنتاج اللبنات الأساسية التي تتقدم عليها الحضارة العالمية. اليوم، غالبا ما يتم تصوير التعدين على أنه وحش يدمر كل شيء في طريقه ويخلق الثروة للقلة والبؤس المستمر للكثيرين. وهذا التصوير غير عادل، على الرغم من أن شركات التعدين لا تفعل الكثير لدحضه ثم تعزيزه من خلال معارضتها للتنظيم البيئي.

ويتهم النقاد صناعة التعدين بتجاهل القضايا البيئية والاجتماعية. وتتجاهل مثل هذه الانتقادات حقيقة مفادها أن التقنيات اللازمة لمعالجة المشاكل البيئية مثل الصرف الحمضي لم تكن موجودة منذ جيل مضى. علاوة على ذلك، فإن المصانع، ومصانع معالجة المواد الكيميائية والأغذية، ومحطات الطاقة الحرارية، والتي تكون عمومًا أقرب إلى المراكز السكانية من المناجم، تنتج في بعض الأحيان قدرًا من التلوث أكبر من المناجم.

ومع ذلك، فإننا لم نعد نعيش في عصر يمكن أن يتم فيه التعدين في عزلة رائعة. وينبغي لمهندسي التعدين أن يستمدوا الشجاعة من حقيقة أن المشاركة وليس المواجهة هي شعارنا عندما يتعلق الأمر بالمستقبل. ورغم أنه قد يكون من المبالغة أن نتوقع من العالم ككل أن يحترم هندسة التعدين كمهنة، فإن مواطنيه قد يعترفون في الوقت المناسب بالدور الأساسي الذي يؤديه التعدين والقيود التي يعمل في ظلها.

في حين أن غالبية الصناعة تعتقد بالفعل أن التعدين يجب أن يتطور ويعمل في انسجام مع البيئة، فإن التحدي الحقيقي هو إقناع البنية الاجتماعية والوكالات الحكومية والمنظمات غير الحكومية بأن التعدين يمكن (وسيتم) أن يتم بطريقة

آمنة وبيئية. بطريقة متوافقة. إن قبول التعدين لمسؤوليته فيما يتعلق بالقضايا البيئية والاجتماعية أصبح الآن متأصلاً في كل جانب من جوانب الصناعة تقريبًا، بنفس الطريقة التي أصبحت بها السلامة. وقد أتت عملية إعادة التثقيف هذه بثمارها من حيث عكس صورة صناعة التعدين، التي اكتسبت قدرًا كبيرًا من التغطية الصحفية السلبية بغض النظر عما فعلته.

حققت غالبية شركات التعدين تقدمًا هائلاً لمعالجة القضايا البيئية والاجتماعية. ومع ذلك، فإن استخراج الموارد الطبيعية يجتذب الآن ذلك النوع من المسؤولية والتدقيق الذي لا تخضع له سوى صناعات عالمية قليلة أخرى. لقد تطورت صناعة التعدين (ولا تزال تتطور)، على الرغم من أنه ربما يكون من المبالغة أن نتوقع من أولئك خارج الصناعة أن يعترفوا بكل إخلاص بما تفعله الصناعة في الظروف الصعبة، ومع ذلك، خارج نطاق الترخيص القانوني/ الحكومي للعمل، قبل التعدين مع ذلك الالتزام العام بالترخيص الاجتماعي للعمل مع المجتمع ككل في المناطق التي يعمل فيها. ويتزايد قبول مثل هذه العقود غير الرسمية باعتبارها سلعة لا بد منها ولا يمكن الاستهانة بقيمتها التجارية. ويتزايد قبول مثل هذه العقود غير الرسمية باعتبارها سلعة لا بد منها ولا يمكن الاستهانة بقيمتها التجارية.

## • عدم اليقين الاقتصادي

شهد الربع الأول من عام 2008م سلسلة من الكوارث الاقتصادية العالمية التي اجتمعت لتخلق تسونامي مالي أثر على كل دولة تقريبًا وكل صناعة، بصرف النظر عن أهميتها ومدى نجاح إدارتها. ومع بدء ظهور هذه الأزمة، كان هناك اعتقاد قصير المدى بأن التعدين، باعتباره صناعة أساسية، سوف ينجو من غالبية التداعيات. ومع ذلك، فإن الانكماش في الصناعات التحويلية يؤدي حتما إلى انخفاض الطلب على المواد الخام مثل المعادن. وبالتالي، كان من المحتم أن تتبع صناعة التعدين أيضًا مسارًا ماليًا هابطا خاصًا بها.

ومع أن هذا التوجه الوحشي والسريع نحو الهاوية الاقتصادية كان غير متوقع على الإطلاق، إلا أن صناعة التعدين نجت لحسن الحظ ويبدو أنها عادت إلى مستوى ما قبل الأزمة. ومع ذلك، فقد كانت هناك حتمًا بعض التأثيرات الكبيرة. اهتزت الثقة في هذه الصناعة الأولية مع تنفيذ عمليات تسريح كبيرة للعمال في بعض العمليات، وتخصيص عمليات رعاية وصيانة أخرى، وتأجيل التوسعات المخطط لها في عمليات أخرى أو إلغاءها تمامًا. مع أن الثقة تعرضت لضربة مؤقتة، إلا أن الاقتصادات الأساسية للتعدين لا تزال سليمة.

لقد اقترب الاندماج المتوقع للعديد من شركات التعدين الكبرى من أن يصبح حقيقة واقعة. وفي العديد من الحالات البارزة، كان المساهمون الذين لم يروا أي حاجة إلى أي تكتلات جديدة متشككين وصوتوا بصوت عالٍ على نحو غير معهود. ورأى العملاء أن عمليات الاندماج هذه تمثل اتجاهًا خطيرًا من شأنه أن يضعف موقفهم التفاوضي، لأنها تعطي قدرًا كبيرًا من النفوذ لعدد أقل من موردي المواد الخام. ورأت المؤسسات المالية والمحللون أن العديد من عمليات الاندماج بمثابة تبرير منطقي، وعندما لم تتحقق أي منها بدا أنها ستحدث بمجرد توفر الأموال الجاهزة لتمويل مثل هذه عمليات الاستحواذ مرة أخرى.

# الاتجاهات المستقبلية في صناعة التعدين

تعد صناعة التعدين مسؤولة عن 4 % إلى 7 % من انبعاثات الغازات الدفيئة العالمية، كما تتحمل مسؤولية الالتزام بخفض الانبعاثات عبر سلسلة التوريد بأكملها. ويشمل ذلك الابتعاد عن الوقود الأحفوري ودعم الطاقة المتجددة والتقنيات الجديدة. يحتاج قطاع التعدين والحكومات والمستثمرين والمجتمعات إلى العمل معًا للاتفاق على معايير واضحة تعزز الاستدامة البيئية، إلى جانب التنمية الاجتماعية والاقتصادية. وللحد من الآثار الاجتماعية والبيئية للتعدين، يجب على الشركات والحكومات الالتزام باللوائح التي تحمي موارد الهواء والماء والأرض، واحترام حقوق الإنسان الأساسية، واتباع ممارسات مسؤولة اجتماعيا، والمشاركة في المشاورات المناسبة مع المجتمعات المحلية. يجب أن تكون أنشطة التعدين شفافة ويجب أن تكون الشركات مسؤولة أمام المجتمعات المتأثرة بعملياتها. ويجب عليهم أن يكشفوا علناً عن تأثيرات المشاريع والإيرادات التي تجنيها الحكومات منها.

## • التغير المناخي

وبمرور الوقت، سوف تنضج الهستيريا المرتبطة بالاحتباس الحراري العالمي إلى مصطلح تغير المناخ المقبول عالميا؛ ومع ذلك، سيستمر النقاش حول مستوى المساهمة البشرية. ومع ذلك، في هذه الأثناء، فإن النهج المنطقي في تربية الموارد والمزايا التي يمكن أن تسير جنبا إلى جنب مع مثل هذه الاستراتيجية الشاملة على نطاق واسع سوف تغير صناعة التعدين / استخراج المعادن ومعالجتها إلى الأبد.

في أيامنا هذه، يتم تشجيع شركات التصنيع، والمخاوف الصناعية، وحتى مقار الشركات على الحد من بصمتها الكربونية. منظمات التعدين والمعالجة والتكرير ليست استثناءً من الضغط الذي تتعرض له لتقليل تأثيرها البيئي. وفي المستقبل، ستصبح الحاجة إلى تقليل تأثيرها بشكل أكبر أسلوب حياة، وذلك باستخدام قدر كبير من الخيال والتفكير خارج الصندوق. حيث إنّ شركات التعدين التي كانت مهتمة حتى الآن بتوفير الفحم لتوليد الطاقة ستُعرف حاليًا باسم (مزودي الطاقة Power Providers)، وستتألف أعمالها من توفير غاز الميثان من إنتاج طبقات الفحم في الموقع وتوليد الطاقة من مصادر غير تقليدية مثل الطاقة الحرارية الأرضية والطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية الموجية/المد والجزر. مصادر.

## • توليد الكهرباء

طور العديد من الناس في هذا العصر وجهة نظر عدم التسوية بأن الطاقة النووية كانت أمرًا مكروهًا. لا شك أنهم كانوا على بعد جيل واحد فقط من ربط قوة الذرة بالدمار الذي خلفته هيروشيما وناجازاكي، في حين كانت كارثة تشيرنوبيل حقيقية إلى الحد الذي لا يسمح لنا برفضها باعتبارها حدثًا لا يتكرر إلا نادرا. ومع ذلك، ولوضع الأمور في سياقها الصحيح، فإن المفاعلات في تشيرنوبيل كانت ذات تصميم عتيق دون احتواء وكانت سيئة البناء. في السنوات القليلة الماضية، بدأ جيل جديد يبحث بجدية عن بدائل للطاقة الناتجة عن حرق الفحم أو الغاز الطبيعي، ويتطلع إلى توليد الطاقة النووية من جديد. ولسوء الحظ، لا يزال هناك بعض الافتقار إلى ثقة الجمهور في الصناعة التي ثبت أنها تعاني من مشكلات تتعلق بالسلامة. ويتعلق العامل الثاني بإدارة النفايات، والتي تطرح مجموعة مختلفة من قضايا السلامة، ولكن لها حل

هندسي، رغم أنه مختلف عن بناء محطات طاقة ذرية آمنة. يؤدي توليد الطاقة في محطة ذرية (في الظروف العادية) إلى القليل من التلوث ولكنه يؤدي إلى خلق ثلاثة مستويات من النفايات:

- **النفايات ذات المستوى المنخفض**

الملابس والأدوات والورق والمرشحات والخرق الملوثة، والتي تُعرف باسم نفايات التلامس وتحوي على كميات محدودة من النشاط الإشعاعي منخفض المستوى.

- **النفايات المتوسطة المستوى**

أغلفة الوقود ومكونات المفاعل، والجرافيت من قلب المفاعل، والحمأة من النفايات السائلة المشعة.

- **النفايات عالية المستوى**

وقود المفاعلات المستهلك وبقايا ما بعد اليورانيوم الناتجة عن إعادة معالجة الوقود المستهلك وتحويله إلى أسلحة. على الرغم من أن النفايات عالية المستوى يتم توجيهها تلقائيًا لإعادة التدوير، وبالتالي توفير المزيد من الطاقة، إلا أن النفايات ذات المستوى المتوسط والمنخفض هي التي تثبت أنها تشكل عبئًا. يتم حاليًا تخزين كلاهما في مرافق مؤقتة آمنة وواسعة تحسبًا لأن الهندسة ستحل أخيرًا مشكلة كيفية إعادة تدوير (جزئيًا على الأقل) هذا الجبل المتنامي من النفايات المشعة. والبديل هو إنتاج وسيلة مقبولة دوليا لتقليل حجم هذه النفايات إلى حجم يمكن التحكم فيه، وربطها بوسيط خامل ومستقر، ثم ابتكار وسيلة لتخزين هذه النفايات في بيئة آمنة وتسمح في الوقت نفسه المواد التي يمكن استرجاعها بسهولة.

وبالمقارنة، فإن بناء مفاعلات آمنة هو مسألة بسيطة نسبيًا تتعلق بتصميم وبناء الحزام والأقواس، وتتضمن أنظمة آمنة من الفشل، وضوابط صارمة، والتزامًا صارمًا بإجراءات التشغيل. ومن ناحية أخرى، فإن تخزين وإعادة تدوير النفايات المتوسطة والمنخفضة المستوى سوف يتطلب الجمع بين العديد من التخصصات الهندسية والمهارات، والابتكارات التي لم يسمع بها من قبل حتى الوقت الحالي. نحن لسنا بعيدين عن تحويل مشكلة النفايات هذه إلى قضية يمكن التحكم فيها، ومن تلك النقطة فصاعدًا، ستحظى هذه العقبة الرئيسية بالتنفيذ المستدام للطاقة النووية على المدى الطويل (والأهم من ذلك) بالدفعة التي يحتاجها عن جدارة. وباستثناء المناطق التي تتميز بوفرة المياه أو المناطق المرتفعة، حيث تصبح الطاقة الكهرومائية أمرًا محتملاً، فإن الطاقة النووية ربما تكون أفضل ما يمكن أن يتوقعه العالم من حيث توليد الطاقة النظيفة والفعالة والتي يمكن التنبؤ بها والتحكم فيها وغير موسمية وبكميات كبيرة وتتسم بالكفاءة. ومن المؤسف أن نهدر هذه الهبة لفترة أطول من اللازم من خلال الاستمرار في النظر إلى حرق الفحم والغاز باعتباره الخيار الأول، والوحيد في كثير من الأحيان، فيما يتصل بتوليد الطاقة.

## • استهلاك الطاقة

وبغض النظر عن الطريقة التي يتم بها توليد الطاقة، فإنها ستظل قضية استراتيجية وستحكم في المستقبل الطريقة التي تعمل بها الصناعة في مناطق معينة. في عام 1980م، تشير التقديرات إلى أن ما يقرب من 40 % من استهلاك الطاقة في بعض المناطق يتم توجيهه نحو التعدين والسحق والطحن. على الرغم من أن الأمور قد تغيرت بشكل كبير منذ ذلك الحين، إلا أن العديد من المطاحن الكبرى التي لا تزال تعمل تم تركيبها منذ عقود مضت. على الرغم من أن هذه المطاحن لا تزال (ضمن الحدود الهندسية) فعالة كما كانت في أي وقت مضى،

فقد تم طرح السؤال حول ما إذا كانت هناك طريقة أفضل لاستخراج «الخير» من الخام. وبما أن غالبية الخامات التي يتم استخراجها الآن ستكون ذات درجة منخفضة وعميقة وتشكل تحديًا كيميائيًا، فإن غسل الكتل الضخمة في الموقع سيصبح أمرًا شائعًا. ستنقسم هذه العمليات حاليًا إلى أربع فئات: المكسورة بالفعل، أو المكسورة ذاتيًا، أو المكسورة بسهولة، أو تلك التي تتطلب المساعدة من أجل خلق بيئة غنية بالكسور التي ستمكن من حدوث الترشيح. في حين أنه تم اليوم استخراج ثمانية معادن فقط تجاريًا عن طريق التعدين في الموقع أو المحاليل (الكبريت والملح والترونا والناهكوليت والبوتاس والبورون واليورانيوم والنحاس)، فمن خلال التقنية التقدمية للترشيح الحيوي، قد تصبح معادن أخرى متاحة تجاريًا في مستقبل.

ومع ذلك، فإن ممارسة جلب الخام إلى السطح للتمكن من إجراء المعالجة لن تختفي تمامًا. ستقتصر هذه الممارسات الآن على العمليات القائمة منذ فترة طويلة حيث قامت البنية التحتية ومصنع المعالجة بدفع تكاليفها منذ فترة طويلة، وهي عمليات عالية الجودة ومنخفضة الحجم بطبيعتها، أو العمليات التي تكون فيها الكيمياء الجيولوجية للمعادن والصخور المضيفة بحيث فشل الترشيح في إنشاء وسيلة فعالة لإنتاج المشروبات الكحولية الحاملة بكمية كافية أو بمعدل يبرر تبني طريقة عمل جديدة. ومع ذلك، من المرجح أن تؤثر التأثيرات البيئية المحتملة على موارد المياه الجوفية المشتركة على الأماكن التي يمكن استخدام الترشيح فيها في الموقع.

## • قيمة الماء

في معظم أنحاء العالم، تعتبر المياه العذبة سلعة نادرة. ونظرًا لكميات المياه اللازمة لطرق الحفر والسحق والطحن والمعالجة المائية، فإن توفر كمية كافية من المياه أمر بالغ الأهمية للتعدين. وحتى في العديد من الأجزاء غير

الصحراوية من العالم، أصبحت المياه مسألة حياة أو موت. في أجزاء كثيرة من العالم، تعتبر المياه قضية خطيرة، ولكن لم يتم الارتقاء بها بعد إلى مستوى سلعة استراتيجية. ومع ذلك، في المستقبل، سيصبح استخدام المياه في التعدين والمعالجة مشكلة حقيقية. سوف يصبح إنقاذ المياه من المعالجة، بعد فترة أولية من النمو السريع والتفكير الابتكاري، جزءًا أساسيًا من عمليات التعدين اليومية.

يمكن للمياه، التي غالبًا ما تكون مشكلة لا تنتهي أبدًا في العمليات تحت الأرض، أن تكون نقطة البداية لعلاقة تكافلية مع الأنشطة السطحية غير التعدينية مثل الزراعة. وفي أماكن أخرى، سيصبح تكسير الصخور الأولي الدقيق والطحن/الطحن الجاف المماثل لتلك المستخدمة في صناعات الركام والأسمنت ممارسة عادية، وستقتصر المعالجة الرطبة على عدد أقل من العمليات. ومع ذلك، قد تصبح المياه أيضًا إحدى الطرق التي يمكن من خلالها اعتبار التعدين مساهمًا صافيًا في المجتمع الذي يعمل فيه. ومن الانقسام أن العديد من عمليات التعدين (سواء كانت تعمل من السطح أو من تحت الأرض) لا تزال تضخ ملايين الجالونات من المياه بعيدًا عن عملياتها كل شهر. ولذلك، فإن نزح المياه من الأعمال للسماح بالتنمية واستخراج المعادن سيُنظر إليه على أنه منتج ثانوي إيجابي للتعدين وفي الواقع إرث إيجابي في تلك الأجزاء القاحلة وشبه القاحلة من العالم حيث تمثل الزراعة صراعًا مستمرًا ضد الجفاف.

## • الأتمتة Automation

إن التقدم في مجال الأتمتة والروبوتات صار لديه القدرة على إحداث تغيير كبير في طريقة إجراء التعدين في العديد من العمليات الحالية والمستقبلية. تتمثل المزايا الرئيسية للأتمتة ودوافعها في المهام الخطرة والمتكررة و/أو كثيفة العمالة. على الرغم من أن الأتمتة لم تؤثر بشكل كبير بعد على التعدين والمعالجة على

مستوى العالم، إلا أنها بدأت تظهر قيمتها من حيث تحسين السلامة إلى درجة أن الصناعة لديها شعور حقيقي بأنها ستكون عاملا مهما في المستقبل.

تعد الأتمتة مناسبة بشكل خاص لعدد من العمليات الرئيسية: الحفر في عملية الإنتاج، والتعرف في الوقت الفعلي على المواد التي يتم حفرها، والتحميل الآلي، والحركة الدقيقة والآلية للمعدات (سواء كانت منصات الحفر، أو مجارف التحميل، أو شاحنات النقل)، ومراقبة الحركة أجزاء لأغراض الصيانة والتدخل التشخيصي. وجهة النظر الناشئة هي أن التشغيل الآلي يمكن (وسوف) يؤدي إلى تحسينات فورية في الإنتاجية. تعد عمليات Dragline في طليعة الأبحاث التي تهدف إلى العمل عن بعد والمؤتمت بالكامل. ومن خلال الحد من الاختلافات التشغيلية، سيضمن الإدخال المتسق زيادة أحمال المجارف، على سبيل المثال. بالإضافة إلى ذلك، تعني الدقة المحسنة أن مهام التعدين يتم تنفيذها باستمرار في الموقع المطلوب، والمعدل الدقيق، والاتجاه المخطط، والوقت الدقيق.

وأخيرًا، نظرًا لأن الأتمتة تمكن من اتساق الإنتاج (خاصة في الأجسام الخام المتسقة والمنتظمة)، فهذا يعني أن تصميم المنجم لا يحتاج إلى التحديث بشكل مستمر بسبب اختلافات الإنتاج. مع التقدم الذي تم إحرازه في جوانب معينة من التقنية (على سبيل المثال، التعرف على ملف تعريف الجدار)، فقد حان الوقت الذي أصبحت فيه المهام المتكررة، مثل نقل المركبات المتعددة من العمليات الكبيرة تحت الأرض، حقيقة واقعة ويتم تشغيلها من كابينة التحكم على السطح. لا يقوم هذا المرفق بإزالة المشغل من تحت الأرض فحسب، بل يعني أيضًا أن نوبة العمل لمدة 8 ساعات تعني 8 ساعات في نقاط التحكم. بالإضافة إلى ذلك، فإن إجهاد المشغل لا يكاد يذكر. ومع ذلك، ليست كل الأخبار إيجابية. لم يتم القضاء بعد على حوادث التأثيرات الجانبية، التي تمثل

مشكلة كبيرة بالنسبة لناقلات التحميل والتفريغ التي تسير بسرعة في الأنفاق الضيقة، في حين أن الإنتاجية في الساعة لا تزال أقل من الآلات المأهولة. ومن الواضح أنه لا يزال يتعين القيام بالمزيد من العمل.

## • مـــا وراء الأفـــق

قد يعتبر الكثيرون أن اتجاهات التعدين المستقبلية يجب أن تشمل تقدير وإدراج منطقتين أخريين غير مستغلتين جاهزتين للاستكشاف والاستغلال: التعدين البحري والتعدين في الفضاء. ومع ذلك، فإن أيًا من هذه الحدود لا يحمل الكثير في طريق الإمكانية الاقتصادية أو الواقعية في غضون المائة عام القادمة.

إن التعدين البحري (باستثناء إنشاء سدود ضخمة بالقرب من الشاطئ لاستغلال الماس في جنوب غرب أفريقيا، واستخراج الكبريت من البحر) لا يحمل أي شيء يشبه الجاذبية التي يتمتع بها التعدين السطحي. وعلى الرغم من أن عقيدات المنغنيز وغيرها من الرواسب المعدنية في قاع البحر تحوي على كميات ضخمة من المعادن، فمن غير المرجح أن يتم استخراجها في المستقبل المنظور لأسباب سياسية. على الرغم من أن تقنية استخراج العقيدات قد تم إثباتها في أواخر الستينات من قبل جلومار تشالنجر وآخرين، حيث أن الرواسب تقع في أعماق المحيط خارج الحدود الإقليمية لأي دولة ساحلية، إلا أن الاتفاق الدولي مطلوب قبل أن يحدث التطوير. إن أي إمكانية للتعدين في الفضاء لا بد أن تعيقها أربع قضايا أساسية:

- تكاليف النقل المرتفعة بشكل مفرط.
- تسليم وصيانة معدات التعدين.
- طرق المعالجة المسموح بها ومتطلباتها.
- ملكية كوكب أو نجم واستعداد (أو غير ذلك) المالك للسماح بالتعدين.

السبب الوحيد للتعدين في الفضاء هو الحصول على معادن غير متوفرة على الأرض، ولكن هل يمكن تبرير التكلفة المفرطة لمثل هذا المشروع عالي المخاطر (في ما يمكن أن يكون، في نهاية المطاف، مغامرة علمية)، ليس هناك شك في أن الميزة الرئيسية التي يمكن أن يقدمها الفضاء للتعدين هي بمثابة نتاج للتحسينات التكنولوجية، بنفس الطريقة التي قدمت بها التقنية والمواد الفضائية والعسكرية بالفعل لعدد كبير من الصناعات الأخرى رفيعة المستوى. وعلى المدى الطويل، قد يوفر التعدين الفضائي مواد خام للاستخدام في الفضاء نفسه (الماء والهيدروجين والمعادن وغيرها) للتغلب على «بئر الجاذبية» للأرض (Darling, 2011).

# تحديات صناعة التعدين

في الأعوام القادمة، سيواجه القائمون بالتعدين ضغوطًا متزايدة لبذل المزيد من الجهد لمعالجة تغير المناخ، ومعالجة قائمة متزايدة من القضايا البيئية والاجتماعية والحوكمة وبناء ثقافة قوة عمل أكثر صحة وجاذبية. يمكن للشركات التي تتبنى مزيجًا من الاستراتيجيات، وتزيد من التفاعل مع المجتمعات والمستثمرين، وتتبنى نظرة شاملة للقضايا، أن تجد الجانب الإيجابي من هذه التحديات وتحافظ على النمو في الأوقات المتقلبة.

تواجه صناعة التعدين في جميع أنحاء العالم تحديات معقدة من جميع الاتجاهات. الضغوط البيئية وتغير المناخ، والحروب التجارية والجغرافيا السياسية، والطلب المتغير وغير المؤكد، والتغيرات التكنولوجية، والنقص العالمي في مهارات الصيانة على سبيل المثال لا الحصر. تمثل معالجة هذه التحديات أولوية لاستدامة التعدين على المدى الطويل. ويتعين على شركات التعدين والمساهمين مواجهة هذه التحديات وجهاً لوجه وإلا سيتخلفون عن الركب في قطاع التعدين الذي يخضع للضغط العالي والمراقبة.

فيما يلي التحديات الرئيسية الحالية التي تحتاج صناعة التعدين إلى معالجتها والتخفيف منها:

## • الضغوط المناخية والاجتماعية والبيئية

يحتل هذا الأمر مكانة عالية في جدول أعمال العديد من الصناعات، لكن التعدين يخضع لتدقيق شديد. يساهم التعدين بقدر كبير في انبعاثات غازات الدفيئة العالمية ويتعرض عمال المناجم لضغوط متزايدة لإزالة الكربون من عملياتهم.

وسيواجه قطاع التعدين نفسه أيضًا ضغوطًا من الحكومات والمستثمرين والمجتمع لتقليل الانبعاثات. والتعدين مسؤول حاليًا عن 4 إلى 7 بالمائة من انبعاثات الغازات الدفيئة على مستوى العالم. يعد التأثير الاجتماعي والمجتمعي محور تركيز متزايد للمساهمين وأصحاب المصلحة الخارجيين لضمان معاملة المجتمعات المحلية بشكل عادل واحترام حقوق الإنسان الخاصة بهم - خاصة في مواقع التعدين النائية. تسعى المجتمعات المحلية إلى تحقيق النمو الاقتصادي والاجتماعي ولكنها تريد التأكد من أن شركات التعدين تترك إرثًا إيجابيًا دائمًا بعد انتهاء التعدين.

تمثل المياه تحديًا رئيسيًا آخر لشركات التعدين. وهذا المورد الشحيح بالفعل مطلوب لعمليات التعدين في المناطق التي تعاني من الإجهاد المائي، ومن المتوقع أن يتفاقم بشكل كبير في العقود القادمة في جميع أنحاء غرب الولايات المتحدة وشمال تشيلي وآسيا الوسطى وشرق أستراليا. لكي يظل عمال المناجم قادرين على المنافسة، يجب عليهم بذل المزيد من الجهد لمواجهة التحديات المناخية والاجتماعية والبيئية في استراتيجيات الشركة، وإعداد التقارير، وصنع القرار رفيع المستوى.

## • الصحة والسلامة

سواء كان التعدين في حفرة مفتوحة أو تحت الأرض، يعد التعدين عملاً محفوفًا بالمخاطر من حيث صحة الموظفين وسلامتهم. لقد كانت الصناعات الاستخراجية دائمًا على هذا النحو. لم تتغير المخاطر كثيرًا على مر العقود، ومن غير المرجح أن تتغير على المدى الطويل. ومع ذلك، في الوقت الحاضر، لدى الصناعة نهج جديد للتخفيف من احتمالية المخاطر.

**الرقمنة والاتصال.** أحد الأمثلة على ذلك هو أدوات تحديد الموقع الجغرافي التي تساعد المؤسسات على فهم الموقع الفعلي المباشر للموظفين تحت الأرض (باستخدام الهواتف الذكية أو الأجهزة القابلة للارتداء) فيما يتعلق بالمخاطر مثل المركبات الكبيرة والغازات. تعمل العديد من الشركات على تطوير أنظمة العربات الكهربائية لتحل محل أنظمة الديزل عالية الانبعاثات والصاخبة.

## • الجغرافيا السياسية

وقد برز هذا إلى الواجهة بشكل متزايد منذ جائحة كوفيد19-. وقد أثرت العلاقات الباردة بين الغرب والصين، والحرب في أوكرانيا، وعدم الاستقرار في الاتحاد الأوروبي، بشكل مباشر وغير مباشر على قطاع التعدين. إن ظهور حكومات جديدة وتأميم الموارد غالباً ما يعني عدم الاستقرار السياسي على المدى القصير، وقد تظهر الصراعات التجارية العالمية في مناطق مختلفة من العالم. أحد الآثار اللاحقة لعدم الاستقرار والحروب التجارية هو زيادة مخاطر سلسلة التوريد من حيث المواد الخام وقطع الغيار والتقنية، وما ينتج عن ذلك من زيادة التكاليف. يعد الطلب على الليثيوم بسبب الزيادة الحادة في السيارات الكهربائية وتقنية البطاريات مثالاً واضحًا على مخاطر زيادة أسعار السلع الأساسية. إن الجغرافيا السياسية للوصول إلى الموارد الطبيعية وإدارتها أمر بالغ الأهمية لقطاع المعادن والتعدين. وتؤثر التوترات الجيوسياسية على مؤشرات جانب الطلب. يمكن أن تؤدي الصراعات إلى انخفاض الطلب على الاستثمارات الجديدة، وبالتالي الطلب على المواد الخام. ستحتاج شركات التعدين إلى أن تكون استباقية في التعامل مع القضايا الجيوسياسية مثل الحروب التجارية، وتأميم الموارد، والاضطرابات السياسية. وسيتطلب هذا اتباع نهج متعدد الأوجه يتعامل بنشاط مع الموردين والحكومات والهيئات التجارية لضمان قوة سلسلة التوريد الطويلة الأجل بالقدر الكافي.

## • الابتكار المستمر والتغيير التكنولوجي

كما ذكرنا سابقًا، فيما يتعلق بالصحة والسلامة، يعد الابتكار والتقنية مصدرًا للتحدي والتغيير المستمر، مع كون الابتكار الرقمي في طليعة التغيير الحالي في معظم الصناعات. تحاول شركات التعدين دفع التغيير لمعالجة المشكلات الحالية المرتبطة بزيادة الإنتاجية وتحسين سجلات السلامة وتقليل المخاطر على البيئة. «شركات التعدين ليست معروفة بأنها تعطل التقنية. ولكن هناك تفويض الآن للاستثمار بشكل أكبر في التقنية للتوصل إلى حلول لتحديات اليوم - بدءًا من المعايير البيئية والاجتماعية والحوكمة إلى الإنتاجية إلى طرق خفض التكاليف.

يتمثل التحدي الذي يواجه القائمين بالتعدين في اعتماد نهج إدارة الأصول لاستخدام نمذجة البيانات وتخطيط السيناريوهات كأدوات لصنع القرار لتقديم قيمة طويلة الأجل من قاعدة أصولهم. يستخدم عمال المناجم الرائدون في هذا المجال التقنية الرقمية لتشغيل مراكز التشغيل عن بعد وتحقيق وفورات كبيرة في التكاليف من خلال الاستعانة بخبراء متخصصين "للاتصال" بخبراتهم. تعد الأتمتة وإعداد تقارير الصحة والسلامة أيضًا من المجالات الرئيسية التي يتم تحسينها من خلال التحول الرقمي. تعمل التقنيات الجديدة على تحسين العديد من جوانب التعدين: فهي تقلل من اضطراب الأرض والتأثير على الحياة البرية والبيئة المحيطة؛ ويتم استخدام الطائرات بدون طيار لإجراء المسوحات الجوية، وتعمل أجهزة الاستشعار على تحسين الإنتاجية وتسليط الضوء على فشل الأصول الوشيك. التحدي الحالي الذي يواجه كبار أصحاب المصلحة في مجال التعدين هو مواكبة ومواصلة الاستثمار في الابتكار والتقنية حيث يتم إثبات مكاسب الكفاءة والإنتاجية.

## • نقص مهارات الصيانة

إن نقص مهارات الصيانة والمواهب في مجال التعدين ظاهرة عالمية، وليس فقط في الولايات المتحدة. تعاني شركات التعدين من أزمة مهارات بسبب القيود المفروضة على السفر والصناعة التي يُنظر إليها في كثير من الأحيان على أنها غير جذابة، مما يجعل من الصعب العثور على المواهب المناسبة والاحتفاظ بها. لقد كانت هذه المؤسسة في طور البناء بالفعل قبل تفشي جائحة كوفيد- 19، لكن عمليات الإغلاق في جميع أنحاء العالم أدت إلى تعميق المشكلة. التحدي الرئيسي الذي يواجه صناعة التعدين هو كيفية جذب المواهب في مجال الصيانة والاحتفاظ بها في قطاع غير عصري بالنسبة للأجيال الشابة، ويُنظر إليه على أنه ضار بالبيئة، وعمل بدني قذر وشاق. يجب أن يكون التركيز على ثقافة شاملة ومفتوحة مع مسارات وظيفية قوية مفتوحة للجميع. وهذا يعني تحسين ظروف العمل والمزايا والثقافة وإتاحة فرص العمل والتدريب عن بعد.

تمامًا مثل معظم الصناعات، يواجه التعدين تغيرات وتحديات كبيرة في عشرينيات القرن الحالي، مما يعني أنه يتعين على الشركات الموازنة بين المخاطر والتكاليف للبقاء في صدارة منافسيها. تُظهر التحديات الحاسمة التي تمت مناقشتها هنا الحاجة إلى التحلي بالمرونة والاستعداد للتغيير والسعي المستمر لتحقيق التميز في جميع أجزاء عمليات التعدين.

## • التقنية السيبرانية Cyber

عادت الإنترنت إلى التصنيف للمرة الأولى منذ عام 2020م. وقد شهد التقارب المتزايد بين تقنية المعلومات (IT) والتقنية التشغيلية (OT)، والتحول الرقمي والعمل عن بعد، بالإضافة إلى الحرب في أوكرانيا، ارتفاعًا كبيرًا في الحوادث السيبرانية. اليوم، أصبحت جميع مؤسسات التعدين رقمية بشكل

افتراضي، وتعمل في مشهد رقمي واسع ومتصل حيث يمثل كل أصل عقدة أخرى في الشبكة ويزيد من سطح الهجوم. وجد استطلاع أجرته شركة EY مؤخرًا أن 74 % من المسؤولين التنفيذيين في مجال التعدين والمعادن قالوا إن دمج التقنية يمثل تحديًا رئيسيًا، مقارنة بـ 37 % لجميع القطاعات. يشعر المزيد من قادة التعدين بالقلق إزاء الهجمات السيبرانية التي تستهدف الملكية الفكرية، وهو قلق نتوقع أن يزداد مع تزايد الاستثمار في المبادرات البيئية والاجتماعية والحوكمة. تتطلب متابعة هذه المخاطر وغيرها اهتمامًا أكبر من مجلس الإدارة - ولكن 40 % فقط من مجالس الإدارة في استطلاع مخاطر مجلس الإدارة العالمي لعام 2023م من EY واثقون من أنهم يفهمون أكبر المخاطر الإلكترونية التي تواجه المؤسسة

## • رأس المـــــال

السباق مستمر لتأمين الاستثمار الضخم في التعدين والمعادن اللازمة لتلبية الطلب المتزايد على المعادن والمعادن المهمة لتحول الطاقة، بما في ذلك النحاس والليثيوم والنيكل. تستجيب الأسواق، ولكن حتى 31 يوليو 2023م، ظل رأس المال الذي تم جمعه من خلال الديون والأسهم هذا العام ثابتًا (178 مليار دولار أمريكي مقارنة بـ 183 مليار دولار أمريكي في نفس الفترة من عام 2022م). ومن ثم، يبدو أن رأس المال يتحرك نحو أسواق سلع جديدة بدلاً من حل ما يشكل خطراً كبيراً بالفعل. وتستمر شركات الحديد والصلب والذهب والفحم في جذب أكبر قدر من رأس المال، ولكن الاستثمار يتزايد في النيكل والليثيوم. ميزانيات الاستكشاف آخذة في الارتفاع، وتعتبر الولايات المتحدة وكندا وأستراليا الوجهات المفضلة، بسبب تصنيفها المنخفض للمخاطر

# اقتصاديات صناعة التعدين

التعدين مثل أي نشاط اقتصادي آخر من حيث إن مساهمته في الناتج المحلي الإجمالي تقاس بقيمته المضافة، أي قيمتها على أساس مجموع الأجور والرواتب والإيجار والعائدات والضرائب المباشرة ومدفوعات الفائدة، وإجمالي الأرباح المرتبطة بإنتاج منتجاتها النهائية. ومع ذلك، فإن حصتها المتواضعة من الناتج الإجمالي العالمي تقلل إلى حد كبير من أهميتها. فهي، مثل غيرها من الصناعات الأولية، تنتج المواد الخام التي تشكل الأساس الأساسي لجميع الأنشطة الاقتصادية الأخرى. تؤدي المنتجات المعدنية الوظيفة نفسها بالنسبة للاقتصاد العالمي مثل الفيتامينات والعناصر النزرة الموجودة في النظام الغذائي البشري. وبدون استمرار العرض، فإن النشاط الاقتصادي سوف يذوي ويموت تدريجيًا.

## • حـــدود الصناعـــة

تشمل صناعة المعادن مجموعة واسعة من المنتجات المختلفة ذات أساليب وهياكل إنتاج مختلفة وأسواق متنوعة. تم تحديد حدودها بشكل تقليدي لاستبعاد النفط والغاز الطبيعي والمياه، على الرغم من تضمين الوقود المعدني الصخري الصلب مثل الفحم واليورانيوم. يتم أيضًا التمييز بين التعدين واستغلال المحاجر للرمل والحصى ومواد البناء، على الرغم من أنها تشترك في خصائص المنتجات المعدنية الأخرى. إن الحدود النهائية للصناعة غير دقيقة لأنها تندمج، في كثير من الحالات، في صناعة المعالجة والتصنيع. وينطبق هذا بشكل خاص على بعض المعادن الصناعية، وخاصة تلك المستخدمة في التصنيع الكيميائي، كما أنه ينطبق أيضًا على المعادن المعدنية.

إن مكان إجراء التقسيم هو إلى حد كبير اتفاقية. على سبيل المثال، يعتبر إنتاج الحديد الخام والصلب بمثابة تصنيع، وبالتالي فإن الحدود مع التعدين هي إنتاج خام الحديد. بالنسبة للنحاس، فإن التقسيم أقل وضوحًا، حيث تنتج بعض المناجم معدن النحاس في الموقع والبعض الآخر يبيع الخامات والمركزات. يتم تجميع المعادن غير الحديدية الأولية بشكل تقليدي كمنتجات معدنية، ولكن يتم تجميع أشكالها شبه المصنعة ومنتجاتها المطاوع كمصنوعات. وهذا يثير تساؤلات حول معدن مثل الألومنيوم، الذي لا تكون المادة الخام المعدنية المدخل الرئيسي له، بل الطاقة.

تنتج المناجم الخامات بدلًا من المنتجات النهائية القابلة للبيع. مع استثناءات قليلة، تتطلب معظم المنتجات التي يتم تشغيلها في المنجم درجة معينة من المعالجة قبل أن يتم بيعها. وفي بعض الحالات، قد لا يكون ذلك أكثر من مجرد غسيل وفرز بسيط، ولكن على الطرف الآخر، قد تكون المعالجة المعدنية أو الكيميائية المعقدة ضرورية. ويهدف منتجو المعادن إلى زيادة ربحية عملياتهم وسيعملون على موازنة تكاليف المعالجة الإضافية مقابل أي مزايا مكتسبة من بيع منتجات ذات قيمة أعلى.

## • الطلب

يتم الطلب على عدد قليل من المنتجات المعدنية لقيمتها الجوهرية وأحيانًا لخصائصها المختلفة. معظمها عبارة عن سلع وسيطة تستخدم كمواد خام أو أدوات مساعدة في تصنيع المزيد من المنتجات النهائية. الاستثناءات الرئيسية هي الأحجار الكريمة والمعادن الثمينة في بعض استخداماتها وليس كلها. في حين أن كل معدن لديه مجموعة محددة من الخصائص، سواء كانت فيزيائية أو كيميائية، فإن القليل من هذه الخصائص ينفرد بها أي منتج معدني واحد. قد لا

يكون المستخدمون النهائيون للمنتج النهائي على دراية تامة بالمعادن المستخدمة في تصنيعه ويهتمون فقط بما إذا كان المنتج يلبي احتياجاتهم بشكل مُرضٍ.

باختصار، يشتق الطلب على المعادن من الطلب على المنتجات النهائية، وفي كثير من الحالات تمثل المعادن المستخدمة نسبة صغيرة نسبيا من التكلفة الإجمالية للمنتج. وتعني طبيعة الطلب المشتقة أنه من الصعب على منتجي العديد من المنتجات المعدنية تمييز موادهم عن مواد الموردين الآخرين، باستثناء ما يتعلق بخصائصها المتأصلة. في حين أن خصائص منتج معدني معين قد تجعله مناسبًا بشكل مثالي لبعض الاستخدامات النهائية، فإن معظم الاستخدامات عادةً ما يكون لها بدائل بدرجات متفاوتة من الفعالية. تشكل معادن الأسمدة استثناءً جزئيًا في هذا الصدد، لأن زراعة النباتات تحتاج إلى البوتاس، والفوسفات، والنيتروجين بتركيبات مختلفة، ولكن حتى استهلاك الأسمدة يمليه الطلب على المنتجات الزراعية وهياكل التكاليف التي يتحملها المزارعون. إن الطلب على المنتجات المعدنية يقع دائمًا تحت رحمة الموضة، والتغيرات التكنولوجية في أسواق الاستخدام النهائي، والتنظيمات الحكومية، وفي المقام الأول، تحت رحمة الأسعار النسبية. هذه الخصائص ليست فريدة من نوعها بالنسبة للمنتجات المعدنية ولكنها تميزها عن المسار العام للمصنوعات.

## • الاستبدال والأسعار

إن وجود بدائل لمعظم المنتجات المعدنية في العديد من استخداماتها يحد من القوة السوقية لمنتجيها. سيؤثر التحول الملحوظ في السعر النسبي للمنتج على حجم سوقه. قد تكون بعض البدائل واضحة، كما هو الحال في استخدام معادن مختلفة كمواد مالئة أو موسعات في صناعة البلاستيك، أو مواد مختلفة في صناعة الحراريات.

وفي بعض الأحيان تكون البدائل الأكثر فعالية هي الامتناع عن ممارسة الفوسفات، كما هو الحال في قرار المزارع بعدم استخدام الفوسفات في حقوله لمدة عام، أو التغيير في تقنية المعالجة، مثل المعالجة الحرارية لاستبدال إضافة عناصر صناعة السبائك. وغالبًا ما يتضمن ذلك تعديلات على العمليات أو الاستثمار في التقنية والمعدات الجديدة. في هذه الحالات، سيتم توزيع الاستبدال على مدى فترة، وليس على الفور، ولكن عندما يحدث، فمن غير المرجح أن يتم عكسه بسرعة. غالبًا ما تؤدي التغيرات في الأسعار النسبية إلى تغير تكنولوجي لا رجعة فيه.

في كثير من الأحيان، لا يتأثر الطلب على منتج معدني معين بالتغيرات في سعره النسبي ولكن بأسعار المنتجات التي تم دمجها فيها أو استخدامها في المعالجة. على سبيل المثال، الطلب على الحشو وطين الطلاء مدفوع بالطلب المتغير على الورق والزنك في الجلفنة من قبل أسواق منتجات الصلب. إن التغيرات في الاستخدامات النهائية وفي أنماط إنفاق المستهلكين، المدفوعة بالتغير الديموغرافي والتقني، وأحيانًا بالموضة فقط، يمكن أن تفتح أسواقًا جديدة للمعادن الفردية وتمحو الأسواق الحالية.

## • أسواق المنتجات المعدنية

تعتمد معظم أنواع النشاط الاقتصادي، بما في ذلك التجارة والخدمات، على المنتجات المعدنية، ولكن استخدامها يتحيز نحو القطاعات المنتجة للسلع. يعتمد الطلب على العديد من المنتجات المعدنية، وعلى المعادن على وجه الخصوص، بشكل كبير على البناء، وصناعات السلع الرأسمالية، وتصنيع المركبات والسلع الاستهلاكية المعمرة. ولأن هذه الأسواق تستجيب للتغيرات في التوقعات وتحركات أسعار الفائدة، فإنها عادة ما تكون أكثر القطاعات تقلبًا في الإنفاق الإجمالي.

وحتى عندما تستخدم المنتجات المعدنية للتجهيز أو في السلع المخصصة للاستهلاك المباشر، فإن الطلب عليها يمكن أن يتقلب بدرجة أكبر بكثير من النشاط الاقتصادي العام ويكون تحت رحمة التغيرات في العمل الجاري وفي الاحتفاظ بالمخزونات من جميع الأنواع في جميع أنحاء سلسلة الإنتاج، من المناجم إلى المستهلك النهائي. وبشكل عام فإن الطلب على المنتجات المعدنية أكثر تقلبًا من النشاط الاقتصادي، مقاسًا بالتغيرات في الإنتاج الصناعي أو الناتج المحلي الإجمالي.

## • الدخل وكثافة الاستخدام

عادة ما يرتفع طلب الاقتصاد على السلع مع نصيب الفرد من الدخل. وعندما تكون هذه المستويات قريبة من مستويات الكفاف، ولا يمكن تلبية سوى الاحتياجات الأساسية، فإن استخدام المعادن لكل وحدة إنتاج يميل إلى الانخفاض. في البداية، سيتم تلبية العديد من الاحتياجات للمنتجات المعدنية عن طريق واردات السلع التامة الصنع بدلًا من التصنيع المحلي. ومع ارتفاع نصيب الفرد في الدخل، فإن الطلب على المنتجات الأكثر تطورًا سوف يتوسع أيضًا، وبالتالي زيادة كثافة الاقتصاد في استخدام المعادن لكل وحدة إنتاج.

إن الطلب المتزايد بسرعة على الاستثمار في البنية التحتية الحديثة بجميع أنواعها سيزيد من كثافة الاستخدام (بالوحدة الدولية). وسوف يميل الطلب على المنتجات المعدنية، وخاصة لبنات البناء من الصلب والأسمنت ومواد البناء، إلى الزيادة بسرعة أكبر كثيرًا من نمو الناتج المحلي الإجمالي. وفي نهاية المطاف، سيتم تطوير البنية التحتية الأساسية للدولة وسيخصص الأفراد نسبة متزايدة من دخولهم المتزايدة للخدمات بجميع أنواعها بدلًا من المنتجات.

تميل السلع التي يتم شراؤها إلى أن تكون أقل كثافة في المواد من تلك التي يتم شراؤها عند مستويات الدخل المنخفضة. ونتيجة لذلك، فإن وحدة دولية من المنتجات المعدنية لكل وحدة من الناتج المحلي الإجمالي في الاقتصاد سوف تصل في نهاية المطاف إلى ذروتها ثم تنخفض. وعلى الرغم من أن الطلب المطلق على المنتجات المعدنية قد يستمر في النمو مع زيادة نصيب الفرد في الدخل، إلا أنه قد يتم الوصول إلى نقطة يتوقف فيها هذا الطلب عن الارتفاع بل ويضعف. وقد لا تتمكن الاقتصادات الصغيرة ذات التعداد السكاني المحدود و/أو التي تعاني من عيوب جغرافية متأصلة من تطوير صناعاتها التحويلية القائمة على المواد، ولكنها تستمر في الاعتماد على الواردات. وهذا يعني أن وحدتهم الدولية من العديد من المنتجات المعدنية لن ترتفع أبدًا بشكل كبير، بغض النظر عن مستويات دخل الفرد. وفي المقابل، قد تعمل بعض الاقتصادات على تطوير قدرات تصنيعية كبيرة موجهة نحو التصدير، بحيث لا ترتفع الوحدة الدولية الواضحة لديها بسرعة فحسب، بل تصل أيضًا إلى مستويات عالية غير معتادة.

فالبلدان ذات الكثافة السكانية العالية ذات مساحة الأرض المحدودة سوف يكون لها أنماط استهلاك مختلفة عن البلدان الأكبر ذات الكثافة السكانية المنخفضة، حتى عند مستويات مماثلة من نصيب الفرد في الدخل. باختصار، تعتمد الكمية الدولية من المنتجات المعدنية في كل دولة على ما هو أكثر بكثير من نصيب الفرد في الدخل وحده، ولكن هذا يوفر الدافع الرئيسي للتغيير. ويمكن تتبع النمط الأساسي لشدة التغير مع مرور الوقت مع ارتفاع الدخل في التجربة التاريخية للاقتصادات الصناعية الناضجة، وما زال يُكتب في البلدان الصناعية والنامية الجديدة. إن التغير التكنولوجي المستمر، سواء في المنتجات أو عمليات الإنتاج، والتحولات في الأسعار النسبية، وخاصة أسعار الطاقة، يعني أن

البلدان الحديثة التصنيع لا تتبع مسار أسلافها تمامًا. ومن الطبيعي أن تتبنى كل دولة المجموعة الأرخص والأكثر فعالية من الخيارات التكنولوجية المتاحة، والتي من المحتمل، ولكن ليس بالضرورة، أن تكون أقل كثافة في استخدام المواد.

ويعكس الطلب العالمي مجموع الأنماط المتباينة للوحدة الدولية في الاقتصادات المكونة ومعدلات نمو الناتج المحلي الإجمالي لديها. وبقدر ما يعتمد بعض الناتج النهائي للاقتصادات سريعة النمو، مثل الصين والهند، على الصادرات إلى الاقتصادات الناضجة، فإن طلبها المتزايد على المواد سيكون جزئيًا على حساب الاقتصادات الناضجة وليس مجرد إضافة إلى الاقتصادات الناضجة لديهم.

## • العرض والطلب

وبما أن الإنتاج بطيء نسبيًا في الاستجابة للتقلبات في الطلب ويميل إلى أن يكون أكثر استقرارًا على المدى القصير، فإن العرض والطلب نادرًا ما يكونان في توازن دقيق. وعادة ما يكون هناك توازن ديناميكي مع مرور الوقت، حيث تتحرك القدرة بما يتماشى مع الطلب، ولكن توازنات السوق يمكن أن تنحرف بسرعة من النقص إلى الفائض دون سابق إنذار. والنتيجة هي تقلب أسعار معظم المنتجات المعدنية. وفي بعض الحالات، يمكن أن يؤدي تراكم المخزونات أو تخفيضها إلى تخفيف التأثير المباشر، ولكن العديد من المنتجات لا تكون قابلة للتخزين على نطاق واسع.

ولذلك يضطر المنتجون إلى خفض إنتاجهم عندما ينخفض الطلب، لكنهم نادرًا ما يتفاعلون بسرعة كافية عندما يرتفع الطلب. وحتى مجرد وجود مخزونات متراكمة يمكن أن يؤثر سلبًا على التوقعات ويخفض الأسعار.

## • إعادة التدوير

وبصرف النظر تمامًا عن التغيرات في المخزونات، فإن إمدادات العديد من المنتجات المعدنية لا يتم تلبيتها من خلال المواد المستخرجة حديثًا. وحتى بعض المعادن المستخدمة كمساعدات في التصنيع قد تكون قابلة لإعادة التدوير، على الرغم من أن معظمها يتبدد أثناء الاستخدام، عندما تتم معالجة المنتجات المعدنية وتحويلها إلى سلع رأسمالية وسلع استهلاكية معمرة، فإنها تصبح جزءًا من مخزون رأس المال العالمي ومن المحتمل أن تكون متاحة لإعادة التدوير عندما تصبح البضائع خردة. يمكن أيضًا إعادة تدوير المنتجات المستخدمة في التغليف. ويعتمد مدى مساهمة إعادة التدوير في تكملة الإنتاج الأولي على طبيعة الاستخدامات النهائية الأصلية، وعمر السلع التامة الصنع، والتقنية المتاحة، واللوائح الحكومية. كما أن الأمر محكوم بمعدل نمو الطلب. وحتى في الأسواق الناضجة، فإن إعادة التدوير وحدها لا تستطيع تلبية الطلب الجديد، ولكن قدرتها على تلبية جزء من هذا الطلب تقيد الحرية التجارية لصناعة التعدين. سيتم توفير الكثير من المواد المعاد تدويرها لأسباب بيئية نتيجة للتنظيم الحكومي أو الحوافز المالية. وبالتالي فإن عرضها غير حساس إلى حد ما للسعر، على النقيض من عرض المواد المستخرجة حديثًا.

## • الموقع الجغرافي

ومن البديهي أن الرواسب الصالحة للحياة من معظم المعادن ليست منتشرة بالتساوي في جميع أنحاء العالم ولكن توزيعها الجغرافي غير متساو. كلما انخفضت وفرة القشرة الأرضية للعنصر المعدني، وكلما زاد عامل التركيز المطلوب للتعدين الاقتصادي، أصبحت أكثر ندرة وأقل انتشارًا جغرافيًا. وفي تناقض حاد مع التصنيع ومعالجة المعادن، فإن موقع المناجم يتم تحديده من

خلال مزيج من الجيولوجيا والجغرافيا. ومع ذلك، يمكن المبالغة في التناقض لأن وجود رواسب خام معروفة لا يضمن بالضرورة أنه سيتم استخراجها. وسيعتمد ذلك على مجموعة واسعة من العوامل الفنية والاقتصادية والاجتماعية والبيئية والسياسية. التعدين ليس النوع الوحيد من النشاط الاقتصادي الذي يتم تحديد موقعه جغرافيًا مسبقًا. وتشمل المجالات الأخرى، على سبيل المثال، أشكالا معينة من الزراعة، وتوليد الطاقة الكهرومائية، وحتى السياحة. ومع ذلك، فمن المؤكد أن التعدين لا يمكن أن يحدث إلا في حالة وجود رواسب معدنية، وغالبًا ما يكون ذلك في أماكن نائية وغير مضيافة. تاريخيًا، كان يُنظر إلى التعدين في جميع المواقع تقريبًا على أنه له حق مسبق في استخدام الأراضي وله الأسبقية على الاستخدامات البديلة، بغض النظر تقريبًا عن مكان وجود الرواسب المعدنية. وقد أصبح هذا الأمر أقل احتمالا على نحو متزايد اليوم، حيث يتعين على التعدين التنافس مع الاستخدامات المحتملة الأخرى. وهذا لا ينطبق فقط بالقرب من المراكز الحضرية في البلدان ذات الكثافة السكانية العالية ولكن أيضًا في المناطق المأهولة بالسكان حيث قد يكون للحفاظ على المناظر الطبيعية الأسبقية على أي شكل من أشكال التنمية. تنطوي جميع أشكال التعدين على بعض الاضطرابات التي لا رجعة فيها في كثير من الأحيان في المشهد الطبيعي. عندما كانت البلدان ذات الاقتصادات المتقدمة اليوم تقوم بالتصنيع وتحتاج إلى المعادن كمواد خام للصناعة وإنشاء البنية التحتية، كان هذا الاضطراب مقبولاً باعتباره نتيجة لا مفر منها للوصول إلى الثروة المعدنية.

علاوة على ذلك، تميل المناجم إلى أن تكون صغيرة نسبيًا وليست شديدة التدخل في المناظر الطبيعية. تم استخراج المعادن المعدنية إلى حد كبير من الأعمال تحت الأرض، مما أدى إلى إنتاج كميات محدودة من النفايات. على النقيض من ذلك، يتم تنفيذ الكثير من عمليات التعدين الحديثة على نطاق واسع، غالبًا من خلال أعمال الحفر المفتوحة التي تشوه المناظر الطبيعية وتخلق كميات كبيرة من النفايات الصخرية.

## • الخام والنفايات

منتج جميع المناجم هو خام. وحتى عندما يتم استخراجه تحت الأرض من عروق أو طبقات غنية، فإن استخراجه سيتطلب بالضرورة إزالة النفايات الصخرية. تاريخيًا، اتبع عمال المناجم العروق الضيقة غالبًا باستخدام القوة العضلية لاستخراج الخام باستخدام المعول والمجرفة، وتم الحفاظ على كمية النفايات عند الحد الأدنى المطلق. مع ظهور الآلات والمعدات الأكثر تعقيدًا، تنتج المناجم نسبة أكبر من النفايات.

يجب حاليًا أن تكون الأعمال تحت الأرض كبيرة بما يكفي لتوفير الوصول إلى المعدات الحديثة واستيعابها. يجب أن تقوم المناجم المفتوحة بإزالة أي ثقل وصخور محيطة كافية لضمان استقرار جدران الحفرة. كلما كان المنجم أعمق، زاد حجم النفايات التي تتم إزالتها. في معظم الحالات، يتطلب المنتج الذي يتم تشغيله من المنجم المعالجة والترقية قبل أن يتم بيعه بشكل مربح. حتى الفحم قد يتطلب الغسيل. تخضع معظم المعادن الصناعية لمجموعة متنوعة من العمليات الفيزيائية أو الكيميائية من أجل زيادة قيمتها السوقية. تحوي الخامات المعدنية عادة على نسب متواضعة فقط من المنتجات ذات القيمة التجارية والتي ينتج عن استخراجها كميات كبيرة من المخلفات. واليوم، يغطي منجم نموذجي مساحة أكبر بكثير من الأرض التي كان يغطيها في القرن التاسع عشر أو أوائل القرن العشرين، وهو يغير المشهد بشكل لا رجعة فيه. وهذا يجعل من المنجم جارًا أقل جاذبية مما كان عليه في الأوقات السابقة، إلى الحد الذي يجعل المجتمعات المحلية غالبًا ما تكون غير راغبة في مقايضة التكاليف البيئية والاجتماعية بالفوائد. ومع ذلك، فإن التعدين بجميع أشكاله يمثل نسبة متواضعة من سطح الأرض.

## • النضـــوب والنقـــــل

إن حاجة صناعة التعدين الكبيرة إلى إمدادات الطاقة والمياه – سواء في استخراج الخام أو في معالجته اللاحقة – تحكم موقعها جزئيًا. ومن المؤكد أن هذه المتطلبات تساعد في تحديد الشكل الذي يتم به نقل المنتجات المعدنية وطبيعة ومدى التطوير في موقع المنجم. وكذلك الحال بالنسبة لتوفر وسائل النقل. وفي الواقع، كانت هناك علاقة تكافلية تقريبًا بين تطوير أنظمة النقل وصناعة التعدين. وقد تعززت هذه العلاقة من خلال السمة الرئيسية لصناعة التعدين: اعتمادها على استخراج الموارد غير المتجددة. تكون رواسب الخام الفردية محدودة تمامًا، إما لأنها محدودة ماديًا أو لأن تكاليف استخراج الخام المتبقي تصبح باهظة.

وبطبيعة الحال، فإن أي مجتمع سوف يستغل أولًا رواسب الخام التي يسهل الوصول إليها والعمل بها. وعندما يتم العمل على هذه الأمور، فإنه سيعمل على تطوير تقنيات لاستخراج المزيد من الخام من العمليات الحالية، سواء من خلال التعمق أكثر أو من خلال ابتكارات العمليات. وسوف تكون هذه التحسينات في الإنتاجية مصحوبة بالبحث عن رواسب خام جديدة، والتي من المحتمل أن تكون بعيدة بشكل متزايد عن المراكز السكانية وأسواقها. ومن ثم، فإن الأمر الحتمي هو تحسين روابط النقل وخفض تكاليف النقل من أجل التمكين من تطوير مناجم أبعد بتكاليف مقبولة. لن يتم استغلال الرواسب المعدنية إلا إذا تمكنت المناجم القائمة عليها من شحن منتجاتها إلى السوق بشكل مربح. مع استثناءات قليلة نسبيًا، يتم تطوير المناجم في المقام الأول مع توقع تحقيق أرباح، بالإضافة إلى التكاليف الرأسمالية لمشغليها. وإذا بقيت غير مربحة بشكل مستمر، فسوف تغلق أبوابها، حتى لو لم يتم استنفاد الرواسب المعدنية الأساسية. تحدد تكلفة النقل بالنسبة لسعر المنتج النهائي النطاق الجغرافي لسوق كل منجم وتؤثر بقوة على طبيعة ودرجة المعالجة في موقع المنجم.

ويمكن نقل المنتجات ذات القيمة العالية إلى الحجم، مثل الأحجار الكريمة والمعادن الثمينة، لمسافات طويلة بسهولة وسيكون لها أسواق عالمية. وعلى الطرف الآخر، فإن المنتجات ذات النسب العالية من حيث الحجم إلى القيمة، مثل الرمل والحصى ومواد البناء، لن تؤمن سوى الأسواق المحلية. وقد أدت التخفيضات الملحوظة في تكاليف الشحن في أعماق البحار منذ الحرب العالمية الثانية إلى توسيع الأسواق الجغرافية للمنتجات السائبة، مثل خام الحديد والفحم، من المستوى الوطني إلى الإقليمي وحتى إلى العالمي. وحيثما تقع الرواسب المعدنية في أعماق اليابسة، وبعيدة عن الأسواق الرئيسية لمنتجاتها، فإنها لا تستطيع المنافسة إلا إذا تم تطوير منتجاتها محليًا من أجل تقليل تكاليف النقل.

وسيعتمد هذا الارتقاء بدوره على القرب من مصادر الطاقة التنافسية الكافية. وفي حين أن مناجم النحاس في شيلي محظوظة لأنها قريبة من البحر، وهو ما يمكن استخدامه لشحن المركزات بشكل مربح، فإن مناجم النحاس في وسط أفريقيا تعتمد على الصهر والتكرير محليا لتقليل الكميات التي يتم نقلها إلى الموانئ.

## • التأثيرات التنافسية

لا تعتمد قدرة المنجم على المنافسة بشكل أساسي على تكاليف النقل النسبية، على الرغم من أهميتها، ولكن على خصائص رواسبه المعدنية، وعلى طريقة التعدين المستخدمة، وعلى طبيعة مصنع المعالجة الخاص به. ومن المحتم أن يتم تعديل هذه التأثيرات المتأصلة بفِعل الظروف السياسية والاجتماعية والاقتصادية للبلدان المضيفة، بما في ذلك عوامل مثل تضخم الأجور، وتكاليف الطاقة، وأسعار الصرف، والتي تقع خارج سيطرة شركة التعدين. تميل هذه

العوامل إلى أن تكون أكثر أهمية نسبيًا بالنسبة للصناعات التحويلية، بما في ذلك مصانع معالجة المعادن مثل المصاهر ومصافي التكرير، مقارنة بالمناجم.

إن طبيعة كل رواسب خام تهيمن عادة على التأثيرات الكامنة على التكاليف النسبية. وبما أن القليل من الرواسب المعدنية متطابقة من جميع النواحي، فإن تكاليفها، وبالتالي ربحيتها، سوف تميل إلى التباين. وسيكون بعضها قريبًا من إمدادات وافرة من المياه والطاقة، ويمكن الوصول إليها بسهولة، في حين سيكون بعضها الآخر بعيدًا. قد يبرز بعضها على السطح أو بالقرب منه ويكون قابلًا للتعدين السطحي من خلال طرائق الصب المكشوف، في حين أن البعض الآخر قد يكون عميقًا جدًا بحيث يتطلب الاستخراج من خلال الأعمدة أو الأدوات.

تختلف طبيعة الصخور المضيفة والمعادن نفسها من تلك التي تتطلب سهولة العمل إلى تلك التي تتطلب جهدًا بدنيًا. في بعض الحالات، قد يتم تحرير المكونات ذات القيمة التجارية بسهولة، بينما في حالات أخرى، قد تكون هناك حاجة إلى معالجة فيزيائية وكيميائية معقدة. وربما يكون العامل الرئيسي هو درجة الرواسب، أي نسبة المواد القابلة للبيع التي تحوي عليها. مع تساوي الأشياء الأخرى، والتي نادرًا ما تكون كذلك، كلما ارتفعت درجة الرواسب المعدنية، انخفضت تكاليفها النسبية مقارنة برواسب مماثلة ولكن ذات درجة أقل. بالنسبة للعديد من المعادن الخام، يكون متوسط الدرجة أقل أهمية من مدى قدرة المنجم على زيادة إنتاجه من الأنواع الأعلى سعرًا من المنتج الأساسي دون معالجة باهظة الثمن. عادةً ما توفر الاستخدامات ذات القيمة الأعلى علاوات كبيرة مقارنة بالاستخدامات الأكثر شيوعًا. نادرًا ما تكون الخامات المعدنية نقية، ولكنها تحوي على مجموعة متنوعة من العناصر والمركبات المختلفة.

ومن الواضح أنه كلما زاد محتوى المعدن الرئيسي، كانت الرواسب أكثر جاذبية، ولكن طبيعة وأهمية المنتجات المشتركة والثانوية لها أهمية أيضًا. وبعضها مرغوب فيه جدًا ويرفع القيمة المحتملة للخام، في حين أن بعضها الآخر سام ويقلل من إمكانية تسويق منتجات المنجم. في بعض الأحيان تفوق تكاليف إزالتها وتخزينها الآمن أي فوائد للتعدين. عندما تنتج المناجم مجموعة من المنتجات الثانوية، يمكن أن تصبح قرارات الإنتاج الخاصة بها معقدة، خاصة عندما تختلف درجات العناصر المكونة في جميع أنحاء الجسم الخام، كما هو الحال عادة. في بعض الأحيان قد تبدو هذه القرارات منحرفة، كما هو الحال عندما ينطوي زيادة الربحية على التركيز على استرداد المنتج الثانوي على حساب ناتج المنتج الرئيسي، بغض النظر عن التحولات في الطلب عليه وأسعاره. وهذا يؤكد فقط أن الهدف الأساسي لإدارة المناجم هو عادة خلق قيمة للمساهمين بدلًا من ضمان إمدادات المواد الخام.

## • درجات الخام واستكشافه

إن الدرجات النسبية للخام من الرواسب المختلفة، حتى مع السماح بمساهمات جميع المنتجات القابلة للبيع، لا تنعكس بالضرورة في التكاليف النسبية لكل وحدة من المنتج. وكلما ارتفعت الدرجة، زادت قدرة الرواسب على دعم التعدين العميق تحت الأرض، والذي عادة ما يكلف أكثر بكثير لكل طن من الخام مقارنة بالتعدين في الحفرة المفتوحة. كما قد تكون الدرجات الأعلى قادرة على تعويض التكاليف الإضافية للمعالجة والمعالجة المعقدة.

من الناحية النظرية، يتم استخراج الرواسب ذات الدرجة الأعلى والتي يسهل معالجتها والتي يمكن الوصول إليها أولًا. ومن المؤكد أن متوسط الدرجات المستخرجة من بعض الخامات المعدنية مثل النحاس تميل إلى الانخفاض بمرور

الوقت، وهي أقل بكثير اليوم مما كانت عليه في القرن التاسع عشر. وقد تمت مواجهة الاتجاه نحو انخفاض الدرجات في كثير من الحالات من خلال انخفاض تكاليف النقل والتحسينات في تقنية الاستخراج والمعالجة والاستكشاف. إن متوسط محتوى الحديد في الخامات المستخرجة في غرب أستراليا والبرازيل اليوم أعلى بكثير من الدرجات النموذجية لمعادن الحديد التي تمت معالجتها سابقًا في معظم أوروبا الغربية. كانت رواسب اليورانيوم في أونتاريو التي تم استغلالها في الخمسينات من القرن العشرين ذات درجات أقل بكثير من أحدث جيل من المناجم الكندية.

## • نضوب الخامات والتغير التقني

في جوهر الأمر، سوف يميل كل جيل إلى استغلال أفضل الرواسب التي يعرفها من خلال التقنيات المتاحة له. ومع تزايد المعرفة الجيولوجية، سواء من خلال فهم أفضل لطبيعة ونشأة الرواسب المعدنية أو من خلال الاستكشاف المستمر باستخدام تقنيات أكثر تطورًا، يرتفع أيضًا عدد الرواسب المعدنية المعروفة. وقد يكون لبعضها درجات خام أعلى من الرواسب التي يجري العمل عليها بالفعل، ولكنها ستعاني في كثير من الحالات من عيوب مقابلة، مثل البعد عن الأسواق أو ضعف إمكانية الوصول. وفي الوقت نفسه، تتغير تقنية استخراج الخام ومعالجته بشكل مستمر وتتيح التنمية الاقتصادية للرواسب المعدنية التي كانت معقمة سابقًا. ويمكن أن تكون هذه التغيرات التكنولوجية مدفوعة بمتطلبات الاستخدام النهائي والحاجة إلى إزالة القيود والاختناقات القائمة في العرض. وبمرور الوقت، تنجم التغيرات في تكاليف إنتاج المنتجات المعدنية عن استمرار لعبة شد الحبل بين آثار زيادة التكاليف الناجمة عن استنفاد الخام وتأثير خفض التكاليف الناجم عن التغير التكنولوجي وزيادة الإنتاجية.

وهذا يترك جانبًا التأثيرات الاقتصادية العامة مثل التحركات في مستويات الأسعار العامة، ومعدلات الأجور، وتكاليف الطاقة، وأسعار الصرف. والنتيجة ليس مفروغًا منها أبدًا. وكانت هناك فترات سادت فيها قوى الاستنزاف واتجهت تكاليف الإنتاج المعدلة حسب التضخم إلى الارتفاع، كما حدث في الخمسينات والستينات. وكانت هناك أيضًا فترات طويلة، كما حدث في الثمانينات والتسعينات، حيث تغلبت تحسينات الإنتاجية على هذه القوى واتجهت التكاليف الحقيقية إلى الانخفاض. إن عدم إظهار الأسعار الحقيقية لمعظم المنتجات المعدنية أي اتجاهات ملحوظة على مدى فترات طويلة يشير إلى أن القوى المتعارضة كانت متوازنة إلى حد ما.

ولكن في هذا الصدد، فإن الماضي لا يشكل بالضرورة دليلًا جيدًا للمستقبل، ولو لم يكن ذلك إلا بسبب التقلبات الواسعة والمطولة حول المتوسطات الطويلة الأجل. في حين أن جميع المنتجات المعدنية تخضع لبعض التأثيرات المشتركة، فإن السلوك التاريخي لأسعارها اختلف بشكل كبير، مما يعكس اختلاف استخداماتها النهائية والتأثيرات المتباينة على طبيعة ومواقع إنتاجها.

## • متطلبات النفقات الرأسمالية

تختلف متطلبات الصناعة من الإنفاق الرأسمالي باختلاف موقع وطبيعة كل رواسب معدنية. بالإضافة إلى بناء المنجم نفسه ومصنع المعالجة المرتبط به اللازم لإنتاج منتج قابل للتسويق، عادة ما تكون هناك حاجة إلى بنية تحتية مرتبطة به. ومن الطبيعي أن يكون هذا أقل عندما يقع المنجم بالقرب من مدينة راسخة أو منطقة تعدين قائمة، مع وجود إمدادات المياه والطاقة وخطوط النقل القائمة، مما لو كان يقع في منطقة بكر. وحتى في الحالة الأولى، ربما تحتاج المرافق القائمة إلى التكملة والتحديث. على الرغم من أن التعدين قد لا يكون

أكثر الصناعات كثافة في رأس المال، إلا أنه أحد الصناعات الرائدة. يمكن أن تكون المهل الزمنية قبل أن ينتج المنجم أي دخل كبيرة، خاصة إذا تم أخذ الفترة الممتدة من الاستكشاف الأولي إلى الإنتاج التجاري في الاعتبار بالكامل. وحتى الفترة الزمنية الفاصلة بين الاكتشاف الأول واتخاذ قرار الاستثمار عادة ما تتجاوز عقدًا من الزمن بالنسبة للرواسب المعدنية الكبيرة. عادةً ما يتم رسملة نفقات دراسات الجدوى المسبقة ودراسات الجدوى في تحديد الرواسب بشكل كامل، وتطوير عملية استخراج ومعالجة قابلة للاستمرار، وإجراء التقييمات البيئية المطلوبة. ومن المرجح أن يمتد البناء نفسه على مدى عدة سنوات، وعادة ما يستغرق الأمر نحو عامين من بدء التشغيل حتى يصل منجم كبير إلى طاقته التصميمية ويحافظ عليها. ومع ذلك، كان هناك اتجاه شبه عالمي لزيادة حجم المناجم بمرور الوقت.

على عكس العديد من المؤسسات الإنتاجية، لا تتحمل صناعة التعدين عبئًا ثقيلًا من النفقات الرأسمالية قبل بدء الإنتاج فحسب، بل تواجه أيضًا احتياجات مستمرة كبيرة طوال عمر مناجمها. هذه سمة حتمية للطبيعة المستنفدة للرواسب المعدنية. بالإضافة إلى الإنفاق الرأسمالي العادي على استبدال المعدات والصيانة، يجب على الصناعة أن تلبي التكاليف الرأسمالية المرتبطة باستخراج الخام من الأعماق المتزايدة والأجزاء النائية من الرواسب، والحفاظ على الإنتاج في مواجهة انخفاض درجات الخام. وبدون مثل هذا الإنفاق الرأسمالي المستمر، فإن إنتاج أي منجم فردي سوف يتضاءل ويتراجع قريبًا. وعلى هذا فإن الأمر يتطلب أيضًا استثمارًا بديلًا في كل قطاع من قطاعات إنتاج المعادن. على الرغم من أن عمليات إغلاق المناجم من المرجح

أن تتم في فترات تتسم بضعف ظروف السوق، إلا أن بعضها يحدث حتى عندما تكون الأسواق مزدهرة. وعندما يكون الطلب الإجمالي ثابتًا أو حتى في انخفاض، تكون هناك حاجة إلى قدرات جديدة لتعويض الخسائر الناجمة عن إغلاق المناجم والانخفاضات في إنتاج بعض العمليات المستمرة. ومع ارتفاع الطلب الإجمالي على معظم المنتجات المعدنية مع مرور الوقت، فإن إجمالي الإضافات السنوية للسعة تحتاج عادة إلى تجاوز صافي الإضافات، وفي كثير من الحالات بهامش كبير. ويعتمد الرصيد على العمر النموذجي وحجم المناجم، وهو ما يعتمد على طبيعة الرواسب الأساسية، وعلى معدل نمو الطلب. ويمكن أن تأتي القدرة الإضافية من توسعات المرافق القائمة على الرواسب المعدنية المعروفة أو امتداداتها، أو من استغلال الرواسب غير المستغلة من قبل.

عادةً ما تثبت شركات التعدين فقط ما يكفي من الخام لتبرير نفقاتها الرأسمالية الأولية. ومع تقدم التعدين وحصول المشغلين على فهم أفضل لخصائص رواسب الخام الخاصة بهم، فإنهم غالبًا ما يحددون مواد إضافية يمكن أن تبرر توسيع المنجم. عادةً ما يمثل توسيع المناجم الموجودة على رواسب الخام المعروفة حصة كبيرة من التغيرات السنوية في صافي القدرة. من جهة أخرى، قد لا تنطوي هذه التوسعات على أي إنفاق رأسمالي جديد، ربما عن طريق استخدام متفجرات مختلفة في المنجم أو كاشف جديد في مصنع المعالجة، بينما على الطرف الآخر، هناك حاجة إلى إنفاق رأسمالي كبير لتعميق المنجم أو توسيعه. ومن السمات المشتركة إدخال أحدث التقنيات المتاحة، مما يسمح بتحسين الإنتاجية وتعويض الزيادات في التكاليف الأساسية.

## • المقيـــاس الاقتصـــادي

ومـع توسـع المناجـم وزيـادة حجمهـا، يمكنهـا اسـتغلال وفـورات الحجـم. كلمـا كان المنجـم أكبـر، تمكنـت الشـركة مـن تقليـل تكاليفـه الثابتـة لـكل وحـدة عـن طريـق توزيعهـا علـى الإنتـاج المتزايـد. ويمكـن أن يبـرر الاسـتثمار في عناصـر أكبـر مـن المعـدات، مثـل المجـارف والشـاحنات، أو في أسـاليب التعديـن التـي تتطلـب رأس مـال أكبـر مـن المناجـم الأصغـر حجمـا. ويمكنـه أيضًـا دعـم تعديـن الخامـات ذات الدرجـة الأقـل بكثيـر مـن العمليـات الأصغـر. وفي الواقـع، لـم تتمكـن صناعـة التعديـن مـن تعويـض تكاليـف اسـتخراج ومعالجـة الخامـات الأصغـر حجمًـا في المواقـع النائيـة إلا مـن خـلال العمـل علـى نطـاق متزايـد.

منـذ زمـن بعيـد كان هنـاك اتجـاه لا يرحـم نحـو أسـاليب التعديـن الأكثـر كثافـة في رأس المـال وعلـى نطـاق أوسـع. وقـد تسـارع هـذا الاتجـاه في جميـع المجـالات منـذ أواخـر ثمانينـات القـرن العشـرين، ممـا أدى إلـى انخفـاض في عـدد المناجـم لـكل منتـج وارتفـاع قـوي في متوسـط حجمهـا. تميـل المناجـم المفتوحـة إلـى العمـل علـى نطـاق أوسـع بكثيـر مـن المناجـم الموجـودة تحـت الأرض، وكان توسـعها النسـبي مفضـلًا لسـنوات عديـدة بسـبب قدرتهـا علـى اسـتغلال وفـورات الحجـم التقنيـة إلـى أقصـى حـد. وتعـززت هـذه القـدرة بفِعـل نمـو تمويـل المشـاريع القائـم علـى الديـون في عقـود مـا بعـد الحـرب.

تاريخيًـا، كانـت المخاطـر التـي ينطـوي عليهـا التعديـن تمنـع الشـركات مـن الاعتمـاد بشـكل غيـر مبـرر علـى تمويـل الديـون. وكان هـذا يعنـي بالضـرورة الاعتمـاد علـى أسـواق الأسـهم والأمـوال المولـدة داخليًـا والتـي تميـل إلـى تقييـد قـدرات الشـركات علـى تحسـين حجـم مناجمهـا. وكان نطـاق السـوق المحليـة في كثيـر مـن الأحيـان يشـكل قيـدًا إضافيًـا عندمـا كانـت تكاليـف النقـل بمثابـة عائـق. وهكـذا تميـل المناجـم

إلى البدء صغيرة نسبيًا ثم التوسع عندما تسمح ظروف السوق والتمويل بذلك. ولكن في العقدين الماضيين، أدى توفر تمويل المشاريع على نطاق واسع ووجود سوق عالمية إلى تمكين الشركات من التطور على نطاق أمثل من الناحية الفنية منذ البداية. إن زيادة الحجم هي نعمة ونقمة. كلما زاد حجم المنجم، وخاصة إذا كان حفرة مفتوحة، زاد تأثيره البيئي والاجتماعي على الحي المحيط به. علاوة على ذلك، فإن احتياجات المناجم الأكبر حجمًا إلى تقليل تكاليفها الثابتة لكل وحدة إنتاج تقلل من مرونتها في الاستجابة لظروف السوق المتغيرة. ومن الممكن أن يؤدي ذلك إلى تقلبات أكبر في الأسعار مقارنة بالأسواق التي بها عدد أكبر من العمليات الأصغر.

من الناحية العملية، تميل معظم المناجم إلى زيادة إنتاجيتها إلى الحد الأقصى خلال فترات انخفاض الأسعار، غالبًا عن طريق رفع متوسط درجة الخام المستخرج. إذا كانت شركات التعدين تهدف إلى زيادة صافي القيمة الحالية (NPV) لرواسبها الخام، فقد تخفض بشكل منطقي درجاتها النهائية عندما تضعف الأسعار، ولكن أهدافها أكثر تعقيدًا. كما يحتاجون أيضًا إلى مراقبة ربحية استثماراتهم الرأسمالية، والتي تختلف عن القيمة الضمنية للرواسب المعدنية. ويميل بقاء الشركات إلى أن يكون له الأسبقية على الزيادة النظرية لصافي القيمة الحالية.

## • الإغلاقات والتخفيضات

تميل المناجم إلى البقاء في الإنتاج لأطول فترة ممكنة، حتى عندما تفشل الأسعار في تغطية تكاليفها. وتظهر التجربة أن فترات الركود لا تدوم إلى أجل غير مسمى، وأن الشركات تتمسك بالأمل في تحسين الظروف، طالما تمت تغطية التكاليف المتغيرة وتقديم بعض المساهمة في التكاليف الثابتة. قد تدعم البنوك

استمرار تشغيل المنجم الخاسر لضمان سداد قروضها في نهاية المطاف. وفي كثير من الحالات قد تتجاوز تكاليف الإغلاق تكاليف استمرار الإنتاج بسبب الحاجة إلى إعادة تأهيل الموقع. ويجب أن تؤخذ في الاعتبار النفقات المستمرة للرعاية والصيانة. إذا كانت المناجم من المساهمين الأساسيين في الاقتصاد المحلي، فقد تكون الحكومات مستعدة لتأمين خسائرها للحفاظ على الاستقرار الاقتصادي والاجتماعي للمنطقة. وفي بعض الحالات، قد يكون منتج المنجم ضروريًا للعمليات النهائية، والحاجة إلى استمرار إمداد المواد الخام تعادل أي خسائر نقدية.

إن جمود الإنتاج في مواجهة انخفاض الأسعار يكون أكبر في الأسواق النهائية التي يتم اللجوء إليها كملاذ أخير أو حيث تكون تكاليف بناء المخزون منخفضة مقارنة بقيمة الإنتاج. يجب تخزين المنتجات الثانوية بشكل أو بآخر عندما تضعف ظروف السوق بشكل مختلف عن ظروف المنتج الرئيسي. وبالتالي فإن منتجي الغاز الحمضي في كندا يقومون بشكل دوري بتفريغ كميات كبيرة من الكبريت الناتج، والذي تعتبر إزالته ضرورية لبيع الغاز. إن تكاليف التعدين وتخزين معظم المعادن الصناعية والسائبة باهظة، وعادة ما يتعين على مناجمها خفض إنتاجها عندما ينخفض الطلب وتضعف الأسعار.

على النقيض من ذلك، يمكن لمنتجي المنتجات الموجهة للأسواق النهائية، أي المعادن غير الحديدية والمعادن الثمينة، دائمًا بيع إنتاجهم بالكامل طالما أنهم على استعداد لقبول الأسعار الجارية. حتى عندما يكون المستخدمون غير قادرين أو غير راغبين في الشراء، يمكنهم وضع منتجاتهم في المستودعات وتخزينها.

## • التسعير والعوائق

إن سهولة أو صعوبة تكوين المخزونات ليست سوى أحد العوامل التي تفسر تسعير المنتجات المعدنية. وأهمها مدى استجابة العرض للطلب والأسعار المتغيرة، ومستوى وطبيعة الحواجز أمام الدخول. وتتشابك هذه العوامل بشكل وثيق. وحيثما تكون الحواجز مرتفعة، سيتمتع المنتجون الحاليون ببعض القوة الاحتكارية وسيكونون قادرين على التأثير على الأسعار. وفي الأمد القريب، لن يتم تقييد هذه القوة إلا بمدى توافر البدائل وفعاليتها، بما في ذلك المواد المعاد تدويرها؛ بأي قوة تعويضية للمشترين؛ وبمدى مشاركة المنتجين الحاليين في أهداف وفلسفات مماثلة. وفي الأمد الأبعد، فإن وجود أرباح جذابة ظاهريًا من شأنه أن يجتذب الداخلين الجدد، الذين سيعتمد نجاحهم في اختراق السوق على الأسباب التي تقف وراء ارتفاع الحواجز التي تحول دون الدخول. وحيثما تكون الحواجز التي تحول دون دخول موردين جدد منخفضة ويمكن التغلب عليها بسهولة، فإن الأسواق تميل إلى أن تكون تنافسية، حيث تعكس الأسعار بشكل أوثق التفاعل بين العرض والطلب.

إن أهم عائق أمام الإنتاج الجديد هو توافر الرواسب المعدنية غير المستغلة. ولا يقتصر ذلك على وفرة القشرة المعدنية للمعادن، رغم أهميتها الحيوية، ولكنه يعتمد أيضًا على عدد وطبيعة الرواسب المحتملة القابلة للتعدين. تعد وفرة البلاتين في القشرة الأرضية أعلى قليلًا من وفرة الذهب، لكن الرواسب التجارية قليلة وتتركز جغرافيًا في أماكن محددة، في حين أن رواسب الذهب منتشرة على نطاق أوسع بكثير. ولذلك، فإن حواجز الدخول التي يواجهها البلاتين أعلى بكثير من حواجز الذهب. وحتى في الحالات التي يكون من المعروف فيها وجود رواسب معدنية غير مستغلة، فإنها قد لا تكون مجدية تجاريًا في ظل التقنية الحالية. وفي بعض الحالات، يشكل امتلاك المنتجين

الحاليين للتقنية المسجلة الملكية عقبة كبيرة أمام الداخلين الجدد. وفي أماكن أخرى، قد يؤدي الحجم المحدود لإجمالي السوق وتركيزه إلى تقييد المجال أمام الموردين الجدد لتأمين مبيعات كافية لتبرير الاستثمار.

معظم العوائق باستثناء النقص الجيولوجي يمكن التغلب عليها أو التحايل عليها في نهاية المطاف. وحتى ذلك يشجع على الاستكشاف، مما قد يؤدي إلى اكتشاف رواسب جديدة قد تكون، في بعض الحالات، متفوقة في كثير من النواحي على الرواسب التي يجري تعدينها بالفعل. إن وجود قيود على المعالجة يعزز البحث والتطوير الفني الذي يؤدي في كثير من الأحيان إلى عمليات أقل تكلفة أو أكثر كفاءة، وبالتالي تمكين الوافد الجديد من تجاوز هذه القيود. وحتى صغر حجم السوق الحالي لا يشكل عائقًا مطلقًا أمام الداخلين الجدد المبتكرين الذين يبحثون عن استخدامات جديدة ويطورونها. من أجل الحفاظ على الأسعار تحت السيطرة، سيحرص معظم المشترين على تشجيع الموردين الإضافيين.

يفضل المستخدمون بطبيعة الحال وجود درجة من الطاقة الفائضة بين مورديهم. وبمرور الوقت، أدى دور انخفاض تكاليف النقل في خفض الحواجز المكانية أمام الدخول وتوسيع النطاق الجغرافي للأسواق إلى تقليل قدرة الموردين المحليين والإقليميين على التحكم في أسعارهم وظروف السوق بشكل كبير. وفي كثير من الأحيان، قد تكون العوائق المصطنعة أمام الداخلين الجدد فعالة بقدر فعالية القيود التقنية. وبالنسبة للأسواق الوطنية، فإن ذلك يشمل الإعانات والحواجز التجارية بجميع أنواعها. وبإمكان الموردين المحليين، بعد أن أصبحوا محميين من الخراب الكامل للمنافسة الأجنبية، أن يمارسوا قدرًا كبيرًا من السيطرة على أسواقهم المحلية. وقد تم إلغاء معظم التعريفات الجمركية والعقبات المماثلة التي تعترض التجارة في المنتجات المعدنية أو تخفيضها إلى حد كبير على مر السنين في جولات متتالية من مفاوضات التعريفات الجمركية

الدولية. ومع ذلك، لا تزال بعض الحواجز الجمركية قائمة، مما يؤثر بشكل رئيسي على البلدان التي تريد أن تفعل أكثر من مجرد استخراج وتصدير معادنها دون مزيد من المعالجة. قد تكون واردات المنتجات المعدنية الأساسية معفاة من الرسوم الجمركية، ولكن قد تكون هناك تعريفات متواضعة على ما يبدو على المنتجات النهائية، بما في ذلك المنتجات شبه المصنعة. وفي مثل هذه الحالات، قد تكون هناك حماية فعالة إلى حد ما على القيمة المضافة في المنتجات النهائية.

## • العوامل السياسية

وبغض النظر عن الحواجز التجارية، فإن معظم القيود الإدارية والسياسية المفروضة على العرض موجودة في البلدان الغنية بالمعادن وليس في البلدان المستوردة. وحتى عندما تكون العديد من الرواسب المعدنية المعروفة في انتظار التطوير، ويبدو أنها قادرة على الإنتاج بشكل مربح باستخدام التقنية الحالية، فإن استغلالها يعتمد على بيئة اجتماعية وسياسية واقتصادية حميدة، أو على الأقل محايدة.

في العديد من البلدان الغنية بالمعادن، البيئة ليست حميدة على الإطلاق. وكما ذكرنا سابقًا، تخصص شركات التعدين موارد كبيرة لتطوير المناجم على مدار سنوات عديدة قبل بدء الإنتاج التجاري. وتمتد الحياة المتوقعة لاستثماراتهم لسنوات عديدة أخرى منذ البداية. وفي كل مرحلة تكون المخاطر الفنية والاقتصادية مرتفعة، مع وجود احتمال دائم بفشل الاستثمار. بعد أن يخصص المستثمر الموارد لتطوير الرواسب، فإنه يصبح أسيرًا للثروة. رأس مال الشركة غارق بشكل جيد، ومن المستحيل تحويل الاستثمار إلى بيئة أكثر ملاءمة. وبالتالي فإن القدرة التفاوضية لشركة التعدين مع البلد المضيف تضعف إلى حد كبير بعد استثمار رأس مالها. ولا ينعكس هذا التغيير في قوة

المساومة النسبية بالضرورة في أي تغيير في الشروط التي يتم بموجبها تطوير المنجم. ومع ذلك، فهي تركز على الاستكشاف وتطوير المناجم في البلدان التي تتمتع بأطر سياسية واجتماعية وقانونية واقتصادية مستقرة نسبيًا. وعندما لا يتم استيفاء هذه الشروط المسبقة الأساسية، فإن العديد من الشركات سوف تميل إلى تجنب الاستثمار، بغض النظر عن مدى التطلعات الجيولوجية للدولة.

وسيسعى المستثمرون في البلدان الأكثر خطورة إلى تحقيق عوائد مرتفعة بشكل متناسب ويميلون إلى التركيز على تطوير المناجم ذات الاحتياجات المحدودة للبنية التحتية الباهظة الثمن وفترات الاسترداد السريعة. ولا تقتصر بأي حال من الأحوال جميع الحواجز الإدارية والسياسية التي تحول دون الدخول إلى البلدان النامية. على سبيل المثال، قامت أستراليا بتقييد تطوير مناجم اليورانيوم الجديدة لعدة عقود بسبب معارضة الطاقة النووية. كما أدى القلق بشأن الأضرار البيئية المحتملة الناجمة عن تطوير المعادن إلى فرض حظر محدد على التعدين في أو بالقرب من المتنزهات الوطنية ومناطق الجمال الطبيعي في أمريكا الشمالية وأستراليا وأوروبا الغربية. إن مثل هذه المخاوف البيئية ليست سوى جزء من المخاوف القوية التي يثيرها التعدين في جميع أنحاء العالم. وبغض النظر عن كون الرواسب المعدنية ذات قيمة ضئيلة أو معدومة القيمة إلى أن يتم استخراج محتوياتها عن طريق التعدين، فهناك معتقدات واسعة النطاق وراسخة مفادها أن مكافآتها لا ينبغي أن تعود للمستثمر بل في المقام الأول للدولة باعتبارها الوصي على المصلحة العامة. مع استثناءات قليلة، فإن معظم حقوق التعدين في جميع أنحاء العالم منوطة بالدولة. عندما يتم بيع الرواسب المعدنية غير المستغلة بالمزاد العلني، فإن أسعارها تعكس مزيجًا من رأس المال الذي تم إنفاقه بالفعل في استكشافها وايجادها، والإيجار المتوقع المتراكم من تطويرها واستغلالها في المستقبل.

## • التنقيب عن المعادن

مثل أي شكل آخر من أشكال الاستثمار، يتم التنقيب عن المعادن على أمل تحقيق عائد يزيد عن رأس المال المستثمر. ورغم أن مخاطر الفشل مرتفعة، فإن الشركات لا تستكشف سعيًا وراء متوسط معدلات العائد، بل على أمل أن تفوز بالجائزة الكبرى، إذا جاز التعبير، باكتشاف جذاب جدًا. وقد تأتي عودتهم إما من تطويرهم للمناجم لاستغلال أي اكتشافات أو من بيع الرواسب المكتشفة لشركات أخرى. وبالتالي، فإن حقوق الملكية المضمونة التي يمكن إنفاذها قانونيًا تعتبر ضرورية للاستكشاف كما هي ضرورية لتطوير المناجم. تحتاج شركة الاستكشاف إلى ضمان أنها تستطيع الاستفادة من أي اكتشاف تقوم به.

## • الإيجارات المعدنية

تقاس المساهمة الاقتصادية لصناعة التعدين بقيمتها المضافة: مجموع المكافآت المدفوعة لعوامل الإنتاج الأساسية، أي الأرض، والعمالة، ورأس المال. وبالنسبة للجميع باستثناء المنتج الهامشي، فإن نسبة من القيمة المضافة تعكس الإيجارات المتراكمة على المورد. وفي هذا الصدد، فإن التعدين مثل الصناعات الأولية الأخرى مثل الزراعة والغابات حيث ينبع جزء من الدخل السنوي من خصائص الموارد الطبيعية المستخدمة.

الإيجار هو الفرق بين قيمة المنتج ومجموع تكاليف الفرصة البديلة لجميع الموارد المستخدمة في صنع المنتج، بما في ذلك الحد الأدنى لمعدل العائد على رأس المال المطلوب لجعل المستثمر يلتزم بدفع الأموال في المقام الأول. وفي الأمد القريب، من الممكن أن تعود هذه العائدات إلى أي من العوامل المعنية، بما في ذلك العمالة والإدارة، ولكن مثل هذه شبه الريع يتم التنافس عليها عادة في

الأمد الأبعد، ما لم تكن هناك حواجز عالية مصطنعة تحول دون المنافسة على هذه العوامل. وعلى النقيض من ذلك، فإن الريع المتراكم للمورد يعكس طبيعته المتأصلة في ظل التقنيات السائدة والمعرفة الجيولوجية. حيث لا يتم تعبئة ريع الموارد إلا عندما يتم استخراج الرواسب المعدنية. وهي تتطلب تطبيق عوامل الإنتاج الأخرى، ولا سيما العمالة ورأس المال، قبل أن يتم تقييمها. فعندما يتم بيع الرواسب المعدنية غير المستغلة مباشرة أو بيعها بالمزاد العلني، فإن المشاركين في هذه الرواسب يضعون افتراضات ضمنية حول صافي القيمة الحالية للإيجارات المستقبلية التي سيحققها استغلالهم. وقد تكون هذه الافتراضات بعيدة عن الواقع، سواء كانت متفائلة بشكل غير مبرر أو حذرة جدًا.

قد يكون مفهوم الريع المعدني واضحًا، ولكن تقديره معقد. وحتى عندما تكون الأسعار والطلب مستقرين، فإن التكاليف والدخل سوف يختلف من سنة إلى أخرى. ويتم تكبد نفقات رأسمالية باهظة قبل الإنتاج التجاري وعلى فترات دورية خلال السنوات اللاحقة، وترتبط التكاليف الرأسمالية أيضًا بالإغلاق النهائي. ونظرًا للتكاليف التي ينطوي عليها اكتشاف الخام وإثباته، فمن غير المرجح أن تكون حياة المنجم معروفة على وجه اليقين. عادة، تثبت الشركات فقط المحتوى المعدني الكافي لتبرير استثمارها الأولي، بغض النظر عن حجم الرواسب الأساسية. ومع اقتراب المناجم من نهاية عمرها الإنتاجي، تميل تكاليف تشغيلها إلى الارتفاع مع انخفاض درجاتها وتعمقها. ومن الناحية العملية، يمكن أن يتقلب الطلب وأسعار المدخلات والمنتجات تقلبًا كبيرًا، حتى عندما يكون اتجاهها الأساسي مستقرًا.

وفي كثير من الأحيان لا يكون الأمر كذلك. ولهذه الأسباب المختلفة، فإن مبلغ الإيجار يختلف من سنة إلى أخرى. وهذا يعني أنه ينبغي تحويل جميع الدخل

والنفقات إلى صافي القيمة الحالية من أجل التأكد من إيجارات الرواسب المعدنية. وهذا يثير المزيد من التعقيدات. هل ينبغي خصم القيم المستقبلية بتكلفة الفرصة البديلة لرأس المال أو بمعدل آخر؟ وعلى أية حال، ما هي تكلفة الفرصة البديلة لرأس المال؟ ومن المرجح أن تختلف بين فئات مختلفة من المستثمرين المحتملين وبين مختلف البلدان. سيكون الحد الأدنى المطلوب لمعدل العائد أقل بالنسبة لعملية قصيرة الأجل تتطلب الحد الأدنى من المرافق في بلد متقدم مقارنة بمنجم طويل الأجل واسع النطاق يحتاج إلى بنية تحتية ضخمة في بلد نام غير مستقر.قد تكون شركة تعدين كبيرة ومتنوعة قادرة على جمع الأموال بتكلفة أقل بكثير من شركة أصغر بكثير دون سجل حافل، ولكن تكلفة التمويل للوكالات الحكومية قد تكون أقل. وبما أن ريع المعادن ينشأ في نهاية المطاف من طبيعة المورد الأساسي، فإن تكاليف الفرصة البديلة هذه تكون على أية حال أقل أهمية لخصم القيم المستقبلية من معدلات الخصم الاجتماعي الوطني في البلدان المضيفة. ومن المرجح أيضًا أن تختلف هذه المعدلات، وربما تكون أقل بكثير في الاقتصاد المتقدم الغني عنها في بلد نام فقير.

## • التعدين والإدارة الاقتصادية

إن الأرباح المتقلبة والتي لا يمكن التنبؤ بها بسبب تقلب الطلب والأسعار يمكن استيعابها بسهولة من قبل اقتصاد واسع النطاق ومتنوع على نطاق واسع، حتى لو كان التأثير المحلي كبيرًا. وهي أقل قابلية للإدارة بالنسبة للبلدان النامية التي لا تملك سوى القليل من المصادر البديلة للدخل وفرص العمل. وتفاقمت مشاكل الإدارة الاقتصادية في هذه البلدان عندما بدا أن أسعار المعادن تسير في اتجاه هبوطي طويل الأجل بالقيمة الحقيقية. ثم واجهت هذه البلدان انخفاض معدلات التبادل التجاري، بحيث أصبح من الصعب تدريجيًا كسب ما

يكفي من النقد الأجنبي لتمويل الواردات. ورغم أن طفرة منتصف العقد الأول من القرن الحادي والعشرين عطلت الاتجاهات السابقة على ما يبدو، فقد يكون من السابق لأوانه الإعلان عن موتها.

بالنسبة للعديد من الاقتصادات، يمكن أن يؤدي بدء مشاريع التعدين الجديدة إلى طفرات مفاجئة في الدخل وفرص العمل وعائدات النقد الأجنبي. ويؤدي هذا التكتل إلى تفاقم المشاكل الناجمة عن التقلبات الأساسية في معظم قطاعات صناعة المعادن. وما لم تتم إدارتها بشكل مناسب، فإن زيادة النشاط الناشئة عن تطوير المناجم الجديدة يمكن أن تؤدي إلى خلل في توازن الاقتصاد المضيف. تميل التأثيرات إلى أن تكون أكثر وضوحًا في قطاع النفط والغاز مقارنة بالمعادن غير النفطية، لكنها مع ذلك يمكن ملاحظتها. ويؤثر الارتفاع القوي في الصادرات على ميزان المدفوعات ويميل إلى ارتفاع قيمة العملة. وفي ذلك الوقت، يتم جذب الموارد، وخاصة العمالة، بعيدًا عن استخداماتها الحالية إلى قطاع التعدين الموسع حديثًا، وترتفع التكاليف. وتتراجع القدرة التنافسية للقطاعات القائمة، مما يؤدي إلى انخفاض المبيعات وارتفاع معدلات البطالة، بحيث يصاحب ازدهار صادرات المعادن انكماش القاعدة الاقتصادية في بقية الاقتصاد.

## • القدرات المؤسسية والتعدين

ومن المؤسف أن بعض البلدان المضيفة تفتقر إلى القدرة المؤسساتية والكفاءة الإدارية اللازمة لتبني ومتابعة السياسات المالية المناسبة. كما أنها ليست قادرة دائمًا على تركيب وتشغيل أنظمة لتعويض عائدات الضرائب المتقلبة. وتشمل هذه الأنظمة صناديق التثبيت التي تتلقى جميع عائدات الضرائب على المعادن عند اكتسابها، ولكنها لا تطلقها إلا للإنفاق الحكومي على مدى فترة معينة استنادًا إلى تقدير لمتوسط الأرباح المحتملة على مدى دورة الأعمال. إن صناديق

الاستقرار الفعّالة قادرة على حماية الإنفاق الحكومي من التقلبات الشديدة في عائدات الضرائب، ولكنها ليست علاجًا شاملًا. وبصرف النظر عن الصعوبات الكامنة في تقييم الاتجاه المستقبلي للأسعار والإيرادات، هناك مشاكل ضمان استقلالية إدارة الصندوق وعملياته عن التدخل السياسي والبيروقراطي. وهذه قضايا تخص الديمقراطيات الناضجة، ناهيك عن أغلب البلدان النامية.

عندما تضاف التأثيرات البيئية الواضحة لتنمية المعادن، بغض النظر عن مدى جودة وحساسية إدارتها، إلى عواقبها الاقتصادية والاجتماعية السلبية المحتملة في البلدان التي تعاني من سوء الإدارة، فمن المفهوم أن يتحدث منتقدو صناعة التعدين من ناحية لعنة الموارد الحتمية. ومع ذلك، في كثير من الحالات، لا تملك البلدان المضيفة سوى القليل من المصادر البديلة لخلق الثروة المحتملة، إن وجدت. إنهم يفتقرون إلى رفاهية الاختيار بين التعدين والأنشطة الاقتصادية الأخرى. علاوة على ذلك، فإن ضعف المؤسسات وسوء الإدارة هما السببان الرئيسيان لمعظم العلل التي تعزى إلى الاعتماد على تنمية المعادن. ويتلخص الرد المناسب في معالجة هذه القضايا بشكل مباشر بدلًا من الامتناع عن التعدين على أساس أنه قد يزيدها سوءًا بدلًا من المساعدة في حلها.

## • استنزاف الموارد والاستدامة

وبصرف النظر عن فعالية وكفاءة الحكومات المضيفة، يتعين على كافة البلدان الغنية بالمعادن أن تتعامل مع العواقب المترتبة على استنفاد الاحتياطيات. وبغض النظر عن مدى اتساع الرواسب المعدنية في أي بلد، فإنها سوف يتم استنفادها في نهاية المطاف. وبهذا المعنى الضيق، فإن التعدين ليس مستدامًا. وفي كثير من الأحيان، يتم تصدير المعادن المستخرجة بدلًا من الاحتفاظ بها داخل الدولة، وبالتالي لن تكون متاحة لإعادة التدوير محليًا. وما لم تفتح

الاكتشافات الجديدة والتطورات التقنية موارد معدنية إضافية، فسوف تكون هناك حاجة إلى وسائل بديلة لخلق الثروة للحفاظ على مستويات المعيشة الحالية، ناهيك عن تلبية الاحتياجات المتزايدة لعدد متزايد من السكان. قد يكون استثمار بعض عائدات التعدين اليوم في وسائل أخرى لتوليد الثروة أمرًا مرغوبًا اقتصاديًا واجتماعيًا، لكن حتمية تلبية الاحتياجات الفورية قد يكون من الصعب مقاومتها، حتى في الدول التي تتمتع بالحكم الرشيد. وفي الدول ذات الحكم الضعيف قد لا يمكن مقاومتها.

تاريخيًا، كان التعدين في كثير من الأحيان بمثابة نقطة انطلاق للتنمية الاقتصادية المستدامة، سواء من خلال احتياجاته من البنية التحتية، وطلباته من السلع والخدمات، والروابط النهائية لمزيد من المعالجة. وبالإضافة إلى توظيفهم ومشترياتهم المباشرة، يمكن لتطورات التعدين أن تخلق طلبات غير مباشرة من عمالها وموردها. ويعتمد حجم هذه التأثيرات المضاعفة على موقع وطبيعة المشاريع الأولية، وعلى مدى مراعاة آثار المنجم نفسه أو جميع المرافق المرتبطة بالمشروع. وفي كثير من الأحيان، يمكن تحقيق الفوائد الرئيسية وغير المباشرة بعيدًا عن المنجم نفسه، وقد تتسرب بالفعل إلى الخارج بالنسبة للعديد من البلدان والمناطق.

وبالمثل، قد يكون هناك احتمال ضئيل للمعالجة الاقتصادية النهائية في العديد من البلدان التي تفتقر إلى البنية التحتية المناسبة أو العمالة المناسبة. ومقارنة بالأزمنة السابقة، أدت التغيرات في الاتصالات والتقنية إلى تقليل احتمالات حدوث تأثيرات مضاعفة محلية إلى حد كبير. وحتى في البلدان المتقدمة، يؤدي إغلاق المناجم إلى إثارة مشاكل اقتصادية واجتماعية. هناك جدل دائم بين أولئك الذين سيخلقون فرص عمل بديلة بالقرب من المناجم المستغلة وأولئك

الذين سيهجرون تمامًا المستوطنات النائية القائمة على المناجم وينقلون سكانهم إلى أماكن أخرى. وإذا كان من الممكن أن تزدهر البدائل دون دعم مصطنع مثل الإعانات، فقد يكون الأول هو النهج الأكثر استدامة. وفي حالات أخرى، من الأفضل معالجة الاضطرابات الاجتماعية المعنية بشكل مباشر وقبول حقيقة مفادها أن البلدات التي تيتمت بسبب إغلاق المناجم من غير المرجح أن تكون مستدامة.

والمفارقة هنا هي أن تنمية المعادن تعمل على تعبئة الثروة عن طريق استخدام الثروة المحتملة الكامنة في الموارد الطبيعية. وشريطة إعادة استثمار بعض الثروة المعبأة على هذا النحو في توفير الاحتياجات المستقبلية، فإن التعدين يقدم مساهمة مناسبة في التنمية المستدامة. تعتبر الرواسب المعدنية غير المستغلة عقيمة تمامًا، ولا تساهم في تلبية الاحتياجات الحالية أو المستقبلية. ليس هناك أي ضمان على الإطلاق بأن محتوياته ستكون مطلوبة في المستقبل (Crowson, 2011).

# الفوائد الاقتصادية لمخلفات التعدين

تعد نفايات التعدين Mining Waste واحدة من أكبر مجاري النفايات في الاتحاد الأوروبي. يمكن أن تحتوي على كميات كبيرة من المواد الخطرة. تأتي نفايات التعدين من استخراج ومعالجة الموارد المعدنية. وهي تشمل مواد مثل طبقة التربة السطحية (التي تتم إزالتها للوصول إلى الموارد المعدنية)، والنفايات الصخرية والمخلفات (بعد استخراج المعادن القيمة). يتسبب تصريف النفايات السائلة الناتجة عن التعدين في حدوث تلوث بيئي خطير مثل تصريف المناجم الحمضي والذي بدوره يفسد جودة المياه السطحية والجوفية.

ولا يقتصر هذا التأثير على المياه فحسب، بل يؤثر بشكل مباشر أو غير مباشر على النباتات والحيوانات وتضاريس الأرض والظروف الاجتماعية والاقتصادية للسكان المحليين. في قطاع التعدين، يتم إرسال النفايات السائلة إلى أحواض المخلفات ويتم التخلص من المواد الصلبة على شكل أكوام صخور النفايات التي تحتوي على المعادن ذات الفائدة المرغوبة. وهي تختلف بشكل كبير فيما بينها من ناحية تركيباتها المعدنية الفيزيائية والكيميائية وتركيزاتها. نظرًا للمحتوى المعدني، إما عن طريق العمليات الكيميائية أو البيولوجية، فقد أصبحت السبب الرئيسي لإنتاج تصريف المناجم الحمضي. يعد استخدام المعرفة العلمية والتقنيات المناسبة لاستردادها أمرًا صعبًا ويتطلب قدرًا كبيرًا من الإيرادات. وقد تم استخدام العديد من العمليات على مدى العقد الماضي لإنشاء منتجات ذات قيمة سوقية يمكن للصناعة من خلالها تعويض تكلفة العلاج. ولتحقيق ذلك، فإن تطوير نهج متكامل يقوده الاقتصاد المستدام Circular Economy يمكن أن يساعد بالتأكيد في إعطاء دفعة للتعدين المستدام. مطلوب تغيير تحويلي للتفكير في اتجاه الاستفادة من نفايات المناجم لتحسين المجالات المجتمعية والجغرافية البيئية والجغرافية المعدنية والهندسية والاقتصادية والقانونية أو التنظيمية.

إن توليد مثل هذه المنتجات التي يمكن جعلها مواد خام في خطوط الإنتاج الأخرى مثل الصناعات الكيميائية، والطلاء التمهيدي، والأصباغ والطلاء، والسيراميك، والمطاط، وطلاء الفخار، وتقنيات معالجة التربة، ووسائط الترشيح الماصة والطلاءات يمكن أن يربط صناعات التعدين في النهاية بالمستخدمين. وهذا من شأنه أن يفتح الأبواب لتقاسم آلية ممكنة بين المستفيدين، أي الصناعة والمشترين والحكومة والمجتمع. وإلى جانب المعرفة العلمية، فإن الإدراك الاجتماعي ومقبولية هذه المنتجات له نفس القدر من الأهمية ولا يمكن تحديده بشكل صحيح إلا من خلال تطبيق نهج متعدد التخصصات.

المشكلة الأكثر شيوعاً وانتشاراً التي تواجهها صناعات التعدين هي «كيفية التعامل مع المادة المرتشحة» أو المخلفات؟ على الرغم من الطرق المتعددة، وبسبب الانسكاب أو التسرب من مناطق الحجز، تدخل هذه المخلفات بطريقة أو بأخرى إلى النظام المائي وتسبب العديد من المشكلات البيئية الخطيرة. ومع ذلك، فإن تصريف المناجم الحمضية الناتج من مواقع المناجم المتعددة المعادن العاملة والمهجورة يحتوي على معادن ثقيلة وكبريتات. نظرًا لاحتوائها على نسبة عالية من المعادن، يصبح تخزينها والتخلص منها أمرًا لا غنى عنه للحد من عواقبها على المدى الطويل. ولذلك ينبغي تطوير أساليب أو عملية كاملة بحيث يمكن استرداد المعدن الذي يبقى في أكوام هذه الأكوام بشكل فعال وبالتالي إضافة قيمة إلى الاقتصاد المستدام. يعد تقليل النفايات واستعادتها من مجاري النفايات من العوامل الحيوية التي ينبغي للمرء أخذها في الاعتبار عند الحديث عن الاقتصاد المستدام.

يعد الاقتصاد المستدام نموذجًا اقتصاديًا جديدًا، يتمتع بإمكانات اقتصادية هائلة ويركز على عدم خلق أي نفايات. يهدف الاقتصاد المستدام إلى الحفاظ على المنتجات والمواد قيد الاستخدام لأطول فترة معقولة والحفاظ على قيمة

المواد. في عصر الأزمات، لا شيء يمكن اعتباره هدرًا. من المؤكد أن النهج السليم والمنهجية الدقيقة والتنفيذ المناسب يمكن أن يؤدي إلى إنتاج منتجات ذات قيمة سوقية. يتوفر عدد كبير من العمليات/التقنيات التي يمكن أن تجني ثمارًا من النفايات المختلفة الناتجة أثناء العمليات التعدينية. أحد الأمثلة على ذلك هو توليد أصباغ غير عضوية نقية من الملاط الكبير الحجم المتولد من مواقع دفن المناجم أو أحواض المخلفات. حيث أبلغ الباحث فلوريس وآخرون (2012م) عن دور أكاسيد الحديد كمواد ماصة/محفزة متولدة من AMD. كما أبلغ الباحثون رودريغو دي أليدا سيلفا وآخرون (2011م) عن إنتاج أكسيد الحديد من الصرف الحمضي للمناجم.

أيضاً، يمكن استخدام النفايات الناتجة عن تعدين الفحم كخيار لإنتاج صبغة الحديد من السوائل المرتشحة. حيث نجح الباحث روبرت هيدن في عام 2002م في استخلاص «أكاسيد الحديد ذات الدرجة الصبغية» وتجفيف الماء منها وبيعها لعميل في صناعة الأصباغ. استخدم مصارف المناجم الحمضية الناتجة عن العديد من مناجم الفحم المهجورة كمواد خام رئيسية لإنتاج أصباغ أكسيد الحديد. وأظهرت جهوده إمكانية وجدوى استعادة الحديد من تصريف المناجم الحمضية. تشير التقديرات إلى أنه يتم تفريغ أكثر من 100000 طن من الحديد سنويًا من مناجم الفحم في الولايات المتحدة وحدها. من المحتمل أن تمثل الكميات الكبيرة من أكاسيد الحديد التي تتراكم كمنتجات ثانوية للنفايات مصدرًا مستدامًا رئيسيًا للمواد الخام التي يمكن إعادة استخدامها.

لا تقتصر عمليات إعادة الاستخدام المحتملة لأكاسيد الحديد على إنتاج الأصباغ فقط. من المعروف أن أكاسيد الحديد تستخدم بشكل شائع في مستحضرات التجميل، وطلاء الفخار، وتقنيات معالجة التربة، ووسائط الترشيح الماصة والطلاءات، وحجز الفوسفات والمعادن، والمواد المضافة للأعلاف

الحيوانية. ومع ذلك، هناك عدة عوامل تلعب دورًا حاسمًا في إنتاج أصباغ أكسيد الحديد النقي مثل إزالة الكاتيونات أو الأنيونات اعتمادًا على الرقم الهيدروجيني للمحلول فيما يتعلق بنقطة الصفر، وعامل التعادل وما إلى ذلك. ولذلك، يمكن توظيف النموذج الاقتصادي المستدام لإعادة الاستخدام الإنتاجي للنفايات كمورد عبر صنع السياسات الاجتماعية والاقتصادية والمكانية.

ويمكن استخدامه كحلقة وصل لتطوير العلاقة التكافلية حيث يمكن للتصنيع استخدام التآزر الصناعي من خلال التكليف بتصميم صناعي فعال لإنشاء عملية استرداد مواد مربحة اقتصاديًا. تتمتع الهند بموارد كبيرة من خام الحديد. يوجد إجمالي 12317.3 مليون طن من الهيماتيت و5395.2 مليون طن من المغنتيت في البلاد حتى الآن. ومع هذا المورد الطبيعي الكبير، أدت أنشطة التعدين غير الخاضعة للرقابة والتوسع المستمر إلى توليد الكثير من النفايات الملقاة إما في الموقع أو في المناطق القريبة التي تحتوي على معادن لا تزال لها قيمة سوقية. وعلى الرغم من أنها تختلف في تركيباتها الفيزيائية والكيميائية، إلا أن قدرتها على التلوث وإدارة النفايات تختلف أيضًا. يتطلب التخلص من نفايات المناجم المتولدة في كل خطوة من خطوات التشغيل إيرادات، كما أن صيانتها معقدة.

ومن ناحية أخرى، فإن النمط السلوكي للحديد يعتمد على نوعه الأيوني الذي يختلف بشدة فيما يتعلق بدرجة الحموضة وتركيز الكبريتات. في الظروف الحمضية، أي الرقم الهيدروجيني pH <2، يذوب الحديديك في الغالب، ومع زيادة الرقم الهيدروجيني والوصول إلى 4.5، تصبح مجمعات كبريتات المعدن هي المهيمنة لتكوين معقدات مثل الشويرتمانيت (الرقم الهيدروجيني 2.5–4) والتي يتم استبدالها في النهاية بهيدروكسيدات $[Fe(OH)^{2+}]$ ويبدأ بالهيمنة عند درجة حموضة أكبر من 5. عند هذا الرقم الهيدروجيني، يتحلل ويترسب

على شكل فيريهيدريت (الرقم الهيدروجيني< 5). ونتيجة لتكوين أنواع جديدة ومتميزة خلال هذه الفترة، أدى ذلك في نهاية المطاف إلى توليد تصريف منجم حمضي يعمل فيه $Fe^{3+}$ كنظام تخزين مؤقت بالإضافة إلى كاسم طبيعي للعناصر السامة. وتتمثل الآثار الشديدة التي نشأت في الوقت المناسب في فقدان التربة الخصبة، وتآكل التربة، وظهور الملوثات الخطرة في المياه السطحية والجوفية المحيطة. وإذا لم يتم اتخاذ تدابير وقائية، فإن الجريان السطحي من نفايات المناجم يؤثر بشكل كبير على الغطاء النباتي والمصادر الحيوية الأخرى لنظام دعم الحياة.

سنتكلم هنا عن إحدى هذه العمليات التي يتم إجراؤها في المختبر (على سبيل المثال لا الحصر) حيث يتم تحويل النفايات مثل ملاط الحديد (كبريتات هيدروكسي الحديد) إلى أكسيد الحديد النقي وبيعها كمادة خام لصناعات الطلاء. حيث كانت الفكرة وراء هذا العمل البحثي هي تحويل رواسب الحديد غير المستغلة (كبريتات هيدروكسي الحديد) المتكونة في المادة المرتشحة إلى أكاسيد حديد عالية الجودة.

المشكلة الأكثر شيوعًا والتي تواجهها صناعات التعدين هي «كيفية التعامل مع المادة المرتشحة الموجودة في أحواض المخلفات»؟ عادة ما يتم نقل المخلفات في شكل ملاط إلى مرافق التخلص من النفايات، حيث يتم السماح للجسيمات الصلبة بالاستقرار ويتم جمع المادة المرتشحة في بركة مخلفات ثانوية. ومع ذلك، فإن أحواض المخلفات الأولية أو الأولى تكون محملة بالحديد والكبريت ومعادن أخرى، مثل النحاس والنيكل والزنك، بتركيزات عالية نسبيًا. على الرغم من الأساليب العديدة التي تتبعها صناعات التعدين، بسبب الانسكاب أو التسرب من مناطق الحجز (برك المخلفات)، تمكنت هذه المادة المرتشحة بطريقة ما من الدخول إلى النظام البيئي المائي القريب الذي يلوث المسطحات المائية. تعمل

البكتيريا المؤكسدة للحديد أو الكبريت على أكسدة مركبات الحديد والكبريت الموجودة في أيونات البروتونات ($H^+$) المعدنية الكبريتية/الكبريتيدية، والكبريت والمعادن الأخرى التي تخفض درجة الحموضة إلى ما دون 3. وهذا يؤدي في النهاية إلى توليد صرف لمنجم حمضي. ومع مرور الوقت، يؤدي إلى تكوين مادة صلبة صفراء-حمراء تسمى هيدروكسيد الحديد والتي تترسب بسبب تبخر الماء من سطح البرك الحمضية وبالتالي زيادة تركيز أيونات الهيدروجين.

ومع ذلك، داخل الشقوق أو المسام، يصبح الماء المتبقي أكثر حمضية ويبدأ في إذابة معادن كبريتيد معدنية أخرى تساهم بأيونات معدنية إضافية في المحلول. وهي شديدة الحموضة وغالبًا ما تحتوي على معادن غير مقبولة للإنسان والحيوان. إن المخلفات هي النفايات الصلبة الرئيسية المنتجة في عملية إثراء المعادن والتي عادة ما يتم نقلها في شكل ملاط إلى منشأة التخلص، حيث يسمح للجزيئات الصلبة بالاستقرار ويتم جمع المواد المرتشحة في أحواض المخلفات الثانوية. ومع ذلك، فإن هذه الأحواض مملوءة بتركيزات عالية من أيونات الحديد، بالإضافة إلى المعادن الانتقالية الأساسية، مثل الحديد والنحاس والنيكل والزنك، بتركيزات عالية نسبيًا. كما أنها تحتوي في بعض الأحيان أيضًا على معادن ثمينة مثل الذهب والفضة، في بعض المعادن والتي لم يتم عزلها عن طريق التعويم الرغوي. لذلك، سيكون من المفيد أن نقول إن أحواض المخلفات هذه يمكن أن تكون بمثابة مصدر محتمل لاستخراج المعادن الأساسية وستتعامل بالتأكيد مع تكلفة الاستخراج مقارنة بالتكلفة المطلوبة لتعدين أجسام الخام الأولية المدفونة بعمق. أحد أفضل الأمثلة هو منجم كاسيسي للنحاس في أوغندا، حيث تم استخلاص ثاني أكسيد الكربون من خلال عملية الترشيح الحيوي من المخلفات الغنية بالكوبالت عند إغلاق موقع المنجم. وبصرف النظر عن هذا، فإن لها تأثيرًا شديدًا على جودة المياه والصحة والبيئة.

يؤدي تأثير التعدين وما يليه من إلقاء المخلفات الدقيقة في أحواض المخلفات إلى ترشيح المعادن الثقيلة والمحاليل الحمضية على النظام البيئي المائي المحيط. تحدد وكالة حماية البيئة (EPA) الحد الأقصى لمستويات الحديد الصحية بـ 0.3 ملغ / لتر. يتم تصنيف الحديد الموجود في مياه الشرب على أنه ملوث ثانوي وفقًا لوكالة حماية البيئة. يؤدي ارتفاع مستوى الحديد إلى انسداد الأنابيب حيث تتراكم بقايا الحديد بكمية كبيرة وتزيد من المستوى العالي بما يكفي للتسبب في داء ترسب الأصبغة الدموية لدى البشر. ومع ذلك، يمكن أن يؤدي على المدى الطويل إلى تلف الكبد والقلب والبنكرياس، ويزيد من فرص الإصابة بمرض السكري. تشمل الأعراض المبكرة التعب وفقدان الوزن وآلام المفاصل. لذلك، يجب إزالة الحديد قبل استخدامه لأغراض الشرب أو الطهي. ولا يقتصر التأثير السلبي هنا، بل بسبب المحتوى العالي من الحديد في الماء، يتم ملاحظة التأثيرات بشكل جيد في حقول المحاصيل القريبة. تدخل مياه الجريان السطحي من هذه الأحواض المخلفات إلى النظام البيئي المائي وتجعل المياه أكثر صعوبة مما يؤدي إلى بطء النمو وضعف الجودة الجمالية للمحصول وفي بعض الحالات يؤدي إلى الموت التدريجي للنباتات.

يحدث الترسيب العالي للحديد مباشرة على التربة مما يجبرها على امتصاص الكمية الزائدة من الحديد مما يؤدي إلى تشوه الأوراق ونقص المغذيات وانخفاض إنتاجية المحاصيل. فهو يدخل بشكل مباشر أو غير مباشر في السلسلة الغذائية وله آثار خطيرة على الإنسان والحيوان. حوالي 30 % من مساحة الولاية مغطاة بالغابات، مما يوفر سبل العيش لعدد كبير ومتزايد من السكان القبليين. التعدين العشوائي له تأثير جذري على الموائل الحرجية والقبلية. يرتفع الغبار الناعم خلال فصل الصيف وتنقله الرياح السائدة إلى

القرى المجاورة ويترسب على النباتات وجميع الأشياء. إلى جانب الحكة الجلدية وصعوبة التنفس بسبب الغبار، والأمراض الجلدية الأخرى التي تسببها المياه. إلا أن المياه الحمضية انتقلت إلى الأراضي الزراعية والمسطحات المائية في هذه القرى وترسبت فيها. أيضًا، بالنظر إلى سعر السوق وتوافر المعادن والنظر في تأثير سوء الإدارة بسبب التنقيب المتواصل عن المعادن والفلزات، وكم المخلفات المتولدة على أساس منتظم. وبما أن مخلفات المناجم قد تمت معالجتها جزئيًا، فإن استرداد المعادن سيكون اقتصاديًا. ومن حسن الحظ أن هناك العديد من تقنيات معالجة وفصل المعادن المتاحة التي يمكن من خلالها إعادة تدوير المعادن غير المستغلة وبيعها في السوق.

نظرًا لأن وصاية CSIR-NEERI [أي البحث والابتكارات في العلوم والهندسة البيئية إلى جانب حل مجموعة من المشكلات التي تطرحها الصناعة والحكومة والعامة] تتمثل في توفير حلول مبتكرة وفعالة لمختلف القضايا المتعلقة بالبيئة، لذلك، بدأ العمل لاستعادة درجة عالية من $Fe_2O_3$ (أكسيد الحديد الأحمر النقي) من أحواض مخلفات خام الحديد وبيعها كمواد خام في إنتاج خطوط أخرى حيث يمكن لصناعة التعدين تعويض تكلفة المعالجة.

بعد التجارب الناجحة على نطاق المختبر، تم تطوير مخطط تدفق مفاهيمي لمعالجة أحواض مخلفات خام الحديد. وكبديهية لـ 3R (إعادة الاستخدام والتقليل وإعادة التدوير Reuse, Reduce & Recycle)، يجب على جميع أصحاب المصلحة بما في ذلك الحكومات وأصحاب صناعات التعدين والقطاع الخاص أن يجتمعوا معًا من أجل استكشاف واستخراج واستعادة الثروة غير المستغلة حتى الآن والتي تظل سليمة تحت الأرض. عند درجة حموضة منخفضة جدًا (1.5>)، توجد شوارد الحديد $Fe^{3+}$ على شكل أيون أرجواني سداسي الماء $[Fe(H_2O_6]^{3+}$.

يتضمن التحلل المائي الإزالة التدريجية للبروتونات من جزيئات الماء الستة التي تحيط بكاتيون الحديد المركزي لتكوين أحادي وثنائي النواة ثم تترسب أخيرًا في منتج بلوري، تعتمد طبيعته على معدل وظروف التفاعل.

بناءً على المفهوم الأساسي، بدأ العمل في مركز NEERI-Delhi Zonal على نطاق مختبري لتحويل كبريتات هيدروكسي الحديد إلى أصباغ أكسيد الحديد (الهيماتيت) بحيث تتمكن الصناعة من تعويض تكلفة العملية وفي نفس الوقت تقليل النفايات. تم استرداد 98 % من الهيماتيت النقي مما يدل على وجود مؤشر إيجابي لتوسيع نطاق العملية على مستوى المصنع التجريبي. إن فكرة إدخال مصطلح «الاقتصاد المستدام» في هذه الحالة ستكون أفضل طريقة لإعادة استخدام أو إعادة تدوير أو استعادة كل جزء من تلك المعادن التي لا تزال غير مرغوب فيها كنفايات. أيضًا، كما يقول مصطلح الاقتصاد المستدام «القضاء على الهدر والاستخدام المستمر للموارد»، فإن تنفيذه يستحق النظر فيه.

التعدين كصناعة يخلق الكثير من النفايات - من الصخور والانبعاثات إلى حمأة معالجة المياه ومياه المناجم - وهذا أيضًا يمكن إعادة استخدامه، إما داخل سلسلة الإنتاج أو إعادة استخدامه في مكان آخر. أحد الأمثلة على ذلك هو إعادة استخدام كبريتات الحديد والهيدروكسي الموجودة بكميات كبيرة في أحواض المخلفات بسبب العديد من أنشطة التصنيع والتي يمكن تحويلها إلى الهيماتيت (أكاسيد الحديد). لا تقتصر عمليات إعادة الاستخدام المحتملة لأكاسيد الحديد على إنتاج الأصباغ فقط. من المعروف أن أكاسيد الحديد تستخدم بشكل شائع في مستحضرات التجميل، والأدوية، والطلاء، والمواد الكيميائية، والسيراميك، والمطاط، وطلاء الفخار، وتقنيات معالجة التربة، ووسائط الترشيح الماصة والطلاءات، واحتباس الفوسفات والمعادن، ومضافات الأعلاف الحيوانية.

ولذلك، سعيًا وراء المزايا وتطبيقاتها الواسعة، تم تطوير نموذج اقتصادي للمناطق الريفية المتضررة من الحديد لاستعادة منتج ذي قيمة تجارية من أجل سبل العيش المستدامة. تُفضل الأصباغ الاصطناعية على نطاق واسع على الأصباغ الطبيعية، نظرًا لجودتها الممتازة ومستوى نقائها، والذي يمثل أكبر حصة من سوق أصباغ أكاسيد الحديد العالمية في عام 2014. ويعتمد سعر أصباغ أكاسيد الحديد على النوع واللون والمستخدم النهائي. من خلال هذه العملية، يمكن تصنيع أصباغ أكاسيد الحديد عالية الجودة والتي يمكن استخدامها كمواد خام في خطوط إنتاج أخرى. تعتبر سهولة التشغيل ومساحة أقل واستهلاك أقل للطاقة وإعادة التدوير والتقليل وإعادة الاستخدام من بين الميزات الرئيسية. تم تصميم هذه العملية لتحفيز مهارات السكان المحليين لتعزيز سبل عيشهم. مع اختلاف طفيف في ظروف التشغيل، يمكن تصنيع أنواع مختلفة (الجيوثيت أو الهيماتيت أو المغنتيت) والألوان (الأحمر والأخضر والأسود) من أكاسيد الحديد الاصطناعية وطرحها في السوق.

وبالنظر إلى ارتفاع الطلب وسعر المنتج (الهيماتيت)، فإن هذه العملية يمكن أن تدفع صناعة التعدين إلى إنشاء مصنع تجريبي حيث يمكنها استرداد المنتج وبيعه في السوق. تجدر الإشارة إلى أنه، في دراسات علمية سابقة، تم الحصول على 99.9 % من أكاسيد الحديد الأحمر النقي من سوائل الفحم، مما يوضح إمكانية كبيرة للعملية من أجل عملية واسعة النطاق. بالإضافة إلى ذلك، يمكن تحقيق التقدم في هذا الصدد من خلال طلاء المنتج (صبغة الهيماتيت) بمشتقات السيلان.

وهذا سيفتح بالتأكيد دراسة في المستقبل القريب. وقد لوحظ أنه من بين المستخدمين النهائيين، من المتوقع أن ينمو قطاع الطلاء بأعلى معدل نمو سنوي مركب. لذلك، سيكون من الأفضل البحث عن صناعة الطلاء حيث يمكن استخدام الصبغة لجعل الجزيئات أكثر استقرارًا وتساعد على سلامتها

في البوليمر والمواد الأخرى. استنادًا إلى نتائج البحث العلمي وبعد تقدير سعر السوق لمنتج (أكسيد الحديد ألفا)، جرت محاولة لحساب تكلفة المعالجة والصيانة لمعالجة 10000 لتر من سائل الترشيح في المناجم على نطاق مصنع تجريبي لمدة 3 السنوات. وقد لوحظ أنه سيتم استرداد تكاليف المعالجة والصيانة من سعر بيع الهيماتيت في السنة الأولى من التشغيل. وسيبدأ الاستثمار على العائد من السنة الثانية فصاعدًا. وهذا يدل على الجدوى الاقتصادية لهذه العملية. لذلك، ومن خلال تطبيق مفهوم الاقتصاد المستدام، يمكن معالجة هذه الأنواع من نفايات المناجم بشكل أكبر باستخدام التقنية المناسبة للحصول على منتج يمكن بيعه كمواد خام في خطوط إنتاج أخرى. ويمكن إنشاء آلية تقاسم محتملة بين المستفيدين، أي الصناعة والمشترين والحكومة والمجتمع، من خلال توفير حلول كاملة والوعي الاجتماعي والدعم الحكومي من خلال حزمة العرض التوضيحي/التدريب (Singh, S. & L.B. Sukla, S.K. Goyal, 2020).

## الاقتصاد الدائري Circular Economy

تشير النظرية الاقتصادية إلى محدودية الموارد وندرتها النسبية، فبحلول عام 2050م سيكون هناك نحو 9.7 مليارات شخص يعيشون على الأرض، وهذا يتطلب تقنين استخدام الموارد البيئية، لذا فهناك حاجة ماسة إلى نماذج اقتصادية جديدة تقلل من استنفاد قاعدة الموارد الطبيعية وتدهور الأنظمة البيئية. ومن هذه النماذج الاقتصاد الدائري الذي يندرج في إطار التنمية المستدامة، للحد من الهدر القائم على تصنيع المنتجات من المواد الخام وبيعها واستخدامها ثم التخلص منها برميها أو حرقها، مما يشكل خطراً على البيئة ونضوب الموارد؛ ويعتمد على إدراج البيئة داخل الصناعة وإعادة تصميم أنظمة التصنيع؛ كإعادة التدوير ومراعاة الأبعاد البيئية للعمليات الصناعية والتكامل الصناعي. كان النهج الطبيعي للإنتاج والاستهلاك على مدى عقود كالتالي: «خذ، اصنع، استخدم، تخلص». حيث تأخذ الشركات المواد الخام وتحولها إلى منتجات، يتم شراؤها من قبل المستهلكين، الذين يرمونها في النهاية، مما ينتج عنها نفايات. ولكن مع تزايد التحذيرات حول تغير المناخ والتدهور البيئي، بدأ الناس في تحدي استدامة هذا النموذج. يزعم العديد من قادة الأعمال وخبراء التعدين بما في ذلك الصين واليابان والمملكة المتحدة أنه يتعين علينا التخلي عن الاقتصاد الخطي Linear Economy لصالح ما يسمى بالاقتصاد الدائري المتمثل في الاستغلال والتصنيع والاستخدام وإعادة الاستخدام مرارًا وتكرارًا.

**الاقتصاد الدائري** عبارة عن نموذج اقتصادي يستهدف تقليل الهدر من المواد والسلع والطاقة والاستفادة منها قدر الإمكان، بحيث يتم خفض الاستهلاك والنفايات والانبعاثات، وذلك عن طريق تبسيط العمليات وسلاسل الإمداد. يسهم الاقتصاد الدائري أيضاً في تعظيم الاستفادة من جميع المواد الخام والمعادن والطاقة والموارد بمختلف صورها، فضلاً على إطلاق عمليات

إعادة التدوير والاستخدام وإعادة التصنيع والتطوير، بدلاً من نمط الهدر وإلقاء النفايات. يعيد الاقتصاد الدائري بوجه عام تطوير الأنظمة الصحية والاستهلاكية والتعريف بقيمة الأشياء وأهمية الاستخدام الفعال وتقليل الآثار السلبية الناجمة عن الأنماط الاقتصادية التقليدية، كما أنه يسهم في خلق فرص اقتصادية واستثمارية أفضل للشركات والمؤسسات، فضلاً على المزايا البيئية والاجتماعية.

لا يعد الاقتصاد الدائري مصطلحاً وليد السنوات الأخيرة، بل إنه يضرب بجذوره في العالم منذ عقود عند ابتكار مفهوم التدوير وإعادة الاستخدام، وظهر بشكل واضح في الدول الصناعية بعد الحرب العالمية الثانية عندما حاولت حكومات استغلال التقنية والآلة في إعادة التصنيع. يقدم الاقتصاد الدائري نموذج اقتصاديا جديدا يهتم بتغيير كل أساليب الإنتاج وأنماط الاستهلاك غير المستدامة بحيث يهدف إلى الاستغلال الأمثل للثروات المعدنية والتنمية المستدامة لصناعة التعدين وحفظ قيمة المنتجات والمواد والموارد في الاقتصاد لأطول فترة ممكنة من عمر الاستخدام وتقليل النفايات بشكل كبير ويساهم في تعزيز الكفاءة وخفض استهلاك الطاقة الكهربائية وانبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون.

المعادن والخامات هي اللبنات الأساسية لمستقبل صافي الصفر. ولا يوجد اقتصاد دائري بدون هذه المواد. ولكن لكي تعتبر مساهمتها دائرية حقًا، نحتاج إلى التركيز على كيفية إنتاجها وكيفية استخدامها. إلى جانب الجهود المبذولة لمنع تحول المعادن إلى نفايات في نهاية عمر المنتج، تحتاج الصناعة إلى التأكد من استخراج هذه المواد وإدارتها بالطريقة الصحيحة، حتى نتمكن من تسهيل الانتقال العادل إلى الاقتصاد الدائري الذي لم يتم بناؤه عليه. على حساب الدول والمناطق المنتجة.

يؤدي النمو السكاني والتقدم الاجتماعي والتوجه نحو تقنيات الطاقة النظيفة إلى زيادة الطلب على المعادن والفلزات. بحلول عام 2040، تشير التقديرات إلى أنه قد تكون هناك زيادة بمقدار 20 ضعفًا في الطلب على النيكل والكوبالت لتلبية احتياجات عالم مكهرب بشكل متزايد، ومن المتوقع أن يتضاعف إجمالي الطلب على النحاس من عام 2020 إلى عام 2050. ومن أجل تلبية هذا الطلب نحن بحاجة إلى تبني اقتصاد دائري يتضمن زيادة إنتاجية المواد، والقضاء على النفايات وتجديد الطبيعة. ترتبط العملية والمنتج معًا. لكي تكون المواد دائرية حقًا، يجب أن تكون طريقة إنتاجها واستخدامها دائرية. وفي حالة التعدين، يعني هذا وجود عمليات لها مساهمة إيجابية صافية في البيئة والمجتمع، والعمل مع سلسلة توريد المعادن الأوسع لتشجيع الاستخدام المسؤول للمعادن واستردادها بعد دخولها الأسواق.

الدائرية ليست جديدة في صناعة التعدين والمعادن. لقد قامت صناعة التعدين بدمج المبادئ الدائرية على مستوى الموقع لسنوات عديدة، جزئيًا لتقليل الآثار السلبية للاستخراج ولكن أيضًا لأنها منطقية من الناحية التجارية. إن تقليل النفايات والمخلفات، وتحسين استخدام المياه، وتجديد مواقع المناجم المغلقة، وإعادة تدوير النفايات الأخرى مثل الإطارات، والتركيز على الكفاءة، هو بالفعل في قلب الإستراتيجية في الصناعة. ولكن لكي نصبح دائريًا حقًا، يجب علينا أن نبتكر. من خلال النظر إلى كل من العملية وتدوير المنتج جنبًا إلى جنب - يمكن للمناجم تقديم قيمة للمجتمعات والطبيعة على مستوى الموقع، في حين تصبح المواد التي تنتجها موارد يمكن استخدامها مرارًا وتكرارًا.

مراحل إجراءات ونواتج المعادن والتعدين في الاقتصاد الدائري

يتطلع عملاء اليوم بشكل متزايد إلى شراء المنتجات كخدمة، متى وأينما يريدونها. وهذا يغير العلاقة بين ملكية المواد ومستوى المعيشة. أصبح المواطنون في أجزاء كثيرة من العالم أكثر وعيًا وقلقًا متزايدًا بشأن العواقب الصحية للتلوث، والمخاطر الناجمة عن الانسكابات وفشل مرافق مخلفات المناجم. وهذا يؤدي إلى فرض قيود تنظيمية على صناعة التعدين، ويحفز الاستثمار في إعادة التدوير والموارد المتجددة. يطالب العديد من المستهلكين، وخاصة في أوروبا، الآن بمزيد من الشفافية بشأن الأداء البيئي للمنتجات، ويتم الإبلاغ عن ذلك من خلال مخطط العلامة البيئية للاتحاد الأوروبي. هناك أيضًا زخم نحو الاقتصاد الدائري من خلال إدارة المنتجات ومسؤولية المنتج الموسعة، مما يضع المسؤولية على عاتق الشركات المصنعة لمراعاة وتقليل التأثيرات على السلامة والبيئة من منتجاتهم.

## • الاقتصاد الدائري أم الاقتصاد الخطي ؟

الاقتصاد الخطي هو نظام غير فعال ومكلف ويستهلك المواد الطبيعية. فالأنشطة التعدينية في الذهب والفحم يمكنها تدمير النظام البيئي بأكمله للمناطق المحيطة بالمناجم. ويتطلب تصنيع الفولاذ من خام الحديد كميات كبيرة من الطاقة التي ينتج عنها غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يتسبب في زيادة درجات الحرارة على سطح الأرض. المنتج الثانوي في إطار النموذج الخطي للاقتصاد هو النفايات الناتجة عن عملية التصنيع والتي تحتاج الى مساحات للتخلص منها وقد تحتوي على ملوثات للبيئة. وتنتهي تلك النفايات في أماكن غير مرغوب فيها. فعلى سبيل المثال، ما يسمى بـ «رقعة نفايات المحيط الهادئ العظيمة» هي أكثر الأمثلة المعروفة عالمياً للتلوث البلاستيكي. في نهاية المطاف، سيفرض الاقتصاد الدائري تكاليف وضغوطًا استهلاكية على المناجم التي تولد الكثير من النفايات والأثر البيئي. سيؤدي هذا إلى إجراء تغييرات على الصناعة التي تتجه حاليًا إلى المزيد من الهدر والتأثير. وينبغي لها أن تجعل

عمال المناجم يراجعون العلاقات مع عملاء الصهر والتكرير والتصنيع، ويعيدون النظر في حالة مستوى معين من التكامل الرأسي في التكرير وإعادة التدوير. ينبغي لصناعة التعدين، والمهنيين العاملين فيها، بناء وعيهم بالمكان المناسب لهم في اقتصاد المواد، وقدرتهم على تشكيل إمدادات واستخدام أكثر استدامة للمواد. إن التميز في العلوم المعدنية والكيميائية هو شرط مسبق لنجاح الاقتصاد الدائري. أصبحت الاستدامة بسرعة هي القاعدة للشركات والصناعات. إن أيام الاقتصادات الخطية تقترب من نهايتها؛ يتم التخلص التدريجي من طريقة الاستهلاك الأخذ والاستخدام والتخلص لصالح أساليب أكثر استدامة. صناعة التعدين ليست استثناء. وهي أيضًا تتطور وبدأت في استخدام أساليب الاستهلاك الدائرية من خلال الممارسات التجارية التصالحية والتجديدية. إن التعميم هو أكثر من مجرد إعادة تدوير وإعادة استخدام مواد النفايات

## الاقتصاد الدائري

## الاقتصاد الخطي

سيؤدي الفشل في تبني الاقتصاد الدائري إلى تعريض شركات التعدين لخطر التخلف عن الممارسات التجارية المبتكرة. وتحتاج المناجم إلى البحث عن طرق لإعادة استخدام نفاياتها لصالح العمليات التجارية الأخرى. ومن خلال إعادة إدخال النفايات إلى مجمع الموارد، يمكن للمناجم أن تقلل من تكاليف إدارة النفايات وتوفر المال الذي تنفقه على الوقود والمدخلات الأخرى. يمكن استخدام النفايات كمصدر وفير للطاقة لإنتاج الكهرباء وإشعال الأفران. وقد ركزت العديد من نماذج الاقتصاد الدائري في قطاع التعدين حتى الآن على إعادة تدوير المياه، واستخراج القيمة من المنتجات الثانوية وإعادة استخدام النفايات، مثل الإطارات القديمة لأغراض عديدة.

ليست جميع شركات التعدين في وضع جيد يسمح لها بتحقيق الدخل من مصادر النفايات هذه والاستفادة من مبادرات إعادة التدوير. تحتاج هذه الشركات إلى التفكير بشكل جانبي والتكيف قبل أن تتخلف عن الركب في هذا العالم المتغير. إن اتخاذ الخطوات الأولى نحو الاقتصاد الدائري اليوم سيساعد شركات التعدين على وضع نفسها بشكل أفضل لتحقيق النجاح في المستقبل. وسوف يسمح لهم ببناء القدرة على الصمود على المدى الطويل وتوليد الدخل من موارد النفايات. ستمكن الفوائد البيئية والاجتماعية للاقتصاد الدائري أيضًا المناجم من الوصول إلى الأعمال في المستقبل. يعد العمود الفقري الرقمي إلى جانب تكثيف العمليات التجارية، وربط الأجهزة، وإنتاج البيانات الضخمة، وربط العالم، وزيادة الابتكار والأرباح، خطوة حيوية نحو تنفيذ استراتيجية الاقتصاد الدائري. العالم يتغير بسرعة. ومع تقدمنا في الابتكارات المثيرة والتقنيات الجديدة في المستقبل، من ناحية أخرى، يستمر المناخ في التدهور مع زيادة البصمة الكربونية الناتجة عن المصانع.

هناك خيط متشابك بين مفهومي الرقمنة Digitalization والاقتصاد الدائري. ومن خلال الانتقال من نظرية الاقتصاد الخطي إلى نظرية الاقتصاد الدائري مع اعتماد الرقمنة، يمكننا تحسين مجتمعنا واقتصادنا وبيئتنا. في الاقتصاد الخطي، ببساطة، نستخدم المواد الخام التي تتم معالجتها ويتم التخلص منها بعد الاستخدام. وبالتالي فإن الدورة في الاقتصاد الخطي مفتوحة النهاية. يتم ترك جميع مواد

الإدخال أو المعالجة أو الإخراج لتخرج من الدورة نظرًا لعدم إغلاق الحلقة. تدور نظرية الاقتصاد الدائري، في جوهرها، حول إغلاق الدورة بحيث تظل جميع المواد المستخدمة في الإدخال أو المعالجة داخل الدائرة. في الأساس، يختلف الاقتصاد الدائري عن الاقتصاد الخطي في طريقة إنشاء القيمة أو الحفاظ عليها. يتبع الاقتصاد الخطي خطة خذ وصنع وتخلص التقليدية خطوة بخطوة. عندما تستخدم الصناعات المواد الخام لإنشاء منتج، فإنها تتخلص منها بعد استخدامها بالكامل. وهذا يعني أن القيمة يتم إنشاؤها في نظام اقتصادي خطي من خلال إنتاج وبيع أكبر عدد ممكن من المنتجات. من ناحية أخرى، يستخدم الاقتصاد الدائري نهج : تقليل - إعادة الاستخدام- إعادة التدوير. في مثل هذا النظام، يتم إنشاء القيمة من خلال التركيز على الحفظ. يتم تقليل الموارد المستخدمة أو تقليلها. يتم تعظيم إعادة استخدام الأجزاء والمنتجات، ويتم إعادة استخدام المواد الخام بمستوى أعلى.

من الخطأ أن نقول إننا في الاقتصاد الخطي، لا نركز على الاستدامة. الفرق الحقيقي هو في منظور ذلك. تركز الاستدامة في الاقتصاد الخطي على الكفاءة البيئية؛ أي أنه يتم تقليل التأثير البيئي الأقصى للحصول على نفس الناتج. ومع ذلك، في الاقتصاد الدائري، تدور الاستدامة حول زيادة الفعالية البيئية للنظام بأكمله. في مثل هذا النموذج، لا يتم تقليل التأثير البيئي فحسب، بل يتم أيضًا تقليل التأثير الاقتصادي والاجتماعي. ومن المتوقع أنه بحلول عام 2030م، لن يُسمح لسلاسل التوريد بإنتاج النفايات، حيث سيجد العملاء والعديد من الحكومات ذلك غير مقبول. ومع ذلك، فمن الواقعي أن نتوقع أنه خلال ثلاثينيات القرن الحادي والعشرين، لن يكون الاقتصاد الدائري هو الاقتصاد السائد فحسب، بل سيكون أيضًا الاقتصاد الوحيد. بحلول ذلك الوقت، فإن هدف صافي الانبعاثات الصفرية قد تحقق وفقًا لاتفاقية باريس مع إطلاق مبادرات متعددة لدفع العمل. فمن خفض الانبعاثات بنسبة 30 % إلى استخدام التقنية إلى خلق الفرص التي تقلل من النفايات، سيكون هناك اقتصاد دائري عالمي أصبح شفافا عن عمد. وسيكون الشعار الجديد هو سلاسل التوريد الدائرية الأكثر أخلاقية واستدامة.

# الاقتصاد الدائري وسلاسل القيم

تميز سلسلة قيمة التعدين بأنها عملية خطية تولد كميات كبيرة من النفايات. كل تيار من النفايات على طول سلسلة القيمة المعدنية له مجموعة خاصة به من القضايا البيئية. في العديد من الحالات، يكون مسار النفايات الأكثر تحديًا (وضخامة) ضمن سلسلة توريد المعادن هو المنبع (أي نفايات التعدين). نظرًا للدرجات المنخفضة بشكل كبير لمعظم المعادن والفلزات المستخرجة، يمكن أن تمثل المخلفات ما يصل إلى 99 % من الخامات المسحوقة والأرضية. بالإضافة إلى ذلك، هناك أيضًا تدفق خفي غير محسوب للنفايات الصخرية والأعباء الزائدة. خمسة نماذج أعمال يجب على الشركات مراعاتها عبر سلسلة القيمة الخاصة بها: سلسلة التوريد الدائرية؛ الاسترداد وإعادة التدوير؛ تمديد عمر المنتج؛ منصات المشاركة؛ والمنتج كخدمة. وسيؤثر ذلك على كيفية حصول عمال المناجم على المواد والطاقة، وتحسين بصمتهم التشغيلية، وجعلهم يفكرون في مكان اللعب في سلسلة القيمة وكيفية الشراكة مع العملاء.

يعيد الاقتصاد الدائري هيكلة سلاسل القيمة بأكملها، حيث يتم تصميم النفايات ولا يتم التخلص من المنتجات، بل يتم إعادتها مرة أخرى إلى تدفقات المواد. تعد التدوير عبر الصناعات محركًا لفرص جديدة من خلال نماذج الأعمال الجديدة الثورية حيث يتحول مفهوم النفايات إلى مفهوم القيمة. يجب أن يتم الانتقال إلى المزيد من تدفقات المواد الدائرية في التعدين والمعادن. تتمتع صناعة التعدين والمعادن بالعديد من الفرص لزيادة كفاءة الموارد. على سبيل المثال، لم يتم بعد تحقيق الإمكانية الكاملة للنفايات كمواد خام. تشتمل نفايات المناجم عادةً على الصخور والحمأة والمخلفات ومياه الصرف الصحي وغيرها من المنتجات الثانوية، اعتمادًا على نوع طريقة التعدين ونوع الخام والإعداد الجيولوجي وتقنيات المعالجة. الهدف هو تثمين ما يعتبر اليوم إلى حد كبير بمثابة إهدار للموارد التي يمكن استخدامها بشكل أكبر في العملية

أو في الاستخدامات والمنتجات النهائية الجديدة. وهذه ليست طريقة لتحسين الاستخدام الفعال للموارد الطبيعية فحسب، بل هي وسيلة لتحسين الأداء العام لقطاع التعدين. إن زيادة كفاءة المواد وتطوير استخدامات نهائية جديدة للمنتجات الثانوية، فضلاً عن السعي إلى التخلص من النفايات وتحسين إمكانية إعادة تدوير المواد الخام والمنتجات الثانوية، أمر بالغ الأهمية للتحول إلى حلول الاقتصاد الدائري. ومع تلاشي الحدود التقليدية للصناعات، يعمل الاقتصاد الدائري أيضًا على تغذية نماذج أعمال وشراكات جديدة لهذه الصناعة.

التعدين يعتمد بطبيعته على استخدام الموارد الطبيعية المحدودة، فكيف يمكن أن يصبح أكثر استدامة؟ تكمن الإجابة في كيفية إعادة استخدام الصناعة لهذه الموارد، وإعادة استخدام نفاياتها وخفض الانبعاثات من خلال مصادر طاقة أكثر خضرة. ومع ذلك، فإن تحقيق الاقتصاد الدائري يتطلب من قطاع التعدين إعادة هندسة قيمته وسلاسل التوريد للحفاظ على موارده قيد الاستخدام لفترة أطول. أطول فترة ممكنة. يمكن إعادة استخدام المنتجات التي وصلت إلى نهاية عمرها الافتراضي وإعادتها إلى المراحل الأولى من نموذج الاقتصاد الدائري من أجل تعزيز الاقتصاد والاحتفاظ بالقيمة المتأصلة للنفايات.

## • الاقتصاد الدائري والاستدامة الكاملة

تمثل التنمية المستدامة تحديًا موثقًا جيدًا لكوكب الأرض في السنوات التي تسبق عام 2050م، وما بعده. تشير التقديرات إلى أنه من الآن وحتى عام 2050م، سوف ينمو عدد سكان العالم من ما يزيد قليلاً عن 7 مليار نسمة إلى 9.6 مليار نسمة، إلى جانب المزيد من النمو في نصيب الفرد من الاستهلاك. وسوف يحدث الجزء الأكبر من هذا النمو في أفريقيا وآسيا، حيث سيؤدي الطلب على تحسين نوعية الحياة إلى زيادة الحاجة إلى الوصول إلى السلع

والخدمات يتحدى الاقتصاد الدائري صناعة التعدين لتحسين الاستدامة من خلال الاستفادة من نفايات التعدين وتوليد القيمة منها، أو إتاحتها كمواد خام يمكن للصناعات الأخرى الاستفادة منها. يواجه التعدين محنة عندما يتم فحصه من خلال عدسة الاستدامة أو التنمية المستدامة. إن الاستدامة الحقيقية للموارد المعدنية هي صورة معقدة تتضمن الاستكشاف والتقنية والاقتصاد والقضايا الاجتماعية والبيئية وتطوير المعرفة العلمية. تمثل الاستدامة تحديًا كبيرًا للتعدين الذي يجب الاسترشاد به في استخراج المعادن ومعالجتها، وفي إدارة عواملها الخارجية، لحماية الناس والبيئة كموارد رئيسية في التنمية المستدامة. تحتاج شركات المعادن والتعدين إلى تبني منظور جديد حول ما يعنيه خلق القيمة، أو بشكل أكثر دقة، القيمة المشتركة.

إن النجاح في الاستدامة يعني النظر إلى ما هو أبعد من منظور الاستنزاف المادي وارتفاع التكاليف أو الظلم الاجتماعي. كما تولي الرؤية المتكاملة اهتمامًا خاصًا للدور الذي ستلعبه الإستراتيجية والتقنية والسياسات والتفضيلات ومختلف أصحاب المصلحة في توفر الموارد الأولية والثانوية في المستقبل. سيكون التوجه نحو استهلاك أكثر استدامة هو الموضوع السائد في عالم أكثر استدامة. سوف تستمر الموارد لفترة أطول بينما تؤدي زيادة إعادة الاستخدام وإعادة التدوير إلى اقتصاد أكثر دائرية. من المحتمل حدوث تحرك قوي نحو إعادة التدوير والتدوير، ولكن هناك حاجة إلى تغييرات جوهرية لدعم هذا التحول، بما في ذلك البنية التحتية المناسبة والتنظيم والتشريعات واقتصاديات التكلفة التنافسية. هناك بعض العناصر الأساسية للاقتصاد الدائري التي تفسر لماذا يعد نموذج الأعمال هذا، جنبًا إلى جنب مع التحول الرقمي، طريقًا ممتازًا نحو الاستدامة الكاملة.

## • ينهي اعتمادنا على الموارد الطبيعية المحدودة

يضمن الاقتصاد الدائري العالمي أن مفهوم النفايات سيصبح عفا عليه الزمن. قبل الثورة الصناعية، لم تكن النفايات موجودة تقريبًا. تم إعادة استخدام المواد وإعادة تدويرها وإصلاحها وتجديدها. ويمنع الاقتصاد الدائري استهلاك الموارد الطبيعية المحدودة من خلال نشر مبادئ واستراتيجيات لتحقيق الأهداف المناخية وزيادة الربحية.

## • تتمحور حول النظام البيئي

تتعاون الشركات التي تستخدم المزايا التنافسية للاقتصاد الدائري مع شركائها في النظام البيئي لإنشاء قيمة مستدامة والتقاطها وتقديمها. بالمقارنة مع النموذج الخطي التقليدي الذي يركز على الشركة، يركز نموذج الأعمال الذي يركز على النظام البيئي على مبيعات المنتجات مقدمًا. وبالتالي، من خلال إطالة عمر المنتجات والأجزاء، تعمل الشركات بشكل فعال على تحسين كفاءة الموارد والمرونة والعلاقة الحميمة مع العملاء لإنشاء مصادر دخل جديدة. يحافظ الاقتصاد الدائري على النظام البيئي في مركز الاهتمام لالتقاط القيمة وخلقها.

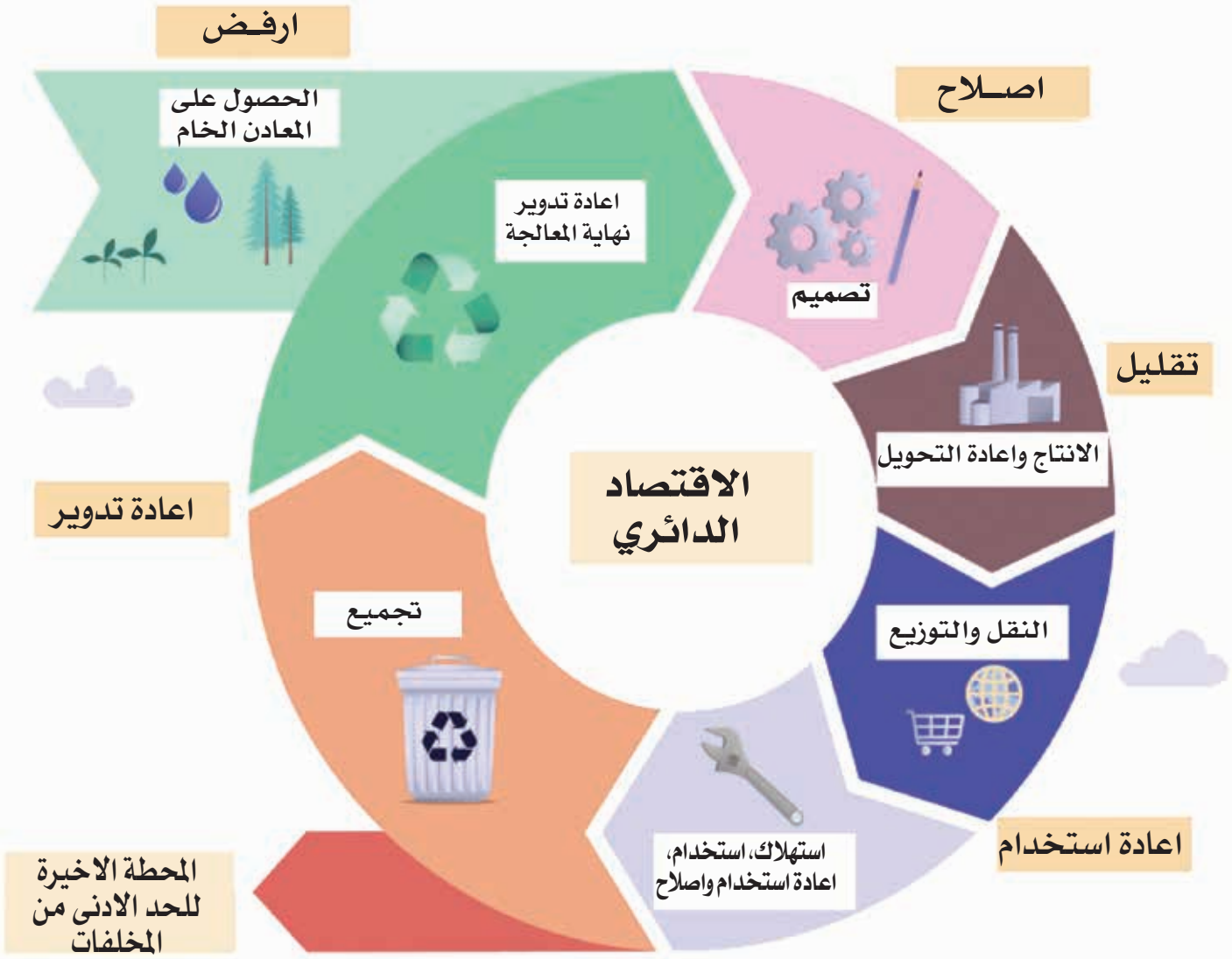
## • يسمح بالعمل الجماعي لخلق قيمة مشتركة

العنصر الرئيسي الأخير في الاقتصاد الدائري هو مساحة العمل الجماعي لخلق قيمة مشتركة، ليس فقط داخليًا داخل المنظمة ولكن مع الجمهور أيضًا. يتضح مما سبق ذكره أهمية الرقمنة, فالنظام البيئي للأعمال الذي يتسم بالكفاءة، وهو نظام يحتوي على حلقة دائرية عندما يتعلق الأمر بالمواد والمعالجة والمخرجات، لا يمكن تشغيله إلا من خلال الرقمنة.

## • الاقتصاد الدائري ومبدأ الـ 3R

اتفق معظم خبراء التعدين على أن المبدأ الذي يجب أن يتبعه الاقتصاد الدائري هو التقليل، إعادة الاستخدام، إعادة التدوير، أو "3R" للاختصار. ينتمي التخفيض إلى أسلوب الإدخال، ويهدف إلى تقليل تدفق المواد والطاقة إلى عملية الإنتاج والاستهلاك. تنتمي إعادة الاستخدام إلى طريقة الإجراء بغرض تمديد كثافة الوقت للمنتج والخدمة. تنتمي إعادة التدوير إلى طريقة الإخراج، حيث تتطلب إعادة المواد إلى الموارد المتجددة بعد الاستفادة منها.

تعد المبادئ الثلاثة لإعادة الاستخدام، التخفيض وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير مفهومًا معروفًا في مجال كفاءة استخدام الموارد، ويساعدنا على إعادة المواد والموارد إلى دورة حياة المنتج، مما يضمن أننا نستخدم طاقة أقل وننتج كميات أقل من النفايات/التلوث والانبعاثات. إن شعار التقليل، إعادة الاستخدام، إعادة التدوير يأخذ معنى جديدا في الاقتصاد الدائري. ومن خلال تقليل النفايات من خلال تقليل الاستهلاك، وتشجيع إعادة استخدام المنتجات والمواد، وتحسين عمليات إعادة التدوير، فإننا نغلق الحلقة المتعلقة بتدفقات الموارد وتقليل التأثير البيئي. ولكن هل مجرد التقليل وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير يكفي؟ هل نحتاج إلى نظرة أكبر وأعمق للبيئة العالمية، وتأثير المناطق الحضرية عليها؟ وتتطلع العديد من البلدان الآن إلى تحويل اقتصاداتها لتصبح أكثر دورية ـ وهو النهج الذي يستلهم مفهوم 3R.


ارفـض
الحصول على المعادن الخام
اصـلاح
تصميم
تقليل
الانتاج واعادة التحويل
النقل والتوزيع
اعادة استخدام
استهلاك، استخدام، اعادة استخدام واصلاح
المحطة الاخيرة للحد الادنى من المخلفات
اعادة تدوير
تجميع
اعادة تدوير
نهاية المعالجة
الاقتصاد الدائري

### وفيما يلي نوضح العلاقات المتبادلة والتكاملية بين الـ 3R

**التخفيض Reduce** : خلال عملية استغلال وتجهيز واستغلال الموارد المعدنية، يظهر التخفيض بشكل رئيسي على النحو التالي:

- تحقيق الاستغلال الفعال للموارد عن طريق الميكنة والأتمتة وتحسين استغلالها .
- تقليل نسبة تخفيف التعدين ونسبة فقدان الخام وتعزيز معدل استرداد معالجة المعادن والصهر لتحسين الاسترداد الإجمالي للموارد من خلال دراسة تقنية معالجة وصهر التعدين للخامات الصعبة والحرارية المعقدة.
- رفع المنفعة الشاملة لتنمية الموارد عن طريق الحد من انبعاثات الملوثات المختلفة مثل النفايات والشوائب ومياه الصرف الصحي في المناجم

**إعادة الاستخدام Reuse** : يمكن إطالة دورة حياة المنتج أو أحد المكونات عن طريق إعادة الاستخدام. ولكي يكون ذلك ممكناً، يجب إعادة تصميم المنتجات من قبل الشركات المصنعة بحيث يمكن استخلاص المكونات لإعادة استخدامها بسهولة وبتكلفة معقولة.

- البناء المعياري هو احتمال آخر.
- المتطلبات الأساسية لكي يعمل هذا بشكل جيد هي توحيد تصميم المكونات ومواصفاتها، والتعاون الوثيق والتعاون على طول سلسلة القيمة بالإضافة إلى الفوائد التجارية لشركات المعادن.
- يمكن أيضًا ضمان إعادة الاستخدام من خلال إعادة التصنيع والتجديد: تفكيك المنتج وتنظيفه وإصلاحه وإعادة تجميعه - وإعادته إلى حالته الجديدة تمامًا.

## إعـادة التدويـــر Recycle :

- تتطلب إعادة التدوير التقليل من خلق النفايات قدر الإمكان من خلال معالجة منتجات الموارد المعدنية التي أكملت وظائفها بحيث تصبح موارد متاحة مرة أخرى ويمكن أن تدخل السوق أو العملية الإنتاجية الثانوية.

- إعادة التدوير النهائية (الخردة القديمة) تقوم باستعادة المعادن من المنتجات التي وصلت إلى نهاية عمرها الافتراضي أو نهاية استخدامها. هناك أربعة متطلبات أساسية لكي تكون عملية إعادة التدوير النهائية مستدامة وفعالة:

- بنى تحتية كافية للتجميع والمعالجة المسبقة.

- ما يكفي من الخردة القديمة المتاحة للعملية (تعتمد الأحجام على عمر المعدن المستخدم حاليًا).

- تكاليف إنتاج تنافسية، حيث أن إعادة التدوير تنافس إنتاج المعادن الأولية.

- إمكانية إعادة التدوير (بما في ذلك إعادة التدوير) أو إعادة الاستخدام في تطبيقات مختلفة (لا يمكن دائمًا إعادة استخدام المواد المعاد تدويرها في تطبيقات عالية الجودة بسبب صناعة السبائك أو الشوائب).

### تتطلب إعادة التدوير ثلاثة أنواع من البنية التحتية:

- جمع ونقل المواد القابلة لإعادة التدوير.

- مرافق الفصل والفرز لعزل المكونات.

- مرافق إعادة المعالجة، مثل المصاهر والتكرير، لتصنيع معادن جديدة من الخردة.

# التعدين والتنمية المستدامة

يمكن أن يعزى التركيز المتزايد على تأثير صناعة المعادن على البيئة والمجتمع، بما في ذلك المجتمع المحلي، إلى الاتجاهات العالمية المرتبطة بالمواقف تجاه المؤسسات الخاصة والشركات الكبيرة المتعددة الجنسيات، وكذلك إلى سجل صناعة المعادن السيئ في القضايا البارزة مثل أزمة بوغانفيل والعديد من الحوادث البيئية الأخرى (على سبيل المثال، أوك تيدي في بابوا غينيا الجديدة، وماركوبر في الفلبين، وبايا ماري في رومانيا).

خلال التسعينات، تعرضت صناعة المعادن لتحديات متزايدة من مختلف الجهات، وكانت النتيجة أنها وجدت نفسها تفقد «رخصتها الاجتماعية للعمل». وقد أصبح هذا المصطلح حاليًا وسيلة شائعة لوصف تأثير المجتمع بشكل عام على قدرة المنظمة على القيام بأنشطتها، بما يتجاوز الترخيص القانوني الصادر عن الحكومات، والذي يحكم استخراج الموارد المعدنية. يتم وصف الترخيص الاجتماعي بشكل مختلف ولكنه يعتبر عادةً عملية موافقة مستمرة من المجتمع يتم منحها في وقت ما، وليس بالضرورة للمستقبل (Accountability, 2004). واستجابة لهذا الضغط المجتمعي المتزايد، كانت هناك العديد من المبادرات المبكرة في بلدان مختلفة حيث سعت هيئات الصناعة المحلية إلى التعامل مع كل من الحكومات ومنتقديها.

ومن الأمثلة على ذلك مبادرة وايت هورس للتعدين في كندا (Cooney, 2008)، وهي مبادرة لأصحاب المصلحة المتعددين تم تطويرها في عام 1994م وتضمنت الصناعة والحكومة والمنظمات غير الحكومية، والتي تهدف إلى تطوير مبادئ عامة للتعدين المسؤول. وفي أستراليا، قام مجلس المعادن الأسترالي بوضع مدونة صناعة المعادن الأسترالية للإدارة البيئية، والتي تم تعديلها في أواخر التسعينات لتشمل متطلبات إضافية تركز على القضايا الاجتماعية والمجتمعية.

تبقى التنمية المستدامة مفهومًا محل خلاف، مع وجود العديد من التعريفات ومجموعات المبادئ المتنافسة، ولكن شعبيتها تعني أن العديد من المنظمات اختارت استخدامها لتأطير أنشطتها الخاصة في المجالات الاجتماعية والبيئية. في عام 1998م، أدى الحوار بين مجموعة صغيرة من كبار المديرين التنفيذيين لصناعة التعدين بما في ذلك هيو مورغان من شركة ويسترن ماينينغ والسير روبرت ويلسون من ريو تينتو إلى تشكيل GMI، وهي عملية تقودها الصناعة وتوسعت لتشمل العديد من أكبر شركات التعدين في العالم. تتكون المبادرة من ثلاثة عناصر: مشروع بحثي مدته ثلاث سنوات لدراسة أنشطة الصناعة من خلال عدسة التنمية المستدامة؛ ومؤتمر كبير عقد في تورونتو عام 2002 لمراجعة نتائج المشروع؛ وإنشاء هيئة صناعية عالمية جديدة، المجلس الدولي للتعدين والمعادن (ICMM)، المكلف بتنفيذ استجابة الصناعة لنتائج المشروع. تمت إدارة المشروع البحثي للتعدين والمعادن والتنمية المستدامة (MMSD) من قبل مجموعة بحثية مستقلة، هي المعهد الدولي للبيئة والتنمية، وأسفر عن تقرير آفاق جديدة صدر في عام 2002م في الوقت المناسب لمؤتمر تورونتو (IIED, 2002م). إن استكشاف النطاق الكامل للقضايا التي يغطيها تقرير MMSD هو خارج نطاق هذا الفصل، ولكن من الجدير بالذكر أن أحد التحديات الرئيسية التسعة التي تم تحديدها والتي يتعين على الصناعة معالجتها كانت منطقة المناجم والمجتمعات.

ليس هناك شك في أن GMI والأبحاث المرتبطة به كانت العملية الأكثر تأثيرًا حتى الوقت الحالي من بين جميع تلك المصممة لدراسة الجوانب الاجتماعية والبيئية لأنشطة صناعة التعدين. في مراجعة التقدم والنتائج لكل من مبادرة وايت هورس للتعدين ومبادرة التعدين العالمية، أشار الباحث كوني (2008م) إلى أن الشركات التي أطلقت المبادرتين كانت مهتمة في المقام الأول بالصورة العامة للتعدين. وكان الانتقاد العام مدفوعًا بمعلومات خاطئة حول التأثيرات

الفعلية للتعدين، ومن شأن تحسين التواصل أن يساعد في معالجة هذه المشكلة. ومع ذلك، فقد اقترح أنه من خلال كل من المبادرات والعمليات اللاحقة مثل مراجعة البنك الدولي للصناعات الاستخراجية: «لقد تعلمت صناعة التعدين مسائل عملية ومضمونية: فمن عملية المشاركة، تعلمت شركات التعدين نماذج مختلفة للحوار الشامل وبناء التوافق في الآراء مع النقاد؛ ومن خلال الاستماع إلى منتقديها، تعلمت الشركات أساليب مختلفة لتحليل وإدارة القضايا الحرجة. لم يكن التعليم الذاتي هو الهدف الأولي لصناعة التعدين سواء في مبادرة وايت هورس للتعدين أو مبادرة التعدين العالمية، ولكنه كان النتيجة». وبالإضافة إلى هذه المبادرات التي تحركها الصناعة، بدأت العديد من مجموعات أصحاب المصلحة الأخرى في إجراء مراجعات ووضعت أطرًا لمراجعة الجوانب البيئية والاجتماعية للمشاريع، بعضها خاص بقطاع الموارد ولكن بعضها الآخر أكثر تركيزًا بشكل عام.

تدفع هذه العوامل غير التنظيمية شركات المعادن إلى التركيز على القضايا الاجتماعية والمجتمعية على المستوى المحلي. وخاصة بالنسبة للشركات المدرجة في البورصة، فإن عملية فحص الاستثمار المسؤول اجتماعيًا أو صناديق الاستثمار الأخلاقية، والمؤشرات الأخرى مثل مؤشر داو جونز للاستدامة، والتقييمات العامة تؤثر أيضا على السلوك. تتطلب معظم هذه المؤشرات ووكالات التصنيف أن تضع المنظمات نهجًا منظمًا لإدارة الأبعاد الاجتماعية لمشاريعها، كما هو الحال مع الجوانب البيئية والاقتصادية. وتشترط العديد من وكالات التمويل، مثل مؤسسة التمويل الدولية (IFC)، هذا أيضًا كشرط للتمويل. وفي ظل غياب التشريع الإلزامي، ساعد الضغط الذي تمارسه أطراف ثالثة على مواصلة الاهتمام بالعلاقات المجتمعية في صناعة التعدين. لقد كان هذا النمو في التنظيم «الناعم» كبيرًا في السنوات العشر الماضية - ومن الأمثلة ذات الصلة والمرجعية في صناعة المعادن ما يأتي:

### • إطار التنمية المستدامة ICMM

عشرة مبادئ وعناصر مختلفة توفر إرشادات حول تطبيق مبادئ التنمية المستدامة على العمليات المعدنية. يعد الإبلاغ وفقًا لهذا الإطار أمرًا إلزاميًا لأعضاء ICMM.

### • نظام عملية كيمبرلي لإصدار الشهادات

مبادرة لأصحاب المصلحة المتعددين تهدف إلى توفير شهادات المنتج للماس والحد من التجارة في «الماس الدموي».

### • مبادرة الشفافية في مجال الصناعات الاستخراجية

مبادرة تطوعية تركز على ضمان شفافية المدفوعات المرتبطة بمشاريع الموارد.

### • مبادئ خط الاستواء

مجموعة من المعايير البيئية والاجتماعية التي طورتها مجموعة من البنوك العالمية الكبرى لمعالجة القضايا البيئية والاجتماعية في تمويل مشاريع التنمية.

### • المعايير البيئية والاجتماعية لمؤسسة التمويل الدولية

إطار معايير وضعته مؤسسة التمويل الدولية لتطبيقه على المشروعات التي تستثمر فيها أموال البنك الدولي. بالإضافة إلى الضغط الناتج عن هذا النوع من التنظيم «الناعم» لتحسين الأداء الاجتماعي والبيئي، أصبحت العديد من الحكومات تشارك بشكل متزايد في تنظيم الجوانب المجتمعية لتطوير وتشغيل وإغلاق المناجم (Brereton, 2002).

تم عقد العديد من المؤتمرات (من 1992م إلى 2015م) قبل وبعد اجتماعات ميلوس، مع موضوعات محددة تدعم وجهة النظر القائلة بأن صناعة التعدين قد أحرزت تقدمًا نحو دمج السمات المختلفة المتعلقة بالتنمية المستدامة، والتزامها

بأهداف التنمية المستدامة:

- إرساء "الركائز الثلاث" للتنمية المستدامة: الاقتصادية والبيئية والاجتماعية.
- نشر "فتح آفاق جديدة: التعدين والمعادن والتنمية المستدامة". ناقشت هذه الوثيقة قضية التنمية المستدامة والتعدين بشكل مطول، وقدمت جدول أعمال للإجراءات الفورية والمستقبلية التي تتخذها صناعة المعادن.
- وضع "خطة التنفيذ" المكونة من 10 فصول، ووضع معايير لقياس النتائج.
- إبراز مؤشرات الاستدامة وتقييم البيانات وإعداد التقارير وتقييم دورة الحياة وإدارة المنتج.
- التركيز على قضايا المقارنة المرجعية، وإنشاء قيمة التنمية المستدامة، وتفعيل التنمية المستدامة، وإنشاء مراكز المعرفة، والنمذجة، والقضايا المالية، وأفضل الممارسات والأدوات.
- تقديم الأطر والأدوات اللازمة لدمج اعتبارات التنمية المستدامة في تصميم المناجم والمصانع.
- جذب المهنيين الشباب، لأنهم أكثر قابلية لقبول أهداف التنمية المستدامة.
- دمج الاستدامة في العملية التعليمية، وتطوير ومراقبة وتقييم معايير التنمية المستدامة للعمليات المعدنية.
- دمج الاقتصاد والمجتمع والبيئة والحوكمة.

من الواضح أن عملية تعدين مورد محدود ليست نشاطًا مستدامًا. ولكن ينبغي أن يؤخذ في الاعتبار أن معظم المجتمعات التي يتم فيها التعدين تعتمد إلى حد كبير على عمليات التعدين. تستخدم جميع الأنشطة الصناعية والعديد

من الأنشطة الشخصية المعادن المستخرجة لمجموعة متنوعة من التطبيقات و/ أو إنتاج الطاقة. وبالتالي فإن التعدين له تأثير إيجابي كبير على المجتمع على الرغم من عواقبه الضارة المتصورة. قامت شركات التعدين المعاصرة بدمج التنمية المستدامة في استراتيجياتها الإدارية طويلة المدى. إن تطوير إجراءات وعمليات جديدة، واستخدام مواد جديدة للتصنيع، وزيادة التركيز على إعادة التدوير، واستصلاح عمليات التعدين القديمة والحالية، وتنظيف تصريفات المياه، وتحسين جودة الهواء، وإيلاء اهتمام أكبر للصحة والسلامة، يترك الأجيال القادمة في حالة من الفوضى.

تعتبر أنشطة التعدين في البلدان النامية تقليديا شكلا من أشكال الجيوب الاقتصادية، مع روابط محدودة بالاقتصاد المحلي. يتحدى هذا العمود هذا الرأي من خلال القول بأن أنشطة التعدين يتم تنظيمها بشكل متزايد كسلاسل قيمة عالمية (GVCs). علاوة على ذلك، فإن التطورات في العلوم والتقنية تفتح فرصاً جديدة للموردين المبتكرين في البلدان النامية. ومع ذلك، فإن الشكل الهرمي للحوكمة السائد في سلاسل القيمة العالمية للتعدين غالباً ما يعيق عمليات التعلم والابتكار المطلوبة لدى مورديها. ونادرا ما تقيم شركات التعدين روابط رسمية طويلة الأجل مع الموردين المحليين وتنخرط في الابتكار التعاوني: فمن خلال تفضيل الشركات القائمة على الموردين الجدد، فإنها تفوت فرصا كبيرة.

## سلاسل قيم المعادن Minerals Value Chains

لم تعد أنشطة التعدين منظمة كشركات ضخمة متكاملة رأسياً، حيث ظهرت سلاسل القيمة العالمية كشكل مهيمن من التنظيم في هذا القطاع. إن الاتجاه نحو التركيز على الأنشطة الأساسية، مع الاستعانة بمصادر خارجية والتعاقد من الباطن مع العديد من الأنشطة الأخرى، بدأ يظهر على السطح. وتواجه شركات التعدين الحاجة إلى احتواء التكاليف، وأصبحت أنشطتها أكثر كثافة في المعرفة. وهم يبحثون بشكل متزايد عن حلول مبتكرة محلية من الشركات المحلية لمشاكل مثل انخفاض درجات الخام والإنتاجية، وارتفاع تكاليف الإنتاج، والنزاعات العمالية والبيئية من الشركات المحلية، وتحديات الظروف الجغرافية القاسية. علاوة على ذلك، لا تعتمد شركات التعدين على الموردين المحليين فقط فيما يتعلق بالمنتجات الوسيطة، ولكنها تطالب بشكل متزايد بالخدمات، ولا سيما الخدمات كثيفة المعرفة.

أن تنظيم وإدارة سلسلة القيمة لا يبدو أنه يفضل العمليات الضرورية للتعلم والابتكار لدى موردي التعدين، كما يحدث أحيانًا في قطاعات أخرى. غالبًا ما يمثل الشكل الهرمي للحوكمة السائد عادةً في قطاع التعدين عقبة حقيقية (بيتروبيلي وآخرون، 2018م). التعدين عمل محفوف بالمخاطر وطويل الأجل: وقف استغلال المناجم حتى لفترة قصيرة يمكن أن يكون مكلفًا للغاية، والاستثمارات لها دورة اقتصادية لا تقل عن 15 أو 20 عامًا. وبالتالي، فإن شركات التعدين عادة ما تتبنى موقفا يتجنب المخاطرة، وتفضل الشركات القائمة على الموردين المحتملين الجدد. ونادرا ما يقيمون روابط رسمية طويلة الأمد مع الموردين المحليين وينخرطون في مشاريع الابتكار بالتعاون معهم. وعندما تنشأ تحديات التقنية جديدة، فإنها تعتمد على الحلول التي تأتي من مقارها الرئيسية في الخارج أو من مورديها الدوليين، على حساب الموردين المحليين الجدد.

الطلب على المعادن مثل النحاس والصلب والألومنيوم سوف تزيد بشكل كبير لتلبية حاجتنا المتزايدة للمواد الأساسية لانتقال الطاقة. ولكن من أجل تلبية هذا النمو في الطلب، فمن الأهمية بمكان التأكد من أن القدرات والخدمات اللوجستية المعدنية والمعادن وسلاسل القيمة مستمرة. اعتماد "المعادن الخضراء"، وإنشاء "مراكز صناعية" فيها "منطقة عظمى" للمعادن الناشئة تمتد من أفريقيا إلى الغرب وآسيا الوسطى، سوف تلعب دورا هاما في التنمية المستقبلية.

تمثل سلسلة قيمة التعدين رحلة تحويلية من استخراج الموارد إلى الممارسات المستدامة. وتشكل هذه المراحل مجتمعة سلسلة قيمة التعدين، التي تشمل دورة حياة عمليات التعدين بأكملها، بدءًا من الاستخراج وحتى التسليم في الأسواق. تعد الإدارة الفعالة وتحسين كل مرحلة أمرًا ضروريًا لضمان التدفق السلس للمواد، وتعظيم استخدام الموارد، وتلبية طلب السوق بكفاءة. وضمن سلاسل القيمة هذه، تتبنى شركات التعدين التقدم التكنولوجي، وتتبنى مبادئ الاقتصاد الدائري، وتشرك أصحاب المصلحة لتقليل التأثير البيئي وتعزيز النتائج الاجتماعية. ومن خلال إعطاء الأولوية للاستدامة في كل مرحلة من مراحل سلسلة القيمة، يمكن لصناعة التعدين أن تساهم في مستقبل أكثر مسؤولية ومرونة، حيث يسير الرخاء الاقتصادي جنبًا إلى جنب مع الإشراف البيئي والرفاهية الاجتماعية. تتكون العديد من العناصر التي نستخدمها يوميًا من معادن تم استخراجها وصقلها في وقت ما في الماضي. لاستخراج معدن من المعدن المضيف له، يجب أن يمر المعدن بسلسلة من خطوات المعالجة الصناعية التي تضيف قيمة، سواء من حيث الاقتصاد أو سهولة الاستخدام. يُطلق على المسار الذي تمر به المعادن الثمينة من الاكتشاف إلى التسليم كمنتجات نهائية سلسلة قيمة التعدين.

تتسم سلسلة قيمة التعدين بالديناميكية وتتغير وفقًا لسوق السلع الأساسية، الذي يتأثر بالعرض والطلب، والعوامل القانونية، وتقلبات الأسعار، وهياكل السوق المتغيرة، والمخاوف البيئية. يجب أن تظل الشركات العاملة ضمن سلسلة قيمة التعدين مرنة ومنتجة لتظل قادرة على المنافسة. تمثل سلسلة القيمة المعدنية المراحل والعمليات التي سيمر بها مشروع المعادن لإنتاج السلع المعدنية. تمثل كل مرحلة قيمة مضافة على سابقتها وهناك فرص للاستثمار في كل مرحلة من المراحل الرئيسية. يمكن تجزئة المسار الطويل الذي يجب أن تمر به المعادن إلى خطوات تنظيمية مختلفة مع مسؤوليات فردية مثل الاستكشاف والتعدين واستخراج المعادن والخدمات اللوجستية ومبيعات السوق.

**مراحل سلسلة القيمة المعدنية؛ حيث إن هذه السلسلة تتسم بالديناميكية وتتغير وفقًا لسوق السلع الأساسية، الذي يتأثر بالعرض والطلب، والعوامل القانونية، وتقلبات الأسعار، وهياكل السوق المتغيرة، والمخاوف البيئية. يجب أن تظل الشركات العاملة ضمن سلسلة قيمة المعدنية مرنة ومرنة ومنتجة لتظل قادرة على المنافسة.**

سنناقش فيما يأتي كل خطوة تلعب فيها الجيولوجيا دورًا مهمًا، وسنرى كيف يضيف الجيولوجي قيمة إلى أجزاء مختلفة من سلسلة القيمة.

## • عملية الاستكشاف

يتم خلال عملية الاستكشاف فحص ما تحت سطح الأرض بهدف تحديد المواقع التي تحتوي على تراكمات من المعادن الثمينة التي يمكن استخراجها بتكلفة معقولة. في هذه الخطوة الأولى من سلسلة القيمة، يلعب الجيولوجيون دورًا بالغ الأهمية. حيث يتم تكليفهم بمهمة العثور على مناطق التمعدن وتقييم وتحديد ما إذا كان هناك شيء في الأرض يستحق التعدين. يشمل التنقيب عن المعادن رسم الخرائط الجيولوجية والجيوفيزيائية، واختبار عينات المياه والتربة، والحفر، وأنشطة الاستكشاف الأخرى. يتم تنظيم هذه العملية بشكل صارم، ومن الضروري الحصول على ترخيص الاستكشاف لإجراء أي من هذه الدراسات. يقوم الجيولوجيون بإعداد تقارير عن الموارد المعدنية وفقًا للمعايير والسلطات القضائية العامة. تتفاعل صناعة التنقيب مع المتطلبات المتغيرة للسوق ويتم تحديد قيمة المعادن من خلال خصائصها الفيزيائية والكيميائية التي تضمن وظيفة التقنيات الحالية والمستقبلية.

## • عملية التعديـــن

إذا نجحت حملة التنقيب، يتم تحديد موقع وحجم المعادن الثمينة، وإذا تم أخذ العوامل القانونية والاجتماعية والبيئية في الاعتبار بشكل صحيح، فيمكن البدء في استخراج المواد. أثناء عملية التعدين، يتم استخراج المعادن من القشرة بطرق تجزئة مختلفة ونقلها إلى المطحنة حيث سيتم تقليل حجم الصخور إلى مقياس المليمتر.

يلعب الجيولوجيون دورًا حاسمًا في استخراج المواد القيمة، ويقومون باستمرار بالإشراف والتمييز بين المواد القيمة والنفايات. ويؤكدون أن المصنع يتلقى مواد تحتوي على درجة معينة من الخام مما يجعله اقتصاديًا.

## • عملية استخراج المعادن

يتم استخراج المعادن المرغوبة من المعادن الثمينة باستخدام قواعد علم المعادن الاستخراجي. تتم معالجة المواد الخام المطحونة بتقنيات معالجة المعادن مثل التعويم أو الفصل المغناطيسي أو الترشيح. يتم تحديد خطوات المعالجة المناسبة من خلال خصائص المادة الخام والتي تختلف بين أنواع الخام المختلفة. لكن جميع خطوات معالجة المعادن تعمل على تركيز المعادن الثمينة في إجمالي مادة العمل. تبدأ كفاءة خطوات معالجة المعادن في عملية الطحن لأن الطحن يحرر ويفصل المعادن القيمة عن أي معادن غير مرغوب فيها، ولكن حتى في حالة الطحن المثالي، فإن خطوة معالجة المعادن لا تكون فعالة بنسبة 100 % أبدًا. يعد التأكد من إجراء معالجة المعادن بأعلى كفاءة ممكنة أمرًا مهمًا للمجتمع للتأكد من أن سلسلة قيمة التعدين لا تفقد مواد غير ضرورية بسبب أكوام النفايات. بمجرد تركيز المعادن الثمينة بنجاح، يتم استخراج المعادن المرغوبة من المعادن الثمينة بطرق تعدينية مع الاستفادة من الخصائص المادية للمعادن الفعلية. طوال عملية استخراج المعادن، يساعد الجيولوجيون في تقييم ما إذا تم فصل المعادن القيمة بنجاح عن معادن النفايات باستخدام تقنيات المعالجة المعدنية.

## • الشحن والتسويق

تشمل الخطوات الأخيرة لسلسلة القيمة لوجستيات الشحن حيث تتم إدارة مستويات المخزون والجودة، ويتم نقل المواد بين مواقع مختلفة حتى تصل إلى العميل النهائي. يلعب الجيولوجيون دورًا محدودًا في الجزء الأخير من سلسلة القيمة؛ ومع ذلك، يجب عليهم أن يكونوا على دراية باتجاهات السوق حيث يمكن أن يكون لهم تأثير كبير على الطلب المستقبلي على المعادن الذي يدفع التنقيب عن المعادن.

إذًا يضيف الجيولوجيون قيمة كبيرة إلى سلسلة القيمة المعدنية من خلال توفير فهم تفصيلي لتوزيع المعادن وطبيعة رواسب الخام. ومع تزايد الطلب على المعادن، تصل أنشطة التعدين إلى أعماق القشرة الأرضية، مما يجلب المزيد من التعقيد من ناحية استقرار البنية التحتية والقضايا اللوجستية التي يجب فهمها للعثور على الموارد واستخراجها. يلعب الجيولوجيون دورًا لا غنى عنه في سلسلة قيمة التعدين، حيث يؤكدون أنه ستكون هناك معادن يمكن تسليمها إلى العميل النهائي.

## • المنبع والمصب في سلسلة القيمة المعدنية

يتم إنشاء تجزئة مراحل صناعة التعدين، حيث يتم تقسيمها إلى الاستكشاف والإنتاج (المنبع)، والنقل والتخزين (منتصف المصب) والتكرير والتوزيع (المصب).

### • المنبـــع Upstream

يعمل هذا القطاع بنشاط في تحديد مواقع الخامات المعدنية واستخراج الموارد من باطن الأرض، بما في ذلك التخصصات المعقدة مثل الاستكشاف الجيولوجي وتقنيات الحفر والإنتاج والاستخلاص المتقدم والمسؤولية البيئية وسلامة العمال.

تشمل عمليات المنبع استكشاف وإنتاج المعادن والخامات، والذي يشمل الحفر البري والبحري، بالإضافة إلى استخدام التقنيات الجيوفيزيائية والجيوكيميائية والجيولوجية والاستشعار عن بعد. وبهذه الطريقة، ومن خلال الاعتراف بحواجز الدخول إلى هذا القطاع، تتضح أهمية التقنية في تنفيذه. تتطلب المخاطر والتحديات الكامنة في هذا القطاع حلولاً تكنولوجية متقدمة لضمان استخراج الموارد بشكل آمن وفعال.

## • منتصف الطريق Midstream

وهي المرحلة التي تغطي الأنشطة المتعلقة بالنقل والتخزين والمعالجة والخدمات اللوجستية للمعادن الخام، بما في ذلك استخدام البنى التحتية المحددة القادرة على نقل الموارد بأمان إلى نقطة الإنتاج. هذا هو المكان الذي سيتم فيه تكرير المواد الخام وتحويلها إلى منتجات نهائية. منتصف الطريق هو الجسر بين المنبع والمصب، ويربط الاستكشاف والإنتاج بالمستخدمين النهائيين.

وباعتبارها تحديًا رئيسيًا، فإن منتصف الطريق يشكل مخاطر وقوع حوادث بيئية وأخرى متعلقة بالسلامة، والتي يمكن أن يكون لها عواقب وخيمة. ولذلك، فإن العثور على التطبيق الصحيح للتقنية المتقدمة للمساعدة في المراقبة المستمرة والتحديد المبكر للحالات الشاذة في المحاجر التعدينية أمر ضروري لضمان التشغيل الآمن والفعال لهذه البنى التحتية الضخمة.

## • المصب Downstream

في نهاية سلسلة إنتاج صناعة التعدين يوجد قطاع الصناعات التحويلية، وهو القطاع المسؤول عن توزيع المنتجات المعدنية. هي المرحلة التي يصل فيها المنتج إلى المستهلك النهائي. ومع ذلك، قبل ذلك، تمر العملية بتقنيات معالجة المعادن مثل التعويم أو الفصل المغناطيسي أو الترشيح.

هذه العمليات معقدة وتستخدم تقنيات عالية الخطورة لتحقيق المنتج النهائي باستخراج المعادن المرغوبة من المعادن الثمينة. بالإضافة إلى الحاجة إلى فنيين من القوى العاملة ذوي المهارات العالية، تتطلب هذه العملية أيضًا أدوات مراقبة الحالة المثالية للتشغيل المستمر وتجنب الحوادث. إن الشركات العاملة في صناعة الموارد الطبيعية (مثل التعدين) تواجه معضلة في التركيز على منبع أو مصب سلسلة القيمة المعدنية. لقد تخصصت دول أمريكا اللاتينية في

إنتاج السلع الأساسية. في عام 2004م، كانت الصادرات التشيلية الرئيسية هي النحاس (46 %)، وكانت الصادرات الرئيسية للأرجنتين من البترول (26 %)، كما كانت صادرات بيرو الرئيسية هي التعدين والبترول (65 %)، وكانت الصادرات الرئيسية الثانية والثالثة للبرازيل هي المواد الخام (19 %). تواجه كل شركة مشاركة في هذه الصناعات معضلة ما إذا كانت ستستثمر في منبع أم مصب سلسلة القيمة المعدنية والأنشطة الأولية هي تلك القريبة من استغلال الموارد الطبيعية، والتي يكون إنتاجها سلعة أولية أو مادة خام (Van Beukering et al., 2000).

تضيف الأنشطة النهائية قيمة إلى المنتجات، من خلال التصنيع أو التخصيص، حيث يعتبر التدفق الخارجي سلعة نهائية. هناك العديد من الشركات المتكاملة رأسياً، لذا يجب على كل منها أن تقرر أين تركز جهودها. يقدم الأدب الحجج في اتجاه واحد أو آخر. تفسر نظرية المزايا النسبية التجارة الدولية من خلال الاختلافات النسبية في إنتاجية العمل ورأس المال (Keuschnigg, 1999). تختلف الإنتاجية بين الدول بسبب المعرفة التكنولوجية والظروف الطبيعية مثل المناخ والموارد الطبيعية وظروف التربة والموقع الجغرافي. وعلى نحو ثابت، تركز العديد من مشاريع التعدين الحديثة، مثل مشروع إسكونديدا التابع لشركة BHP-Billiton، وهو أكبر منجم للنحاس في العالم، على الاستخراج والتركيز (أنشطة المنبع)، مع الاستغناء عن عمليات الصقل (أنشطة المصب) في المصانع في نصف الكرة الشمالي. يمكن تصنيع الأثاث الخشبي في أي مكان في العالم تقريبًا، ولكن بينما تصل الأشجار في نصف الكرة الشمالي إلى مرحلة النضج خلال نصف قرن إلى قرن واحد، فإن الأشجار في جنوب تشيلي والأرجنتين تنضج في متوسط 25 عامًا فقط. وعلى هذا فإن الميزة النسبية التي تتمتع بها أميركا اللاتينية تكمن في الغابة ذاتها. وعلى النقيض من ذلك، فإن الميزة النسبية لمناشر الأخشاب في نصف الكرة الشمالي هي قربها من مراكز الاستهلاك. يبرر

هذا الوضع الأدلة التجريبية التي حصل عليها روس وآخرون (2001م) لصناعة الأخشاب السويدية، مما يوضح أن التخصيص هو أنجح استراتيجية لزيادة الأرباح. باختصار، إذا كانت ميزة الشركة تكمن في توافر الموارد الطبيعية، فإن استراتيجيتها التنافسية يجب أن تركز على كيفية استغلالها.

وفي مواجهة ما ورد أعلاه، هناك أدلة تجريبية تبين أن تلك البلدان التي اتبعت أنشطة المصب قد نمت بشكل أسرع بكثير من تلك التي تخصصت في استغلال الموارد الطبيعية (Sachs and Warner, 1995). وأصبحت اليابان وكوريا منتجين للصلب على مستوى عالمي على الرغم من افتقارهما إلى خام الحديد، في حين أن بعض المصدرين الرئيسيين لخام الحديد مثل البرازيل والاتحاد الروسي تظهر تنمية اقتصادية أبطأ بكثير. ويمكن تفسير التناقض الواضح في أن وجود موارد طبيعية أقل يؤدي إلى نمو اقتصادي أقوى بغياب العوامل الخارجية الإيجابية القادمة من قطاعات الموارد الطبيعية. ويستلزم التصنيع، على عكس استغلال الموارد الطبيعية، تقسيمًا أكثر تعقيدًا للعمل. ويترجم هذا الشرط إلى قدرة أعلى على خلق المعرفة، وهو أمر ضروري للحفاظ على الميزة التنافسية للشركة (Powell and Snellman, 2004).

باختصار، تعمل الشركات التي تشارك في الأنشطة النهائية على زيادة الإيجارات من خلال تطوير كفاءاتها الأساسية لإضافة قيمة أعلى لمنتجاتها والتكيف مع تقلبات السوق. وبما أن النقاش في المجمل غير حاسم، فإن المديرين الذين يواجهون معضلة المنبع والمصب يجب أن يبحثوا عن إجابات على مستوى الشركة. لا توجد مؤلفات أكاديمية ذات صلة، باستثناء عمل الباحثين جوديت وفان لونج وسوبيران (1999م). يصمم هؤلاء المؤلفون صناعة متكاملة جزئيًا من أجل توضيح التأثيرات المنفصلة للتفاعل الاستراتيجي والتكلفة الأولية، في تحديد صافي مبيعات الشركة المتكاملة للقطاع غير المتكامل.

واليوم أدت عولمة الأسواق، واتفاقيات التجارة الحرة، والتدفق الحر لرأس المال الدولي، وتطوير الإنترنت، إلى دفع العديد من الصناعات إلى الاقتراب من المنافسة الكاملة (Van Beukering et al., 2000). بعض افتراضات النظرية الكلاسيكية الجديدة للشركة صالحة بشكل خاص للسلع الأولية أو المواد الخام. وهي منتجات غير قابلة للتمييز بحكم تعريفها، ويتم تداولها في أسواق عالمية تتسم بالكفاءة والمستنيرة. تفترض العديد من الدراسات حول تجارة السلع الأساسية أن الشركات تواجه منافسة كاملة (Hens, 1997, Schwarz, 2006)، خاصة في حالة الموارد الطبيعية. ووفقاً للباحث ماكلارين (1999م) فإن «الأغلبية الساحقة من الدراسات الحالية [حول السلع الأولية] تفترض المنافسة الكاملة».

وقد اعترفت الدراسات الحديثة بوجود منتجين يتمتعون بقوة سوقية في بعض الصناعات (Gellert, 2003). وفي مثل هذه الحالة، قد تنخرط الشركات في سلوك استراتيجي لتقليل المنافسة وزيادة الأسعار. ويذكر جونسن (1991م) حالة شركات النفط الكبرى التي كانت تشتري أعلى من تكلفتها الحدية في سوق المنبع، من أجل الإضرار بمنافسيها في المصب. بالإضافة إلى ذلك، عندما تأتي السلع من موارد غير متجددة، قد تتوقع الشركات حالة احتكارية مستقبلية وتقرر عدم تعظيم الأرباح الحالية كما يفترض نموذج المنافسة الكاملة. وقد يكون هذا هو الحال بالنسبة للنفط والغاز الطبيعي، حيث ستستمر الاحتياطيات لنحو 41 و67 عامًا على التوالي (Egging and Gabriel, 2006). في ظل المنافسة الكاملة، فإن أفضل استراتيجية تنافسية هي مجموعة الإجراءات التي تزيد من كفاءة الشركة، مما يعني توليد أقصى قيمة اقتصادية تستهلك أقل قدر من الموارد (Grifell-Tatjé and Lovell, 1999). وللقيام بذلك، يتعين على الشركات أن تقدم المزيج الأكثر قيمة من المنتجات والخدمات، في ضوء الأسعار الحالية. ويتعين على الشركات أن تفعل ذلك بأقل التكاليف، وهو ما يمكن تحقيقه من خلال تحويل وتعبئة المدخلات والموارد على النحو الأمثل.

منذ نشأتها، ركزت البرمجة الرياضية على مشاكل اتخاذ القرار التي تهدف إلى الوصول إلى كفاءة الشركة (Dantzig, 2002). تمتلك معظم هذه المشكلات البنية اللازمة للسماح للأدوات الرياضية بحلها ووصفها بشكل رسمي. وهذه هي الطريقة التي اكتسبت بها البرمجة الرياضياتية أهمية في اتخاذ القرارات الإستراتيجية، كما أفاد الباحث شوارتز (2003م) عن صناعة الألومنيوم وفعل الباحثان سينغر ودونوسو (2005م) لصناعة الصلب. يستنتج مما سبق أن البرمجة الرياضياتية يجب أن تكون أداة عملية للمساعدة في اتخاذ القرارات الإستراتيجية لصناعات الموارد الطبيعية في أمريكا اللاتينية. وعلى وجه الخصوص، يمكن للبرمجة أن تحل معضلة المنبع والمصب فيما يتعلق بالميزات المحددة لكل شركة. (Singer & Donoso, 2008)

# دور الذكاء الاصطناعي في التعدين

في إطار الجهود الرامية إلى إحداث تحول سريع في الطريقة التي نستخدم بها الطاقة، يزداد الطلب على المعادن الثمينة بشكل متزايد. هناك حاجة إلى معادن ومعادن مختلفة، مثل النحاس والكوبالت، لتطوير تقنيات جديدة وتسريع خفض انبعاثات الكربون. ومع ذلك، فإن استخراجها يأتي أيضًا بتكاليف مجتمعية وبيئية عالية. ولذلك، فإن تطوير طرائق لاستخراج المعادن الثمينة بطريقة تفيد أهداف الاستدامة العالمية وتخفف من الآثار السلبية للاستخراج، مع تصحيح الاختلالات بين البلدان النامية والمتقدمة، هو مسعى جدير بالاهتمام. إذْ توفر التطبيقات الممكّنة للذكاء الاصطناعي (AI) وسيلة واحدة لتسريع هذه العملية.

ويبقى السؤال، كيف نضمن استخدام الذكاء الاصطناعي بطريقة تفيد المجتمعات والتنمية المجتمعية والاستدامة البيئية عندما يتعلق الأمر بصناعة التعدين؟ (Corrigan & Laye, 2022). ومع ذلك، على الرغم من هذه الآثار السلبية الملحوظة في كثير من الأحيان لاستخراج المعادن، فإن تحول الطاقة هذا يجب أن يحدث بسرعة وكفاءة. علاوة على ذلك، فإن الإمكانات الاقتصادية لهذا التحول واسعة النطاق حيث إن التعدين أو الصناعة الاستخراجية تعد جهة فاعلة قوية في الاستدامة الاقتصادية لـ 81 دولة (United Nations, 2021)، كما أن 63 % من البلدان المنخفضة والمتوسطة الدخل زادت اعتمادها على الصناعات الاستخراجية في العقود الأخيرة (Roe, 2016).

على سبيل المثال، ستسيطر جمهورية الكونغو الديمقراطية على 80 % من الإمدادات العالمية من الكوبالت بحلول منتصف العقد (Mackenzie, 2022). ومع ذلك، فإن العديد من البلدان الغنية بموارد الموارد هذه لديها أيضًا تاريخ طويل من الاستغلال، والتدهور البيئي، ولعنة الموارد. ولذلك، فإن تطوير طرق

لاستخراج المعادن الثمينة بطريقة تفيد أهداف الاستدامة العالمية وتخفف من الآثار السلبية للاستخراج، مع تصحيح الاختلالات بين البلدان النامية والمتقدمة، هو مسعى جدير بالاهتمام (United Nations, 2021) . توفر التطبيقات الممكّنة للذكاء الاصطناعي (AI) وسيلة واحدة لتسريع هذه العملية. يعمل الذكاء الاصطناعي بالفعل على تعزيز اقتصاديات قطاع التعدين (Jung & Choi, 2021) من خلال تعزيز الإنتاجية وتحسين تكاليف التشغيل وزيادة الربحية. وتذهب الاستخدامات المحتملة إلى ما هو أبعد من ذلك لدعم سلامة العمال والإدارة البيئية والمراقبة الحكومية. ومع ذلك، فإن الاعتبار الأخلاقي لاستخدام الأدوات التي تدعم الذكاء الاصطناعي في هذا السياق، تم التغاضي عنه إلى حد كبير حتى الوقت الحالي. ويبقى السؤال، كيف نضمن استخدام الذكاء الاصطناعي بطريقة تفيد المجتمعات والتنمية المجتمعية والاستدامة البيئية عندما يتعلق الأمر بصناعة التعدين؟

## • الأدوار الحالية والمحتملة للذكاء الاصطناعي في التعدين

هناك العديد من التطبيقات القائمة بالفعل للذكاء الاصطناعي في صناعة التعدين وعملياتها. الأول هو التنقيب والاستكشاف، وهي المرحلة الأولية لتحديد موقع المعدن الاقتصادي، وقياس ظروفه الاقتصادية والسوقية من أجل تقييم ما إذا كان يستحق الاستثمار فيه. وتتطلب هذه العملية "استطلاع منطقة الاهتمام، وجمع المعلومات الجيوفيزيائية" والبيانات الجيولوجية والاقتصادية. ويتضمن الاستكشاف أخذ العينات، والعمل المختبري، وتسجيل الآبار، ومواصلة التحقيق في التوقعات (Böhmer & Kucera, 2013). وقد تمت رؤية واستخدام التطبيقات المدعمة بالذكاء الاصطناعي لهذه المهام في Goldspot Discoveries Incorporated وIBM Watson لتحقيق دقة عالية في تحديد موقع الآفاق القابلة للتعدين (Goldspot Discoveries; Murphy, 2021).

تعد نماذج التعلم الآلي (ML) مثل آلات ناقل الدعم Support Vector (SVMs) Machines ونماذج التعلم العميق حاليًا هي الأنظمة الأكثر شيوعًا المستخدمة لإنتاج وجمع ومشاركة البيانات التي تم جمعها من الحفر أو أجهزة الاستشعار أو القياسات في الوقت الفعلي (Jung & Choi, 2021). ويشمل ذلك الحفر والتفجير، وإدارة المعدات، والإدارة الجيوتقنية وسلامة المناجم، بالإضافة إلى مراقبة الغطاء الأرضي وتقييم مخاطر المناجم. تعد السلامة في مكان العمل مجالًا آخر يتم فيه استخدام الأدوات الممكّنة للذكاء الاصطناعي. تعد عمليات التعدين بيئة شديدة الخطورة بسبب صغر مساحة العمل، وعدم كفاية الإضاءة، والاتصال بالنفايات والغازات السامة واستنشاق الجزيئات. ولهذا السبب تم إنشاء أدوات الذكاء الاصطناعي للحد من تعرض العمال لهذه الظروف من خلال آلات «تراقب الجو بشكل مستقل، وترسل إشارات وتحذيرات، وتحدد المناطق التي بها مشاكل، وتعمل بشكل مستمر حتى في المواقف الخطرة» (Hyder et al., 2019).

يتم استخدام الذكاء الاصطناعي أيضًا في العمليات التشغيلية. وقد حققت شاحنات النقل التعدينية المستقلة، مثل تلك التي تنتجها شركة كاتربيلر، انخفاضًا بنسبة 15 % في تكاليف التشغيل نظرًا لأن هذه الشاحنات يمكن أن تعمل بشكل مستمر دون فترات راحة أو تغييرات في نوبات العمل (Dyson, 2017). من المحتمل أيضًا أن يزيد هذا من سلامة العامل/السائق. هناك أدوات أخرى تدعم الذكاء الاصطناعي قيد التطوير. لزيادة تحسين ظروف العمال، يمكن استخدام الروبوتات أو أجهزة الاستشعار التي تبحث في المناطق المثيرة للقلق وتجمع البيانات حول مستويات الغازات الخطرة والغبار السام والإشعاع في المنجم قبل التفاعل البشري مع المنطقة (Zhao et al., 2017). بالإضافة إلى ذلك، قد تؤدي هذه الأنظمة إلى إطلاق إنذارات أو إشارات و/أو إعادة توجيه شبكات التهوية عند حدوث ظروف غير آمنة. وهذا لن يؤدي إلى تحسين ظروف العمل

فحسب، بل يمكن أن يساعد أيضًا في تقليل فترات الراحة، وزيادة الإنتاجية، وتقليل مخاطر الحوادث والتكاليف ذات الصلة (Hyder et al., 2019).

وفي إطار الإنتاج قد تتمكن الآلات المستقلة قريبًا من حساب أشياء مثل قوة الصخور وصلابتها أو مراقبة الغاز والميثان، كل ذلك أثناء مراقبة ظروف السقف (He et al., 2019; Isleyen et al., 2021; Wang et al., 2008). يتم جمع البيانات من هذه العمليات ثم استخدامها لتحليل ظروف العمل بحيث يمكن اتخاذ قرارات مستنيرة واتخاذ الإجراءات التصحيحية في حالة حدوث خطأ أو عطل (Ge et al., 2022). هناك قطاع آخر يشتمل على تطبيقات محتملة للأدوات التي تدعم الذكاء الاصطناعي وهو قطاع معالجة المعادن، حيث تستخدم الأنظمة فرز الألوان، أو نقل الأشعة السينية، أو أجهزة الاستشعار القريبة من الأشعة تحت الحمراء للتخلص من النفايات. وهذا من شأنه أن يكون مفيدًا في تحديد مختلف الخصائص الفيزيائية والمعدنية والكيميائية (Corrigan & Laye, 2022).

ومن شأن هذه العمليات بدورها أن «تزيد بشكل كبير من كفاءة عملية الاتصال وتقلل من تكلفة الطاقة لأن التكسير والطحن هما الجزء الأكثر استهلاكًا للطاقة والأقل كفاءة في استخدام الطاقة في دورة معالجة المعادن» (Hyder et al., 2019)، وبالتالي تحسين الكفاءة والاستدامة. علاوة على ذلك، فإن أساليب فحص البيانات وتصورها لديها الفرصة للتنبؤ بالمواقف الخطيرة المحتملة وبالتالي منعها أو إلغاء الحاجة إلى العمل البشري في البيئات الخطرة، مثل نقل وتحميل وتفجير المتفجرات، أو تركيب دعامات الأسطح أو إزالة الغازات السامة والغبار (Narkhede et al., 2021). علاوة على ذلك، يمكن أن يساعد الذكاء الاصطناعي في تحسين الكفاءة التشغيلية في جميع أنحاء سلسلة التوريد، والتنبؤ بالصيانة، وتقليل النفايات أو خفض تكاليف النقل، من بين أمور أخرى (Kaack et al., 2020).

وبالانتقال إلى ما هو أبعد من المكاسب الاقتصادية ومكاسب الكفاءة، تتمتع الأدوات الممكّنة بالذكاء الاصطناعي بالقدرة على المساعدة في تحسين شمولية أو استدامة عملية صنع القرار في عمليات التعدين. من خلال دمج ليس فقط كميات كبيرة من البيانات الاقتصادية، ولكن أيضًا كميات كبيرة من البيانات المتعلقة بالبيئة واستخدام الأراضي والمجتمعات وعوامل الحوكمة، من المحتمل أن يكون تحسين العمليات متعدد الأهداف من خلال عمليات التعلم الآلي مفيدًا. من خلال القدرة على استكشاف الترابط بين أنواع مختلفة من النظم البيئية بشكل أفضل والتعرف بسرعة على أشياء مثل نوع الغطاء الأرضي من خلال اكتشاف الصور المدعومة بالذكاء الاصطناعي لمراقبة الأرض، يمكن للذكاء الاصطناعي أن يساهم في تعدين أكثر استدامة (Vinuesa et al., 2020).

وأخيرًا، يلعب الذكاء الاصطناعي دورًا محتملًا في مراقبة مواقع التعدين والانتهاكات البيئية أو انتهاكات سلامة العمال من قبل الشركات أو الحكومة. على سبيل المثال، يتم استخدام بعض التقنيات نفسها بالفعل لرصد التنوع البيولوجي (Arteta et al., 2016; Kesari, 2019; Microsoft, 2020). أو الكشف عن انتهاكات تلوث الهواء أو الماء (Clean Water AI, n.d.; Carbon Tracker Initiative, 2020)، يمكن أن تساعد الحكومات في مجتمعات التعدين أيضًا على مراقبة الانتهاكات.

## • التحديات في تنفيذ الذكاء الاصطناعي في صناعة التعدين

على الرغم من أن إدخال الأدوات المدعومة بالذكاء الاصطناعي في صناعة التعدين لديه القدرة على تحسين الممارسات في نقاط مختلفة من الإنتاج والعمليات، فإن الآثار الاقتصادية والبيئية والمجتمعية لاستخدام هذه الأدوات تأتي مع مقايضات وتحديات أخلاقية محتملة كبيرة (Corrigan & Laye, 2022).

أصبحت الاعتبارات الأخلاقية في تطوير واستخدام الذكاء الاصطناعي تتصدر بشكل متزايد مناقشات الشركات والمناقشات السياسية. (Floridi et al. 2018) على سبيل المثال، حددوا خمسة مبادئ أساسية للذكاء الاصطناعي الأخلاقي: الإحسان، وعدم الإيذاء، والاستقلالية، والعدالة، وقابلية التفسير. وبأخذ هذه المبادئ كنقطة انطلاق، فإننا نركز على أربعة اعتبارات أخلاقية رئيسية لاستخدام الذكاء الاصطناعي في صناعة التعدين:

### ■ الحكم الذاتي والمراقبة

كما هو الحال مع إدخال الذكاء الاصطناعي في مختلف المجالات الأخرى، لا تزال هناك معارضة من أصحاب المصلحة، مثل العمال والمشرفين والمجتمعات المحيطة والباحثين، حول كيفية تأثير هذه الأدوات سلبًا على توفر الوظائف والأنظمة الاجتماعية والعلاقات بين العمال (Cazes, 2021). تكمن هذه المخاوف في المخاوف من تولي مهام الأتمتة دور البشر داخل القوى العاملة، فضلًا عن زيادة المراقبة التي تؤدي إلى فقدان خصوصية البيانات أو القدرة على اتخاذ القرارات بشكل مستقل. تتمتع المركبات الآلية أو أنظمة المراقبة بالقدرة على استبدال السائقين أو المشغلين البشريين. ومع ذلك، فإن فوائد السلامة المتزايدة لهذه الأدوات نفسها يجب أن تؤخذ في الاعتبار إلى جانب احتمالات تكاليف العمل. إن التفكير في الأنظمة التي تعمل على تعزيز العاملين من البشر بدلًا

من استبدالهم، أو استخدام أساليب الإنسان في الحلقة، من شأنه أن يساعد في تخفيف التأثيرات السلبية لهذه الابتكارات (Corrigan & Laye, 2022). إضافة لذلك، إذا تم استخدام أدوات المراقبة أو مراقبة الوجه كما هو مذكور أعلاه، لرصد الأثر البيئي أو سلامة العمال أو تأمين محيط موقع التعدين، فهناك احتمال كبير لاستخدام هذه الأدوات للتوسع إلى ما هو أبعد من الاستخدامات المحددة بشكل ضيق واستخدامها بدلًا من ذلك. لمراقبة العمال والمجتمعات المحيطة بطرائق قد تتحدى المبادئ الأخلاقية أو توقعات المجتمع. ولذلك، يجب تصميم أنظمة المراقبة هذه وتنفيذها مع مراعاة معايير الحفاظ على الخصوصية وحقوق الإنسان (Fontes et al., 2022).

### على العموم ستكون هناك مفاضلة بين:

- تحسين الكفاءة والسلامة.
- أخذ فقدان استقلالية العمال/المجتمع والخصوصية بعين الاعتبار، حيث يتم استخدام الأدوات التي تدعم الذكاء الاصطناعي بشكل متزايد في مواقع التعدين.

## رصيد المكافآت

تلعب القضايا المتعلقة بالمبدأ الأخلاقي للعدالة دورًا عندما نفكر في «الفائزين» و«الخاسرين» الذين ينتجون عن استخدام التقنيات الجديدة. إن التناقضات المحتملة في ميزان المكافآت هذا تصبح موضع تساؤل عندما نفكر في ميزان المنافع بين الشركات أو بين البلدان. ونظرًا للافتقار إلى رأس المال المحلي أو المهارات ذات الصلة للحفاظ على الوتيرة النسبية من حيث التقدم في صناعة التعدين المدعومة بالذكاء الاصطناعي، فقد تستفيد الشركات الصغيرة من هذه التطورات التكنولوجية بشكل أقل من الشركات الدولية والكبيرة الحجم

التي تتمتع بالمزايا بالفعل. علاوة على ذلك، عندما نتحدث عن آليات مراقبة الانتهاكات البيئية، قد لا تمتلك الحكومات الصغيرة أو المتخلفة رأس المال لتطوير أو توظيف هذه الأدوات على مستوى دول التعدين الكبرى نفسه في الشمال العالمي، مثل كندا أو النمسا أو الولايات المتحدة. وقد يؤدي هذا إلى تفاقم، بدلًا من تصحيح، التأثيرات المحددة جغرافيًا في كثير من الأحيان الناجمة عن لعنة الموارد، مما يؤدي إلى تشويه توازن المكافآت المحتملة من استخدام الذكاء الاصطناعي (Corrigan & Laye, 2022).

علاوة على ذلك، يمكننا أيضًا التفكير في ميزان المكافآت فيما يتعلق بالإحسان. يتمتع الذكاء الاصطناعي بالقدرة على خفض بعض التكاليف البيئية للتعدين من خلال معالجة المعادن أو النقل أو استخدامات الآلات بشكل أكثر كفاءة أو مراقبة الانتهاكات البيئية بشكل أكثر دقة. ومع ذلك، تأتي أدوات الذكاء الاصطناعي ببصمة بيئية خاصة بها والتي يجب أخذها في الاعتبار (Coeckelbergh, 2021). والأهم من ذلك، أن جعل التعدين أكثر كفاءة وربحية يمكن أن يؤدي إلى الإفراط في استخراج المعادن أو النمو غير الضروري في تعدين الموارد القذرة أيضًا، مثل الفحم. إن جعل استخراج المعادن أسهل قد يساعد في تسريع انتقالنا بعيدًا عن الوقود الأحفوري في بعض النواحي، ولكن الأدوات نفسها قد تجعل استخراج الوقود الأحفوري أرخص، مما يؤخر هذا التحول أيضًا (Victor, 2019). ولذلك، علينا أن نفكر في كيفية ومكان استخدام هذه الأدوات للتأكد من أنها تساهم في تحقيق أهداف الاستدامة الأوسع بدلًا من إبطائها.

وأخيرًا، قد يزيد الذكاء الاصطناعي من الكفاءة الاقتصادية للشركات أو حتى قد يقلل من تكاليف الطاقة، ويعزز الأهداف البيئية، ولكن الكميات الكبيرة من البيانات التي قد يتطلبها للقيام بذلك قد تأتي على حساب

خصوصية أولئك الذين يقدمون البيانات (مثل العمال). وهذا يؤثر مرة أخرى على رصيد المكافآت. في هذه الحالة، يحتاج أولئك الذين يصممون ويستخدمون الذكاء الاصطناعي في قطاع التعدين إلى التفكير في المفاضلات بين فعالية الأداة والآثار المترتبة على جمع البيانات لأولئك الذين يثبتون البيانات (Corrigan & Laye, 2022).

## ■ التحيز وتحديد الأولويات

يعد استخدام كميات كبيرة ومتنوعة من البيانات لتوظيف تطبيقات الذكاء الاصطناعي في قطاع التعدين أمرًا ضروريًا لتوليد دقة وكفاءة الأدوات ذات الصلة. ومع ذلك، فإن القضايا المتعلقة بمبدأ العدالة تدخل حيز التنفيذ هنا. خاصة بالنسبة لتوظيف التطبيقات المدعمة بالذكاء الاصطناعي في مناطق التعدين في الجنوب العالمي، قد تكون البيانات المتاحة لتدريب أنظمة الذكاء الاصطناعي غير مناسبة للسياق الذي سيتم فيه استخدام الأداة في نهاية المطاف. وقد يؤدي ذلك إلى تحيز في القرارات أو المخرجات بسبب نقص البيانات المحلية أو التمثيلية (Australian Resources & Investment, 2021).

على سبيل المثال، إذا لم يتم تصميم أنظمة التعرف على الوجه مع أخذ السكان المحليين في الاعتبار (أي في أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى، حيث يكون عدد كبير من العمال وأفراد المجتمع من الأشخاص الملونين)، فقد تكون أقل دقة (Raji et al. 2020). إذا أردنا تحليل البيانات البيئية أو الثقافية (أي اللغة) أو بيانات الحوكمة أو بيانات المجتمع في تطبيقات التعلم الآلي المستخدمة في صناعة التعدين، فقد يكون ذلك أقل توفرًا أو دقة في مناطق معينة من العالم.

علاوة على ذلك، فإن المفاهيم التي يتم تحديدها بشكل شائع في خطابات أخلاقيات الذكاء الاصطناعي تأتي مع تحيزها الجغرافي الخاص الذي قد يشوه القضية التي يجب أن تكون بارزة أو ذات صلة بسياق معين (ÓhÉigeartaigh et

al., 2020; Roche et al., 2022)، لا سيما عندما نتحدث عن استخدام الذكاء الاصطناعي في مناطق خارج الشمال العالمي. ولهذا السبب، فإن مشاركة أصحاب المصلحة المحليين أو الإقليميين على جميع المستويات: مديري الشركات والعاملين وصانعي السياسات الدوليين والمحليين والمجتمع المحيط أمر حيوي للحد من مشكلات تحيز البيانات المحتملة.

وأخيرًا، علينا أيضًا أن نفكر في مسألة تحديد أولويات مؤشرات البيانات ومن سيستفيد منه في النهاية. على سبيل المثال، في مفهوم التحسين متعدد الأهداف لأنشطة التعدين، تتمثل الفكرة في استخدام البيانات من جوانب متعددة من البيئة التشغيلية (أي ليس فقط البيانات المتعلقة بالربح ولكن أيضًا البيانات المتعلقة بالآثار البيئية والثقافية والاجتماعية والمتعلقة بالحوكمة) للوصول إلى القرارات. ومع ذلك، لا يزال يتعين على الشخص الذي يصمم هذا النظام اتخاذ قرارات بشأن القيمة أو الوزن المعطى لكل جانب. هل نعطي الأولوية لتحسين البيئة أو استخدام الأراضي الثقافية على تنمية المجتمع؟ من المسؤول عن تحديد الأولويات، وكيف يمكننا إدارة أو تبرير المفاضلات بين الأنواع المختلفة من الأولويات؟ هذه هي الأسئلة التي يجب على المصممين وأصحاب العمل في هذه الأدوات التفكير فيها.

## ■ التفسير والفهم

ترتبط الفئة الأخيرة من الاعتبارات الأخلاقية بشكل صريح بمبدأ قابلية التفسير ومفهوم الشفافية في أنظمة الذكاء الاصطناعي (Angelovet al., 2021; Larsson & Heintz, 2020). يمكن إدارة وتخفيف مخاوف عمال المناجم من احتمال طردهم من العمل بواسطة الذكاء الاصطناعي أو مخاوف الحكومات المحلية أو أفراد المجتمع بشأن استخدام أنظمة المراقبة حول المناجم إلى حد ما من خلال تبادل المعرفة والأنظمة الواضحة والشفافة وأصحاب المصلحة ارتباط.

نظـرًا لأن التعديـن مرتبـط بشـكل غيـر مفهـوم بـالأرض، وبالتالـي بالمجتمعـات المحيطـة ماديًـا، فمـن الأهميـة بمـكان بنـاء فهـم المجتمـع المحلـي وقبولـه مـن خـلال الشـفافية والتعليـم حـول إنشـاء هـذه التقنيـات وأسـاليبها ومـدى اسـتخدامها أو توظيفها. يجـب علـى الشـركات التـي تفكـر في اسـتخدام أدوات أكثـر تدخـلًا تعتمـد علـى الـذكاء الاصطناعـي أن تعمـل مـع الموظفـين والمجتمعـات للحصـول علـى قبـول لكيفيـة اسـتخدام هـذه الأدوات. تعـد مشـاركة أصحـاب المصلحـة لشـرح مـا يفعلـه الـذكاء الاصطناعـي ومـا لا يفعلـه والحصـول علـى موافقـة حقيقيـة للاسـتخدام أمـرًا أساسـيًا هنـا.

لا يقتصـر هـذا الارتبـاط بشـكل واضـح علـى الاسـتخدام المسـؤول أو الأخلاقـي لـلأدوات الممكّنـة للـذكاء الاصطناعـي فحسـب، بـل يمكـن أن يسـاعد أيضًـا في تحقيـق الدقـة. إذا فهمـت المجتمعـات والعاملـون المفاضـلات بـين التقنيـات والأنظمـة الجديـدة المبنيـة مـع وضـع التصاميـم البشـرية في الاعتبـار، فسـيكونون أكثـر اسـتعدادًا للتعامـل مـع الأنظمـة، وتحسـين دقـة البيانـات واسـتخدامها. (Corrigan & Laye, 2022).

# تقييم الأثر البيئي في صناعة التعدين

إن صناعة التعدين، رغم أنها محرك حاسم للتنمية الاقتصادية واستخراج الموارد الطبيعية في بعض البلدان، حيث يكون تركيز المعادن ممكنا، غالبا ما تأتي بتكلفة كبيرة على الاستدامة البيئية. يمكن أن يكون لاستخراج المعادن والفلزات والوقود الأحفوري، إلى جانب الأنشطة المرتبطة به مثل إزالة الغابات وحرق مشاعل الغاز وإزالة التربة السطحية، آثار بعيدة المدى وضارة على النظم البيئية والتنوع البيولوجي وجودة الهواء والمياه والصحة العامة للتربة. الكون. يستكشف هذا المقال الآثار البيئية السلبية للتعدين والحاجة الملحة لممارسات أكثر استدامة في هذه الصناعة على المستوى العالمي، لا سيما في البلدان المتخلفة حيث القوانين واللوائح مرنة.

أحد الآثار المباشرة والأكثر وضوحًا للتعدين هو تدمير الموائل. يمكن للمناجم، وخاصة الحفرة المفتوحة، أن تغير المناظر الطبيعية بشكل لا يمكن التعرف عليه. فتتم إزالة الغابات، وإعادة توجيه الأنهار، وتعطل النظم البيئية والمياه الجوفية وتلوثها. ويهدد هذا التدمير عددًا لا يحصى من الأنواع، والعديد منها مهدد بالانقراض بالفعل. يتم تدمير الموائل أو تجزئتها، مما يجعل من الصعب على العديد من الأنواع البقاء على قيد الحياة.

يمكن للغبار والانبعاثات الناتجة عن عمليات التعدين أن تؤدي إلى انخفاض جودة الهواء في المناطق المحيطة. يمكن أن تساهم الجسيمات وانبعاثات الملوثات المحمولة جواً في حدوث مشاكل في الجهاز التنفسي وتأثيرات على القلب والأوعية الدموية ومشاكل صحية أخرى. يمكن أن تؤدي إزالة التربة السطحية وكشف الرواسب المعدنية الأساسية إلى تآكل التربة والتدهور البيئي. وهذا يمكن أن يؤدي إلى انخفاض الإنتاجية الزراعية والمزيد من فقدان الموائل.

يتطلب التعدين في كثير من الأحيان إزالة مساحات كبيرة من الغابات. وهذا لا يقلل من مصارف الكربون الحيوية فحسب، بل يعطل أيضًا النظم البيئية ويساهم في تفاقم تأثير تغير المناخ. يعد استخراج الوقود الأحفوري، مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي، محركًا رئيسيًا لتغير المناخ. غالبا ما يتطلب التعدين والنقل ومعالجة المعادن والفلزات مدخلات طاقة كبيرة، والتي تستمد عادة من الوقود الأحفوري. وهذا يزيد من تفاقم البصمة الكربونية لصناعة التعدين.

يمثل التخفيف من الأثر البيئي للتعدين تحديًا كبيرًا مع استمرار الطلب العالمي على المعادن والفلزات في الارتفاع مع نمو السكان وتقدم التقنيات وتضخم النمو الاقتصادي عامًا بعد عام. غالبًا ما تعطي الدوافع التي يحركها الربح الأولوية للمكاسب قصيرة المدى على الاستدامة طويلة المدى. يمكن أن يؤدي هذا إلى عدم كفاية الاحتياطات البيئية حيث تفتقر بعض المناطق إلى لوائح بيئية قوية أو تعاني من الفساد، مما يسمح لشركات التعدين بالعمل بحذر أقل تجاه التدهور البيئي. ولذلك، فإن تعزيز الأنظمة البيئية أمر بالغ الأهمية. ويجب على الحكومات أن تجعل شركات التعدين مسؤولة عن مسؤولياتها البيئية، بما في ذلك استعادة الموائل ومكافحة التلوث.

الابتكارات في تقنيات التعدين يمكن أن تقلل من الآثار البيئية. على سبيل المثال، يمكن لطرق الاستخراج المتقدمة وتقنيات إعادة التدوير أن تقلل من هدر الموارد والتلوث. يعد التعدين في الموقع ذو قيمة خاصة لاستخراج المعادن. بدلاً من إزالة كميات كبيرة من الخام مادياً، يتضمن التعدين في الموقع حقن محلول ترشيح يذيب المعادن المطلوبة، ثم يتم ضخها إلى السطح للمعالجة. ويقلل التعدين في الموقع من الحاجة إلى أعمال الحفر واسعة النطاق والاضطرابات المرتبطة بها، مما يقلل من البصمة البيئية واستهلاك الطاقة وإنتاج النفايات.

يمكن أن يساعد الاستصلاح وإعادة التأهيل الفعال لمواقع التعدين في استعادة النظم البيئية وتقليل الأضرار البيئية طويلة المدى. وينبغي أن يكون

هذا جزءا لا يتجزأ من خطط التعدين. إن نقل عمليات التعدين إلى مصادر الطاقة المتجددة بدلاً من الوقود الأحفوري يمكن أن يقلل من انبعاثات الكربون المرتبطة بالصناعة. إن تبني نهج الاقتصاد الدائري، الذي يركز على إعادة التدوير وإعادة استخدام المواد، يمكن أن يقلل أيضًا من الحاجة إلى عمليات التعدين الجديدة.

وفي الختام، فإن الأثر البيئي السلبي للتعدين يشكل تحديا كبيرا للاستدامة البيئية العالمية. وبينما يستمر الطلب على المعادن والفلزات في الارتفاع، فمن الضروري أن تتخذ صناعة التعدين والحكومات والمنظمات غير الحكومية والأمم المتحدة والمجتمع ككل خطوات استباقية للتخفيف من هذه الآثار. تعد ممارسات التعدين المبتكرة المستدامة، واللوائح الصارمة، والتحول نحو المصادر المسؤولة، مكونات حاسمة لمستقبل أكثر استدامة بيئيًا.

## • الآثار البيئية للتعدين

سلبيات وايجابيات التعدين كبيرة. يتطلب إنشاء مواقع التعدين قدرًا هائلاً من البناء، وهو ما يتسبب غالبًا في إزالة الغابات وفقدان موائل الحياة البرية والتنوع البيولوجي. الألغام السطحية، التي تتطلب استخدام المتفجرات والآلات الثقيلة لكشف المواد القريبة من سطح الأرض، تسبب ثقوبًا ضخمة بحجم الوادي في الأرض وتؤدي إلى تآكل التربة وتدهورها حول المناطق المحيطة. تعدين إزالة قمم الجبال، وهي طريقة لاستخراج الفحم، تستخدم المتفجرات لتفجير قمة الجبل بأكملها.

تنتج المناجم السطحية كمية كبيرة من النفايات. تطلق الألغام مواد ضارة في الهواء والماء، ويمكن أن تسبب مشاكل صحية خطيرة في حالة استنشاقها أو استهلاكها. وتطلق المناجم أيضًا مياهًا حمضية يمكن أن تقتل الحياة البحرية وتجعل المياه العذبة غير صالحة للشرب. ينتج التعدين تحت الأرض نفايات أقل من المناجم السطحية، لكنه يشكل خطورة على عمال المناجم. تنبعث من

صناعة التعدين الكربون عن طريق النقل واستخدام الطاقة، وتنتج الوقود الأحفوري - أكبر مصدر لانبعاثات الكربون في العالم. وحتى بعد إيقاف تشغيل الألغام، فإنها تستمر في التأثير على البيئة. ويحدث تصريف المناجم الحمضي بعد هجر المناجم، ويؤدي إلى دخول المعادن الثقيلة إلى شبكات المياه والإضرار بالنباتات والحيوانات والبشر التي تستهلكها.

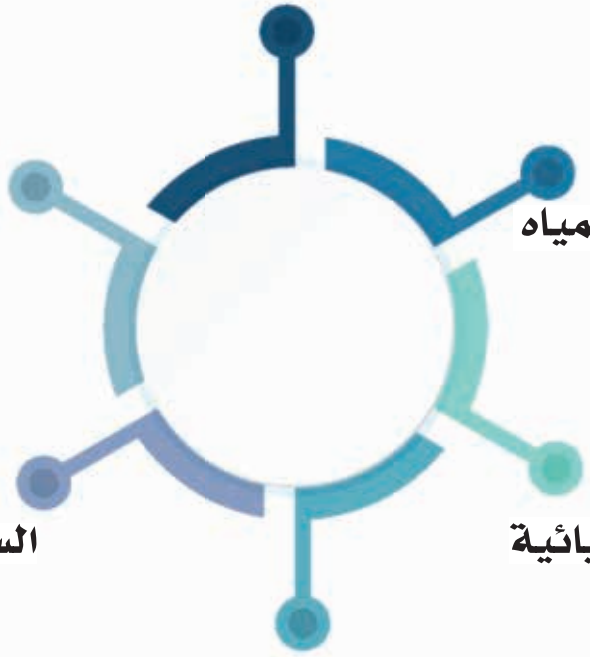
## • ايجابيات وسلبيات التعدين على البيئة

التعدين هو عملية جمع المعادن في الأرض. يمكن للتعدين أن يؤثر على المجتمعات المحلية إيجابًا وسلبًا. على الجانب الإيجابي، يمكن للتعدين أن يساهم في التنمية الاقتصادية، وفرص العمل، وتوفير المواد الخام الأساسية للمجتمع. لقد كان طريقا صالحا للتحول الاقتصادي في البلدان الغنية بالموارد. ومع ذلك، فإن التعدين له أيضًا آثار سلبية على البيئة. وتشمل بعض هذه العوامل فقدان الغطاء النباتي، وتدمير المسطحات المائية، وفقدان التنوع البيولوجي، والتغيرات في استخدام الأراضي، وانعدام الأمن الغذائي، وزيادة الرذائل الاجتماعية والصراعات، وارتفاع تكاليف المعيشة، وتلوث الهواء. وللتخفيف من هذه الآثار السلبية، يعد الاستصلاح وسيلة فعالة لاستعادة أراضي المناجم المهجورة وضمان الاستخدام الإنتاجي والفعال للأراضي القاحلة الخاصة بالمناجم. تشمل طرق الاستصلاح ممارسات الترميم الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، التي تعمل على استعادة خصوبة التربة، وتحفيز نمو الميكروبات، وتسهيل التعاقب البيئي المبكر. بشكل عام، في حين أن التعدين يمكن أن يحقق فوائد اقتصادية، فمن المهم إدارة آثاره البيئية بعناية. الآثار البيئية الناجمة عن التعدين هي تلك التي تؤثر بشكل مباشر وغير مباشر على الصحة البيئية والبشرية. يؤدي نوع التعدين والعمليات إلى تأثيرات مختلفة على البيئة وعلى صحة الإنسان.

## • التلـــوث المعدنـــي للأرض والميـــاه

في مواقع التعدين المفتوحة أو تحت الأرض، تشكل كلتا طريقتي التعدين خطر تلوث المياه من خلال الاتصال بالمياه السطحية أو المياه الجوفية. قد يؤدي تلوث المياه الجوفية إلى قطع أو تقييد إمدادات المياه إلى المناطق المجاورة. بالنسبة للمياه السطحية، قد تنتقل المعادن الذائبة مثل الكبريتات والنويدات المشعة والنترات عبر الجداول، أو من خلال التآكل إلى المياه الجوفية المحلية. وفيما يتعلق بالتعدين، فإن المواد الكيميائية المستخدمة في معالجة الخامات هي مصدر للتلوث. وهذا يؤثر على نوعية مصادر المياه في المجتمعات المجاورة وسيؤثر على الحياة المائية.

**التلوث المعدني للمياه الجوفية**



التلوث المعدني للمياه السطحية

انبعاثات الهواء

التأثيرات الفيزيائية

السيانيد

التصريف الحمضي

تأثيرات التلوث المائي من التعدين
معالجة التلوث الكيميائي
الرواسب والتعرية
تلوث المعادن الثقيلة
تصريف حمض المناجم

# التأثيرات الفيريائية

## • عدم الاستقرار الهيكلي

يحدث عدم الاستقرار الهيكلي في التعدين عندما تكون مجاميع التربة غير قادرة على مقاومة التدهور الناجم عن التغيرات في التربة المحيطة. في مجال التعدين، غالبًا ما يتم ملاحظة عدم الاستقرار حول أنظمة التخلص من المخلفات خاصة في مواقع المناجم القديمة. وعندما يفشل استقرار المخلفات، فقد يؤدي ذلك إلى إطلاق الملوثات في البيئة والممرات المائية. وباستخدام الدروس المستفادة من الماضي، يتم تصميم أنظمة المخلفات اليوم لتأخذ في الاعتبار الخصائص الفيزيائية لمواد النفايات بالإضافة إلى الظروف في الموقع. في الوقت الحاضر، تحتوي معظم أنظمة التخلص من المخلفات على بطانات خاصة ومجهزة بتدابير جاهزة لمواجهة الزلازل.

## • فشل المنحدر

يتم قطع أو تصنيع المنحدرات في مواقع التعدين. المنحدرات المقطوعة هي منحدرات تم إنشاؤها من إزالة الصخور الخام أو المثقلة بالأعباء من سطح المناظر الطبيعية غير المضطربة. المنحدرات المصنعة هي المنحدرات التي تم إنشاؤها في تكديس وإلقاء نفايات الصخور والأعباء والمخلفات. يؤدي فشل المنحدر إلى نشر هذه النفايات، مما يؤدي إلى إطلاق مواد سامة أو متفاعلة إلى المناطق المحيطة بها.

## • الهبوط

الهبوط هو حركة الأرض الجانبية الناتجة عن انهيار الطبقة المغطاة في تجويف منجم تحت الأرض. يحدث الهبوط في مواقع المناجم تحت الأرض عندما يتم تشغيل جيوب من الغرف غير المملوءة أو انهيار الدعامات والأعمدة بسبب

الحركات السطحية. تعتبر المجاري والأحواض الأرضية من مظاهر الهبوط وهي شديدة التدمير للمجتمع الذي لا يدرك مدى نشاط التنقيب في المناجم الجوفية القديمة أو غير النشطة أو المهجورة.

## • تصريف المناجم الحمضي (AMD)

هو تدفق المياه الحمضية إلى الخارج الناتج عن أكسدة البيريت أو خامات الحديد الغنية بالكبريت. ويشار إليه أيضًا باسم الصرف الصخري الحمضي (ARD). يتم إنتاج الحمض عندما تتعرض المواد المستخرجة مثل الصخور المضيفة المحفورة مع معادن كبريتيد المعدن للهواء والماء. قد تحتوي مواقع تصريف الأحماض على معادن مذابة مثل الرصاص والنحاس والفضة والحديد والزنك. وتؤثر التركيزات العالية من هذه المعادن الذائبة على الحياة المائية ونوعية المياه في الجداول.

## • الأنشطة المرتبطة بالتعدين

الأنشطة المرتبطة بالتعدين لها آثار مباشرة ودائمة على كل من البيئتين المادية والبشرية. غالبًا ما تُؤخذ بعين الاعتبار التأثيرات الاجتماعية والاقتصادية والسياسية في الفئة الأخيرة من قضايا الاستدامة والتي سيتم مناقشتها بإيجاز هنا. يشمل التعدين الأنشطة الآتية، ولكل منها تأثيرات متميزة على البيئة:

- **الاستكشاف:** ويتم تحديد الرواسب الاقتصادية وتحديد خصائصها بما يسمح باستردادها.
- **التطوير:** تتم الاستعدادات للتعدين.
- **الاِستِخراج:** تتم إزالة المواد القيمة للبيع أو المعالجة.

- **الاستصلاح:** يتم تصحيح أو تحسين الاضطرابات الناجمة عن أي من الأنشطة السابقة.
- **الإغلاق:** يتوقف النشاط ويتم هجر المنطقة أو إعادتها لاستخدام آخر. سنتكلم هنا عن الاعتبارات البيئية المتعلقة بالتطوير والاستخراج بشيء من التفصيل، بما في ذلك عملية الترخيص المطلوبة قبل بدء أنشطة التعدين.

تختلف الأنظمة البيئية بين دول العالم. تسعى معظم شركات التعدين الكبرى إلى اتباع ممارسات موحدة في جميع مناجمها، بغض النظر عن الموقع، وقد التزمت علنًا باتباع معايير الاستدامة الواضحة، مثل تلك الموضحة تحت عنوان «الممارسات المستدامة» في هذا الفصل. ومع ذلك، وبسبب الاختلافات في اللوائح، فمن الصعب تقديم وصف تفصيلي للمتطلبات والممارسات البيئية المطبقة في جميع أنحاء العالم. ومن ثم، فإن تركيز هذا الفصل هو تقديم وصف عام للممارسات والإجراءات السليمة بيئيًا.

## • ممارسات التعدين التاريخية

في الماضي القريب، كان التعدين يتم مع القليل من المعرفة بتأثيراته على البيئة، ومن منظور حديث، مع القليل من الاهتمام بالتأثيرات المعروفة. وكثيرًا ما أدت عواقب هذا النهج إلى أضرار كبيرة على البيئة الطبيعية، بما في ذلك (على سبيل المثال لا الحصر):

- حفر المناجم غير المستصلحة، والأعمدة، والأنفاق، وأكوام النفايات التي قد تؤدي إلى انهيارات أرضية وكميات كبيرة من الغبار.
- المياه السطحية والجوفية التي قد تكون ملوثة بالجسيمات الصلبة والملوثات الكيميائية المنبعثة من الأعمال النشطة والمهجورة، أو من أكوام النفايات.

- الحفر والأعمدة والأنفاق المهجورة التي قد تشكل مخاطر سقوط محتملة على البشر والماشية والحياة البرية.
- وبالمثل، إطلاق الجسيمات والملوثات الكيميائية من أعمال المناجم أو النفايات وأكوام الأضرار التي قد تسبب إصابة مباشرة أو تضر بصحة الإنسان أو الحيوان.
- التآكل، وما يترتب عليه من فقدان التربة والغطاء النباتي داخل وحول الأعمال غير المستصلحة، قد يمثل مشكلة كبيرة.
- الأعمال تحت الأرض، الحالية أو المهجورة، التي قد تسبب هبوطًا سطحيًا، مما قد يؤدي إلى تلف الهياكل السطحية، والشقوق أو الجرف التي تشكل خطرًا على البشر والحيوانات (Craig et al., 2001).

بدأت توقعات الجمهور من صناعة التعدين تتغير في الخمسينات، وبحلول نهاية السبعينات، سنت الحكومات في البلدان المتقدمة قوانين بيئية واسعة النطاق كان لها تأثير مباشر على جميع الأنشطة الصناعية، بما في ذلك التعدين (Kaas & Parr, 1992). على الرغم من أن المعايير البيئية لا تزال تختلف بين البلدان، إلا أن جميع شركات التعدين الكبرى تقريبًا تنص حاليًا كسياسة على أنها ستعمل على تشغيل جميع مناجمها، بغض النظر عن الموقع، وفقًا لمعايير العالم الأول لحماية البيئة وصحة العمال وسلامتهم.

## • الممارسات المستدامة

قامت شركات التعدين الرائدة مؤخرًا بصياغة معايير ومبادئ للتنمية المستدامة للموارد المعدنية في جميع أنحاء العالم وتعهدت باتباعها. وفي حين أن جميع هذه المبادئ لا تتعلق مباشرة بالممارسات البيئية، فإنها تمثل تغييرًا كبيرًا في النهج المتبع في صناعة التعدين ككل، وهو التغيير الذي أثر بالفعل على

الممارسات البيئية في الصناعة. في عام 1999م قررت تسع من أكبر شركات التعدين الشروع في مبادرة جديدة تهدف إلى تحقيق تغيير جدي في الطريقة التي تتعامل بها الصناعة مع مشاكل اليوم. أطلقوا على هذا اسم مبادرة التعدين العالمية Global Mining Initiative. وتضمن برنامجًا للإصلاح الداخلي، ومراجعة للجمعيات المختلفة التي تنتمي إليها الشركات، ودراسة دقيقة للقضايا المجتمعية التي يتعين عليهم مواجهتها. ونتيجة لذلك، تم تكليف المعهد الدولي للبيئة والتنمية بتنفيذ مشروع التعدين والمعادن والتنمية المستدامة . بين عامي 2000م و2002م، حدد مشروع التعدين والمعادن والتنمية المستدامة القضايا الحاسمة المرتبطة بتنمية الموارد المعدنية في أربعة «مجالات»:

- **المجال الاقتصادي**
- زيادة رفاهية الإنسان.
- ضمان الاستخدام الفعال لجميع الموارد، الطبيعية وغيرها، من خلال زيادة الإيجارات.
- السعي إلى تحديد واستيعاب التكاليف البيئية والاجتماعية.
- الحفاظ على الظروف الملائمة للمؤسسات القابلة للحياة وتعزيزها.
- **المجال الاجتماعي**
- ضمان التوزيع العادل لتكاليف وفوائد التنمية لجميع من هم على قيد الحياة اليوم.
- احترام وتعزيز الحقوق الأساسية للبشر، بما في ذلك الحريات المدنية والسياسية، والاستقلال الثقافي، والحريات الاجتماعية والاقتصادية، والأمن الشخصي.

- السعي إلى مواصلة التحسينات مع مرور الوقت. التأكد من أن استنزاف الموارد الطبيعية لن يحرم الأجيال القادمة من خلال استبدالها بأشكال أخرى من رأس المال.

### ♦ المجال البيئي

- تعزيز الإدارة المسؤولة للموارد الطبيعية والبيئة، بما في ذلك معالجة الأضرار الماضية.
- تقليل النفايات والأضرار البيئية على طول سلسلة التوريد بكاملها.
- توخي الحذر عندما تكون التأثيرات غير معروفة أو غير مؤكدة.
- العمل ضمن الحدود البيئية وحماية رأس المال الطبيعي الحيوي.

### ♦ مجال الحكومات

- دعم الديمقراطية التمثيلية، بما في ذلك اتخاذ القرارات التشاركية.
- تشجيع المشاريع الحرة ضمن نظام من القواعد والحوافز الواضحة والعادلة.
- تجنب التركيز المفرط للسلطة من خلال الضوابط والتوازنات المناسبة.
- ضمان الشفافية من خلال تزويد جميع أصحاب المصلحة بإمكانية الوصول إلى المعلومات ذات الصلة والدقيقة.
- ضمان المساءلة عن القرارات والإجراءات التي تستند إلى تحليل شامل وموثوق.
- تشجيع التعاون من أجل بناء الثقة والأهداف والقيم المشتركة.
- التأكد من أن القرارات يتم اتخاذها على المستوى المناسب، مع الالتزام بمبدأ التبعية حيثما أمكن ذلك.

وفي عام 2001م، وافق مجلس إدارة المنظمة الممثلة لصناعة المعادن، المجلس الدولي للمعادن والبيئة، على توسيع نطاق ولاية المجموعة وتحويل نفسها إلى

المجلس الدولي للتعدين والمعادن (ICMM). في عام 2002م، وقعت الشركات الأعضاء في ICMM إعلان تورونتو الذي يلزم ICMM بمواصلة العمل الذي بدأه مشروع MMSD والمشاركة في حوار بناء مع أصحاب المصلحة الرئيسيين، وفي عام 2003م، ألزم المجلس الدولي للتعدين والمعادن أعضاء الشركات بتنفيذ وقياس أدائهم مقابل المبادئ العشرة الموضحة فيما يأتي (ICMM, 2006):

- **التنفيذ والحفاظ على الممارسات التجارية الأخلاقية والأنظمة السليمة لحوكمة الشركات**
- تطوير وتنفيذ بيانات الشركة الخاصة بمبادئ العمل الأخلاقية، والممارسات التي تلتزم الإدارة بتنفيذها.
- تنفيذ السياسات والممارسات التي تسعى إلى منع الرشوة والفساد.
- الامتثال لمتطلبات قوانين وأنظمة البلد المضيف أو تجاوزها.
- العمل مع الحكومات والصناعة وأصحاب المصلحة الآخرين لتحقيق السياسات العامة والقوانين واللوائح والإجراءات المناسبة والفعالة التي تسهل مساهمة قطاع التعدين والمعادن والفلزات في التنمية المستدامة ضمن استراتيجيات التنمية المستدامة الوطنية.
- **دمج اعتبارات التنمية المستدامة في عملية صنع القرار في الشركات**
- دمج مبادئ التنمية المستدامة في سياسات الشركة وممارساتها.
- تخطيط وتصميم وتشغيل وإغلاق العمليات بطريقة تعزز التنمية المستدامة.
- تنفيذ الممارسات الجيدة والابتكار لتحسين الأداء الاجتماعي والبيئي والاقتصادي مع تعزيز القيمة للمساهمين.
- تشجيع العملاء وشركاء الأعمال وموردي السلع والخدمات على تبني مبادئ وممارسات مماثلة لتلك الخاصة بنا.

- توفير التدريب على التنمية المستدامة لضمان الكفاءة الكافية على جميع المستويات بين موظفينا وموظفي المقاولين.
- دعم السياسات والممارسات العامة التي تعزز الأسواق المفتوحة والتنافسية.

**◆ دعم حقوق الإنسان الأساسية واحترام الثقافات والعادات والقيم في التعامل مع الموظفين وغيرهم ممن يتأثرون بأنشطتنا**

- ضمان الأجر العادل وظروف العمل لجميع الموظفين وعدم استخدام العمالة القسرية أو الإجبارية أو عمل الأطفال.
- توفير المشاركة البناءة للموظفين في المسائل ذات الاهتمام المشترك.
- تنفيذ السياسات والممارسات المصممة للقضاء على المضايقات والتمييز غير العادل في جميع جوانب أنشطتنا.
- ضمان حصول جميع الموظفين المعنيين، بما في ذلك أفراد الأمن، على التدريب والتوجيه المناسبين في مجال الثقافة وحقوق الإنسان.
- التقليل من عمليات إعادة التوطين القسرية، والتعويض بشكل عادل عن الآثار السلبية على المجتمع عندما لا يمكن تجنبها.
- احترام ثقافة وتراث المجتمعات المحلية، بما في ذلك الشعوب الأصلية.

**◆ تنفيذ استراتيجيات إدارة المخاطر بناءً على البيانات الصحيحة والعلم السليم**

- التشاور مع الأطراف المعنية والمتأثرة في تحديد وتقييم وإدارة جميع الآثار الاجتماعية والصحية والسلامة والبيئية والاقتصادية المهمة المرتبطة بأنشطتنا.
- ضمان المراجعة المنتظمة وتحديث أنظمة إدارة المخاطر.
- إبلاغ الأطراف التي يحتمل أن تتأثر بالمخاطر الكبيرة الناجمة عن عمليات التعدين والمعادن والتدابير التي سيتم اتخاذها لإدارة المخاطر المحتملة بشكل فعال.

- تطوير وصيانة واختبار إجراءات الاستجابة لحالات الطوارئ الفعالة بالتعاون مع الأطراف المتضررة المحتملة.

### السعي إلى التحسين المستمر لأدائنا في مجال الصحة والسلامة

- تنفيذ نظام إدارة يركز على التحسين المستمر لجميع جوانب العمليات التي يمكن أن يكون لها تأثير كبير على صحة وسلامة موظفينا، وموظفي المقاولين والمجتمعات التي نعمل فيها.
- اتخاذ جميع التدابير العملية والمعقولة للقضاء على الوفيات والإصابات والأمراض في مكان العمل بين موظفينا وموظفي المقاولين.
- تزويد جميع الموظفين بالتدريب في مجال الصحة والسلامة، ومطالبة موظفي المقاولين بالخضوع لمثل هذا التدريب.
- تنفيذ المراقبة الصحية المنتظمة والرصد على أساس المخاطر للموظفين.
- إعادة تأهيل الموظفين وإعادة دمجهم في العمليات بعد المرض أو الإصابة، حيثما أمكن ذلك.

### السعي إلى التحسين المستمر لأدائنا البيئي

- تقييم التأثيرات البيئية الإيجابية والسلبية، المباشرة وغير المباشرة، والتراكمية للمشاريع الجديدة – بدءًا من الاستكشاف وحتى الإغلاق.
- تنفيذ نظام إدارة بيئية يركز على التحسين المستمر لمراجعة الآثار البيئية الضارة أو منعها أو تخفيفها أو تحسينها.
- إعادة تأهيل الأراضي المضطربة أو المشغولة بالعمليات بما يتوافق مع الاستخدامات المناسبة للأراضي بعد التعدين.
- توفير التخزين الآمن والتخلص من النفايات المتبقية ومخلفات العمليات.

- تصميم وتخطيط جميع العمليات بحيث تتوفر الموارد الكافية لتلبية متطلبات الإغلاق لجميع العمليات.

◆ المساهمة في الحفاظ على التنوع البيولوجي والمناهج المتكاملة لتخطيط استخدامات الأراضي

- احترام المناطق المحمية المحددة قانونًا.
- نشر البيانات العلمية وتعزيز الممارسات والخبرات في مجال تقييم وإدارة التنوع البيولوجي.
- دعم تطوير وتنفيذ إجراءات سليمة علميًا وشاملة وشفافة للنهج المتكاملة لتخطيط استخدام الأراضي والتنوع البيولوجي والحفظ والتعدين.

◆ تسهيل وتشجيع تصميم المنتجات المسؤولة واستخدامها وإعادة استخدامها وإعادة تدويرها والتخلص منها

- الفهم المتقدم لخصائص الفلزات والمعادن وتأثيراتها على دورة حياتها على صحة الإنسان والبيئة.
- إجراء أو دعم البحث والابتكار الذي يشجع على استخدام المنتجات والتقنيات الآمنة والفعالة في استخدامها للطاقة والموارد الطبيعية والمواد الأخرى.
- تطوير وتعزيز مفهوم الإدارة المتكاملة للمواد في جميع أنحاء سلسلة قيمة المعادن والمعادن.
- تزويد الجهات التنظيمية وأصحاب المصلحة الآخرين بالبيانات والتحليلات السليمة علميًا فيما يتعلق بمنتجاتنا وعملياتنا كأساس للقرارات التنظيمية.
- دعم تطوير السياسات واللوائح ومعايير المنتجات وقرارات اختيار المواد السليمة علميًا والتي تشجع الاستخدام الآمن للمنتجات المعدنية.

◆ المساهمة في التنمية الاجتماعية والاقتصادية والمؤسساتية للمجتمعات التي نعمل فيها

- المشاركة في أقرب مرحلة عملية مع الأطراف المتضررة المحتملة لمناقشة القضايا والصراعات المتعلقة بإدارة التأثيرات الاجتماعية والاستجابة لها.

- ضمان وجود أنظمة مناسبة للتفاعل المستمر مع الأطراف المتضررة، والتأكد من أن الأقليات والفئات المهمشة الأخرى لديها وسائل مشاركة عادلة ومناسبة ثقافيًا.
- المساهمة في تنمية المجتمع من تطوير المشروع حتى الإغلاق بالتعاون مع المجتمعات المضيفة وممثليهم.
- تشجيع الشراكات مع الحكومات والمنظمات غير الحكومية لضمان تصميم البرامج (مثل الصحة المجتمعية والتعليم وتطوير الأعمال المحلية) بشكل جيد وتنفيذها بفعالية.
- تعزيز التنمية الاجتماعية والاقتصادية من خلال البحث عن فرص لمعالجة الفقر.
- **تنفيذ ترتيبات المشاركة والتواصل الفعالة والشفافة وترتيبات إعداد التقارير التي تم التحقق منها بشكل مستقل مع أصحاب المصلحة لدينا**
- تقرير عن أدائنا الاقتصادي والاجتماعي والبيئي ومساهمتنا في التنمية المستدامة.
- توفير المعلومات في الوقت المناسب ودقيقة وذات صلة.
- المشاركة مع أصحاب المصلحة والاستجابة لهم من خلال عمليات التشاور المفتوحة.

في البداية كان هناك جدل كبير في مجتمع التعدين فيما يتعلق بمفاهيم الاستدامة كما هي مطبقة على استخراج المعادن (NWMA, 2002). ويرى البعض أنه نظرًا لأن الموارد المعدنية محدودة بطبيعتها، فإن استخراج المعادن لا يمكن أن يكون مستدامًا فعلًا. ومع ذلك، فقد تم اعتماد هذه المفاهيم بشكل عام من قبل معظم صناعة التعدين، وهي تؤثر على ممارسات الشركات في جميع مجالات نشاط التعدين.

# نظم الإدارة البيئية في التعدين

يوفر معيار ISO 14001، الصادر في عام 2004م، معايير يمكن من خلالها لمجتمع أو منظمة أن يضع وينفذ سلسلة من الممارسات والإجراءات التي، عندما تؤخذ معًا، تؤدي إلى نظام الإدارة البيئية (EMS). يعد نظام الإدارة البيئية جزءًا من نظام الإدارة الأكبر للمؤسسة. يتم استخدام نظام الإدارة البيئية لوضع سياسة بيئية وإدارة الجوانب البيئية لأنشطة المنظمة ومنتجاتها وخدماتها.

نظام الإدارة عبارة عن شبكة من العناصر المترابطة التي تشمل المسؤوليات والسلطات والعلاقات والوظائف والعمليات والإجراءات والممارسات والموارد. يستخدم نظام الإدارة هذه العناصر لوضع السياسات والأهداف وتطوير طرق تطبيق هذه السياسات وتحقيق هذه الأهداف. معيار ISO 14001 عبارة عن وثيقة مفصلة تتكون من عدة صفحات. وهو يصف المتطلبات النظامية والسياسية والتخطيطية والتشغيلية والامتثالية. إن ISO 14001 ليس معيارًا فنيًا وبالتالي لا يحل بأي حال من الأحوال محل المتطلبات الفنية المنصوص عليها في القوانين أو اللوائح. كما أنها لا تضع معايير محددة للأداء للمنظمات. ومع ذلك، أصبحت شهادة ISO أو ما يعادلها عنصرًا حاسمًا للقبول من قبل الوكالات البيئية والمنظمات غير الحكومية ومنظمات التمويل.

## • إعداد التقارير البيئية

يعد نقل المعلومات أمرًا بالغ الأهمية في جميع مراحل مشروع التعدين. يجب أن يكون جميع الأشخاص والمؤسسات المهتمين بكيفية تنفيذ المشروع على علم جيد بالخطط الجارية للمشروع والتقدم المحرز فيه. تناولت MMSD مسألة الوصول إلى المعلومات في تقرير بعنوان «فتح آفاق جديدة» (MMSD 2002):

يعد تدفق المعلومات أمرًا ضروريًا في مجتمع أصحاب المصلحة المستدام. تأتي المعلومات بأشكال مختلفة وذات جودة متفاوتة. يتم استخدام المعلومات المتعلقة بالشركة وعملياتها من قبل مجموعة من الجهات الفاعلة، مثل المجتمعات والمستثمرين والموظفين والمقرضين والموردين والعملاء، وغالبًا ما يتم ذلك من خلال إجراءات المحاسبة وإعداد التقارير المناسبة بناءً على مؤشرات وتقنيات قياس محددة. وفي الصناعة، تستخدم الإدارة المعلومات لمراقبة كفاءة الأداء وتأثيرات العمليات. وفي مرحلة الاستكشاف، تعد البيانات والخرائط الجيولوجية العلمية الدقيقة أمرًا بالغ الأهمية. عقدت مجموعة العمل التي أعدت مبادرة «فتح آفاق جديدة» ورشة عمل في عام 2001م في فانكوفر. أتاحت ورشة العمل الفرصة لمناقشة المعلومات المستخدمة في إعداد التقرير ودراسة كيفية عرض هذه المعلومات ومعالجتها من قبل صناعة التعدين. وقد تم التوصل إلى أن المعلومات غالبًا ما تفشل في التدفق إلى المجتمعات في الوقت المناسب وبطريقة شفافة، وأن ممارسات الكشف غالبًا ما تكون أقل من أفضل الممارسات الحالية، وأن أنظمة الإبلاغ العامة ذات المقاس الواحد الذي يناسب الجميع أو معيار الإبلاغ العالمي سيكون بمثابة الحل الأمثل. مبادرة صعبة جدًا للتطوير. إن الطبيعة المميزة للمناجم والمشاريع والشركات والمواقع والمجتمعات المحددة تعني أن هناك حاجة إلى مزيج مختلف من المؤشرات والمقاييس والتقييمات. إحدى الطرق الفعالة لتحديد مدى الحاجة إلى المعلومات حول أي مشروع هي سؤال المجتمع عما يحتاج إلى معرفته عند النظر في مقترحات المشاريع.

يتضمن معيار ISO 14001 الإفصاح كنتيجة لأنظمة التدقيق والإدارة البيئية. يتناول المعيار بشكل أساسي أنظمة الإدارة البيئية الداخلية. تشير بعض العناصر ضمن المعيار بشكل عام إلى الاتصالات الخارجية كجزء من أنظمة الإدارة البيئية الخاصة بالمؤسسة. هناك أيضًا مبادرات تطوعية لتوحيد الطريقة التي تنقل بها الشركات المعلومات. وكانت مبادرة إعداد التقارير العالمية (GRI) هي الأكثر

دراسة عن كثب من قبل MMSD. تم عقده في عام 1997م من قبل تحالف الاقتصادات المسؤولة بيئيًا «لجعل تقارير الاستدامة روتينية وذات مصداقية مثل التقارير المالية من حيث القابلية للمقارنة والدقة وإمكانية التحقق» من خلال «تصميم ونشر وتعزيز ممارسات إعداد التقارير الموحدة والقياسات الأساسية والقطاعات المخصصة».

تقترح إرشادات إعداد تقارير الاستدامة الخاصة بمبادرة الإبلاغ العالمية (GRI) أن تتضمن التقارير بيانًا للرئيس التنفيذي؛ والمؤشرات الرئيسية؛ ولمحة عن الكيان المبلغ؛ والسياسات والتنظيم وأنظمة الإدارة؛ وأداء الإدارة؛ والأداء التشغيلي وأداء المنتج؛ ونظرة عامة على الاستدامة (GRI, 2009).

## • الممارسات البيئية السليمة

قبل مناقشة الأنشطة الفردية المتعلقة بالتعدين، من المهم الإشارة إلى أنه بشكل عام، ينبغي إجراء أنشطة التعدين مع أخذ المستقبل في الاعتبار. ولن يؤدي ذلك إلى تقليل الآثار البيئية لكل نشاط فحسب، بل سيؤدي أيضًا إلى توفير كبير في التكاليف. سيؤدي هذا النهج إلى بعض الاعتبارات الواسعة جدًا والتي تنطبق على جميع المشاريع تقريبًا. على سبيل المثال:

- ينبغي أن يكون المسؤولون الحكوميون وجميع المقيمين في منطقة المنجم المقترح على علم جيد بجميع خطط المشروع وأن يشاركوا فيها بشكل مباشر منذ البداية. ستساعد مثل هذه المشاركة في معالجة مخاوف السكان المحليين عند حدوثها وقد تؤدي إلى تجنب الاعتراضات الرسمية عند تقديم طلبات الحصول على التصاريح.
- ينبغي أن تتضمن خطة التعدين الشاملة النظر في متطلبات الاستصلاح والترميم. ينبغي التخطيط بعناية لوضع أكوام النفايات وبرك المخلفات والمواد

المماثلة لتقليل إعادة معالجة المواد. وفي الوقت نفسه، ستكون الاعتبارات الأخرى خاصة بمشروع معين. على سبيل المثال:

- يجب أن يأخذ تصميم وموقع الطرق المطورة للاستكشاف في الاعتبار الاحتياجات المستقبلية للتعدين والمعالجة. سيؤدي ذلك إلى تقليل بناء الطرق غير الضرورية وتقليل التأثيرات على النظام البيئي المحلي.

- عندما تكون برك الاحتواء مطلوبة لسوائل الحفر أو القطع، ينبغي النظر في الاستخدام المستقبلي لتلك البرك لحجز المخلفات، أو تجميع مياه الأمطار، أو برك الترسيب. وينبغي التخطيط لعملية التعدين بدقة، بالتشاور مع الوكالات الحكومية والأشخاص الذين يعيشون في المنطقة. وينبغي تحديد الموارد التاريخية والثقافية والبيولوجية، ووضع الخطط لحمايتها. وهذا مهم بشكل خاص في المناطق التي لا يتعرض فيها السكان الأصليون إلا قليلًا للتقنيات المستخدمة في التعدين. وينبغي لشركات التعدين أن تتخذ الخطوات المناسبة لضمان فهم السكان الأصليين لخطط التعدين.

يجب فهم قيم الشعوب الأصلية وممارسات استخدام الأراضي، ويجب اتخاذ خطوات لحمايتها. وفي بعض المواقع، سيتطلب ذلك مشاركة علماء الأنثروبولوجيا وعلماء الاجتماع وخبراء آخرين. وقد يتطلب الأمر أيضًا عملية تخطيط وموافقة تختلف عن تلك التي اعتادت عليها الشركة. على سبيل المثال، تتخذ بعض الشعوب الأصلية قراراتها بتوافق الآراء الجماعي، مما يستلزم عقد اجتماعات مجتمعية كبيرة قد تستمر لعدة أيام.

## • تطويـــر المناجـــم

التنمية هي إعداد المرافق والمعدات والبنية التحتية اللازمة لاستخراج المواد المعدنية القيمة. ويشمل ذلك حيازة الأراضي، واختيار المعدات ومواصفاتها، وتصميم وبناء البنية التحتية والمرافق السطحية، والتخطيط البيئي والتراخيص، والتخطيط الأولي للمناجم. قدم الباحث هانت (1992م) قائمة مرجعية مفيدة لمشاريع تطوير المناجم في شكل استبيان. في حين أن بعض جوانب هذه القائمة خاصة بالعمليات في الولايات المتحدة، فإن اتساعها وتفاصيلها تجعلها موردًا مفيدًا لأي مشروع تعدين تقريبًا. ويتضمن اعتبارات للمشاريع في المناطق التي لم يحدث فيها تعدين، وللمشاريع في المناطق المعدنة سابقًا، ولمشاريع التوسع في المناجم العاملة. البنية التحتية والمرافق السطحية للتصميم والبناء قد تشمل البنية التحتية والمرافق السطحية كل ما يلي:

- الطرق والسكك الحديدية.
- محطات توليد الكهرباء وخطوط الكهرباء والمحطات الفرعية.
- خطوط إمداد الوقود ومزارع الصهاريج.
- السدود والتحويلات والخزانات وحقول آبار المياه الجوفية وخطوط إمدادات المياه وخزانات المياه ومحطات معالجة المياه.
- خطوط الصرف الصحي ومحطات معالجة الصرف الصحي.
- أماكن الصيانة.
- حظائر التخزين والمستودعات.
- مباني المكاتب، ومواقف السيارات، ومرافق الاستحمام، وغرف تغيير الملابس.
- سكن العمال (السكن والكافتيريا والمستوصف والمرافق الترفيهية).

- منازل للمضخات والمراوح والرافعات.
- أكوام النفايات والحجز.
- برك لتجميع المياه السطحية والجوفية، وتصريف المناجم.
- مدافن النفايات الصناعية والمنزلية.

◆ **تنطبق ستة اعتبارات بيئية عامة على تصميم وبناء المرافق السطحية والبنية التحتية:**

- اختيار مواقع الهياكل السطحية والبنية التحتية لتقليل آثار إنشائها واستخدامها على المياه السطحية والمياه الجوفية والنظم البيئية النباتية والحيوانية والمساكن البشرية القريبة. وتشمل الهياكل السطحية والبنية التحتية الطرق والسكك الحديدية وخطوط الكهرباء، على سبيل المثال.
- إزالة التربة السطحية وتخزينها للاستخدام المستقبلي من المناطق التي سيتم استصلاحها لاحقًا.
- التحكم في الجريان السطحي بحيث يتم التقاط المياه الخارجة من حدود موقع التعدين المسموح به ومعالجتها على النحو المطلوب للوفاء بمعايير التصريف المعمول بها. تسمح العديد من الولايات القضائية بالمناجم كمرافق خالية من التصريف، مما يعني أن جميع المياه أو النفايات الصلبة موجودة داخل منطقة المنجم المسموح بها.
- حماية المياه السطحية والأراضي الرطبة. ونظرًا لأن هذه المعالم قد توجد مباشرة فوق الاحتياطيات المعدنية، فقد يكون نقلها ضروريًا.
- إعادة زراعة المناطق المضطربة. إعادة تشكيل الأرض وفقًا لمعايير محددة وإعادة الغطاء النباتي باستخدام مزيج معتمد من البذور والمزروعات.

- التحكم في انبعاثات الغبار والضوضاء لتلبية متطلبات اللوائح المحلية والتوقعات المعقولة للأشخاص الذين يعيشون في مكان قريب. وعلى وجه الخصوص، في حالة استخدام المتفجرات، يمكنك التحكم في انفجار الهواء والاهتزاز الأرضي كما هو مطلوب.

**تشمل الاعتبارات المحددة لبعض المرافق السطحية أو البنية التحتية ما يلي:**

- ينبغي تصميم ورش الصيانة بطريقة تمنع تلوث التربة والمياه بالوقود المسكوب ومواد التشحيم.
- ينبغي تصميم المرافق السطحية بحيث تقلل من استهلاك الطاقة، وذلك باستخدام تسخين المياه بالطاقة الشمسية وتوليد الطاقة الكهربائية البديلة حيثما أمكن ذلك.
- يجب أيضًا تصميم المرافق السطحية بشكل معماري لتتناغم مع البيئة الطبيعية المحيطة بالمنطقة.

# التعدين و قضايا المجتمع

أدى إدخال مصطلح «الحد الأدنى الثلاثي» (Elkington, 1997) وتطبيقه في سياق الإبلاغ عن الاستدامة إلى تحديد القضايا الاجتماعية أو المجتمعية كفئة منفصلة عن القضايا البيئية أو الاقتصادية ضمن إطار التنمية المستدامة. ومع ذلك، في الواقع، تركز معظم المجتمعات بشكل كبير على جميع جوانب تطوير التعدين ولا تفصل بالضرورة هذه القضايا إلى فئات مرتبة.

فكر في مجتمع تقليدي بعيد يعتمد على الممر المائي المحلي لصيد الأسماك وكذلك للعبادة والمراسم الروحية. وقد يفسرون أهمية المياه لبقائهم وتقاليدهم وعائلاتهم ومستقبلهم، معتبرين أن هذه الجوانب مترابطة بدلًا من فصلها. وعلى الرغم من وجود طرائق مختلفة لفهم هذه الديناميكيات، إلا أن الجوانب البيئية أو الاقتصادية غالبًا ما تكون محور الاهتمام الرئيسي.

وقد أصبحت بعض المواضيع بارزة بشكل خاص في العقد الماضي، ويرجع ذلك جزئيًا إلى مبادرات مثل مشروع MMSD ولكن أيضًا بسبب مجموعة من الدوافع الأخرى. وقد سبق ذكر بعض هذه الأمور، مثل «التنظيم الاجتماعي» الناشئ في شكل تشريعات، ومبادرات تطوعية، وضغوط من المنظمات غير الحكومية والمجتمع المدني.

وفي السنوات الأخيرة، تم سحب استثمارات بعض صناديق الاستثمار عمدًا من الشركات الكبرى في صناعة المعادن بسبب المخاوف بشأن المخاطر الاجتماعية. العديد من هذه القضايا، التي أصبحت محور اهتمام مختلف المجموعات والمنظمات، سيتم استكشافها بإيجاز في الفقرات اللاحقة.

## • النمـــو الاقتصـــادي

لقد كان التأثير الإيجابي لمشاريع التعدين على الاقتصادات المحلية والإقليمية والوطنية دائمًا حجة يستخدمها المؤيدون لدعم التطورات الجديدة. في المقابل، تشير فرضية «لعنة الموارد» إلى أن البلدان التي تتمتع بمستويات عالية من الموارد الطبيعية تعاني في الواقع من معدلات نمو اقتصادي أقل من تلك التي تتمتع باقتصادات أكثر تنوعًا، مما يعني في الواقع مفارقة الوفرة.

تدعم الكثير من الأبحاث الحجج المؤيدة والمعارضة لهذا الاقتراح، ومن الأمثلة على ذلك مبادرة الموارد التي تشمل ICMM، ومؤتمر الأمم المتحدة للتجارة والتنمية، والبنك الدولي (ICMM, 2006). وخلصت هذه الدراسة إلى أن الاستثمار في التعدين يوفر فرصًا للنمو الاقتصادي، والحد من الفقر، والمشاركة في الاقتصاد العالمي، مع الإشارة إلى أمثلة محددة مثل شيلي وبوتسوانا حيث تزامنت زيادة الاستثمار في التعدين مع تحسن النمو الاقتصادي الوطني.

ومع ذلك، فقد أكد أيضًا على الحاجة إلى أنظمة حوكمة فعالة وشفافة لإدارة الثروة المعدنية. لقد كان نقل بعض الفوائد من الضرائب إلى المناطق التي تقع فيها المناجم موضوعًا لبعض الخلاف في العديد من البلدان مثل بيرو، على سبيل المثال، حيث نشأت العديد من المشاكل نتيجة للتغييرات في التشريعات (Arellano-Yanguas 2008).

وفي السنوات الأخيرة، ركزت المزيد من الأبحاث على التأثيرات الاقتصادية على المستويين المحلي والإقليمي. بدأت الشركات حاليًا في الإبلاغ عن مقدار القيمة المضافة المرتبطة بالأجور وشراء السلع والخدمات لعمليات التعدين التي تبقى على المستويين المحلي والإقليمي.

على سبيل المثال، راجع المؤشرات الاقتصادية في المبادئ التوجيهية لإعداد تقارير الاستدامة وملحق قطاع التعدين والمعادن (Global Reporting Initiative, 2009). بالإضافة إلى ذلك، يتم توجيه مساهمة الشركة في أنشطة تنمية المجتمع إلى النشاط الاقتصادي المحلي المتنامي، مع التركيز في كثير من الأحيان على الأعمال غير المتعلقة بالتعدين، من أجل توفير مستقبل ما بعد الإغلاق. ومع ذلك، فإن التدفقات النقدية الإضافية التي يتم ضخها في الاقتصادات المحلية يمكن أن يكون لها آثار سلبية أيضًا، كما هو الحال في شكل تضخم غير متناسب، على سبيل المثال. ويمكن أن ينطبق هذا بالتساوي في السياقات الأقل نموًا حيث يمكن أن تتغير اقتصادات السوق بشكل كبير من خلال إدخال أجور صناعة التعدين، وكذلك الاقتصادات المتقدمة حيث يمكن أن تؤدي توسعات الصناعة إلى تشوهات في أسواق العقارات والعمل، مع ما يترتب على ذلك من آثار على قطاعات أخرى من المجتمع.

## • صحة المجتمع

هناك العديد من الطرائق التي يمكن لعمليات التعدين أن تؤثر من خلالها على مجال صحة المجتمع. التغيرات السكانية بما في ذلك الهجرة الداخلية في البلدان النامية مثل بابوا غينيا الجديدة يمكن أن تكون مسؤولة عن انتشار الأمراض مثل فيروس نقص المناعة البشرية والسل. أصدر المجلس الدولي للتعدين مؤخرًا تقريرًا بعنوان إرشادات الممارسات الجيدة بشأن فيروس نقص المناعة البشرية/الإيدز والسل والملاريا (ICMM, 2008) لأعضائه، مما يعكس حدوث فيروس نقص المناعة البشرية في القوى العاملة في مجال التعدين والمجتمعات المحلية في أجزاء مختلفة من العالم. يمكن أن تأتي التأثيرات الصحية المباشرة الأخرى من الانبعاثات الناتجة عن عمليات المعالجة، مثل ارتفاع مستويات الرصاص في الدم الموجودة في المجتمعات الواقعة بالقرب من مصاهر الرصاص القديمة في عدة قارات.

وقد تطورت خلافات محلية حول الآثار الصحية المحتملة لعمليات التخلص من المخلفات النهرية والبحرية مثل تلك التي تتم في ماريندوك في الفلبين وميناهاسا في إندونيسيا، على سبيل المثال. وقد اجتذبت كلتا الحالتين اهتمامًا دوليًا كبيرًا. ومن ناحية أخرى، فإن تطوير التعدين غالبًا ما يكون مسؤولًا عن إنشاء البنية التحتية والخدمات الصحية في المناطق النائية. على الرغم من الآثار البيئية المرتبطة بالنفايات النهرية والتخلص من المخلفات في منجم أوك تيدي في بابوا غينيا الجديدة، أدت حملة مكافحة الملاريا والعيادات الصحية التي قدمتها الشركة إلى المجتمعات المعزولة القريبة من المنجم إلى تحسينات كبيرة جدًا في وفيات الرضع وإحصاءات متوسط العمر المتوقع في تلك المناطق.

وقد حققت حملة أطلقتها شركة تعدين للقضاء على داء الفيلاريات في جزيرة ميسيما في البلد نفسه نتائج مثيرة للإعجاب بشكل مماثل، وهناك العديد من الأمثلة في أفريقيا على مشاركة مماثلة في الحملات الإقليمية لمكافحة الملاريا. في حين أن مثل هذه المبادرات تمثل على أحد المستويات إجراءً للحد من المخاطر بالنسبة للقوى العاملة في الشركة، فإنها غالبًا ما تمتد إلى ما هو أبعد من المستوى المطلوب للتخفيف المحض.

## • الأمـــن وحقـــوق الإنســـان

لقد تزايدت قوة خطاب حقوق الإنسان في الآونة الأخيرة، وكذلك الدعوات الموجهة إلى الشركات، وخاصة الشركات المتعددة الجنسيات، لضمان ألا تؤدي أنشطتها إلى الإضرار بحقوق الآخرين. المرجع الدولي الرئيسي لحقوق الإنسان هو ميثاق الحقوق، الذي يتضمن الإعلان العالمي لحقوق الإنسان الصادر عن الأمم المتحدة، والذي أعلنته الجمعية العامة للأمم المتحدة في عام 1948م، والعهدين: العهد الدولي الخاص بالحقوق المدنية والسياسية، والعهد الدولي

الخاص بالحقوق المدنية والسياسية. والعهد الدولي الخاص بالحقوق الاقتصادية والاجتماعية والثقافية. وبما أن عناصر مشروع القانون يتم التصديق عليها من قبل الحكومات، وليس الشركات، لم يكن من الواضح كيف تُمنح مسؤوليات حقوق الإنسان للشركات، لا سيما تلك التي تعمل على أساس عابر للحدود الوطنية، بما في ذلك ما إذا كان ينبغي مساءلة الشركات عن أفعالها في حالة انتهاكها لحقوق الإنسان وكيفية ذلك.

وتعني طبيعة الأعمال التجارية العالمية أنه غالبًا ما يكون من الصعب تطبيق قوانين البلد الأصلي على الشركات العاملة في الخارج، على الرغم من وجود محاولات في كل من كندا وأستراليا لإدخال تشريعات تركز بشكل خاص على شركات التعدين في هذا المجال. علاوة على ذلك، ربما لم تدرج قوانين بعض البلدان المضيفة حقوق الإنسان في القانون، أو قد تكون لديها أطر تشريعية ضعيفة أو غير فعالة تفشل في مساءلة الشركات عن انتهاكات حقوق الإنسان. وبينما يستمر النقاش حول مسؤوليات الشركات في مجال حقوق الإنسان، أوضح تقرير حديث صادر عن الممثل الخاص للأمين العام للأمم المتحدة الأدوار المختلفة والمتكاملة للحكومات والشركات فيما يتعلق بحقوق الإنسان (Ruggie, 2008).

ويحدد الإطار المكون من ثلاثة أجزاء ثلاثة مبادئ رئيسية: واجب الدولة في الحماية، ومسؤولية الشركات عن الاحترام، والوصول إلى سبل الانتصاف. وبموجب الولاية التي تم تمديدها مؤخرًا، سوف يحظى «تفعيل» الإطار باهتمام خاص. وفي صناعة التعدين، تُثار حقوق الإنسان في أغلب الأحيان في سياق استخدام قوات الأمن لحماية عمليات التعدين، وهو الأمر الذي كان مثيرًا للجدل بشكل خاص في المناطق العسكرية. كانت السلامة وظروف العمل أيضًا موضوعًا لتدقيق مكثف. ويجري لفت الانتباه أيضًا إلى قضايا حقوق الإنسان

المرتبطة بالآثار البيئية، لا سيما إذا كانت المناجم تؤثر على قدرة المجتمعات المحلية على إنشاء سبل عيش مستدامة، فضلًا عن عدد من الآثار الأخرى المرتبطة بالحقوق، مثل التأثير على الثقافة (على سبيل المثال، إذا كان وتتأثر المواقع المقدسة بأنشطة التعدين، والتمييز في مكان العمل، والحق في مستوى معيشي لائق). وبينما يتم لفت الانتباه في كثير من الأحيان إلى الآثار السلبية التي تحدثها المناجم على المجتمعات المحلية، فمن الضروري أيضًا الاعتراف بأن الشركات تساعد في دعم مجموعة متنوعة من حقوق الإنسان في أعمالها اليومية. فمساهمتهم في النمو الاقتصادي، على سبيل المثال، يمكن أن توفر الدعم اللازم للوفاء بمختلف الحقوق الاقتصادية والاجتماعية والثقافية. كما يساعد التخفيف المسؤول من الآثار البيئية، والتشاور الوثيق مع المجتمعات المحلية، وإجراءات التوظيف في دعم أنواع مختلفة من الحقوق (ICMM, 2009). وكثيرًا ما يتم التعدين، مثل العديد من الأنشطة الاقتصادية الأخرى، دون مراعاة حقوق ومصالح الشعوب الأصلية التي توجد الموارد في أراضيها. على مدى العقود القليلة الماضية، تم الاعتراف بالشعوب الأصلية كفئة متميزة من المجتمعات البشرية بموجب القانون الدولي، وبدرجات متفاوتة، في القانون الوطني أيضًا. وقد أدى اعتماد إعلان الأمم المتحدة بشأن حقوق الشعوب الأصلية في عام 2007م إلى زيادة التركيز على هذا المجال. وشملت الأضرار التي تعاني منها الشعوب الأصلية نتيجة للممارسات السيئة، التجريد من الملكية والنقل القسري، وتدمير المواقع ذات الأهمية الثقافية، وفقدان سبل العيش، والتعرض للأمراض و«الرذائل الاجتماعية» مثل الكحول والدعارة، وفي الحالات القصوى، الانهيار الثقافي والاجتماعي الشامل.

## • المشاركة المجتمعية والتنمية

تشمل المصطلحات الشائعة للعمليات التي تقوم بها شركات التعدين لفهم ومعالجة قضايا المجتمع كلًا من مشاركة المجتمع وتنمية المجتمع. عادةً ما يتم إجراء المشاركة المجتمعية حتى تتمكن الشركة من فهم وجهات نظر المجتمع بشكل أفضل. أصبحت مشاركة المجتمع مطلوبة بشكل متزايد بموجب التشريعات، وفي أغلب الأحيان كجزء من عمليات الموافقة على المشاريع. ويمكن أيضًا القيام بذلك طوعًا، كجزء من تطوير علاقات جيدة مع المجتمعات المحلية أو المضيفة.

إن المشاركة المجتمعية ليست جديدة، بمعنى أن شركات التعدين تتفاعل دائمًا مع مجموعة من المجموعات حول عمليات التعدين. ومع ذلك، في الآونة الأخيرة، أصبحت النقطة المحورية والأساس المنطقي للمشاركة المجتمعية تندرج بشكل متزايد تحت شعار التنمية المستدامة وتم ربطها بمجموعة أوسع من القضايا مما تم النظر فيه سابقًا. تركز تنمية المجتمع على احتياجات وتطلعات المجتمع. تهتم تنمية المجتمع بقضايا العدالة الاجتماعية وحقوق الإنسان وتمكين جميع الفئات في المجتمع، بما في ذلك الفئات الأكثر ضعفًا.

يمكن أن تساهم تنمية المجتمع في إدارة الآثار الاجتماعية لمشروع التعدين، ولكن هذا ليس محور التركيز الأساسي. تعد المشاركة الفعالة أمرًا ضروريًا لتنمية المجتمع، لكن تنمية المجتمع لا تتدفق تلقائيًا من المشاركة. تميل صناعة التعدين إلى تقديم تنمية المجتمع كشكل «ناضج» من ممارسة مشاركة أصحاب المصلحة. والمرجع المشترك في هذا المجال هو نطاق المشاركة العامة الذي طورته الرابطة الدولية للمشاركة العامة (IAP2, 2009)، والذي يُظهر التقدم من الإعلام والتشاور إلى التعاون وتمكين المجتمعات المحلية. وبموجب هذا النموذج،

تعتبر تنمية المجتمع مشاركة «عالية المستوى» مقارنة بالعلاقات العامة، التي تركز أكثر على سمعة الشركة من خلال الاتصال الرسمي ونشر المعلومات. هناك عدة مراحل في حياة المنجم، بدءًا من الاستكشاف وتطوير المشروع وحتى البناء وعمليات الاستخراج والإغلاق. بطرائق مختلفة، اعتمادًا على السياق، تعد مشاركة المجتمع وتنميته أمرًا مهمًا وذو صلة.

الاستكشاف مهم من حيث إقامة علاقات مبكرة. هذه المرحلة تهيئ المشهد للمستقبل. وبحلول الوقت الذي يبدأ فيه تطوير المشروع، ينبغي أن يكون هناك حوار مستمر بين الشركة والمجتمع، وإجراء العديد من الدراسات والتقييمات لتحديد التأثيرات المحتملة والفوائد التي قد تحدث، ومناقشة الاستراتيجيات إما لتخفيف التأثير أو زيادة والاتفاق عليها. يمكن أن تؤدي مرحلة البناء إلى تغييرات وتأثيرات كبيرة على المجتمعات المحلية. ويظل الحوار المنتظم مهمًا في هذه المراحل. في كثير من الأحيان، فقط بعد بدء العمليات يتم جني الأرباح ويبدأ تدفق أموال كبيرة. غالبًا ما تصبح تنمية المجتمع محورًا رئيسيًا في هذه المرحلة، ولكن أسس التنمية الجيدة يتم وضعها بشكل مثالي منذ بداية دورة حياة المشروع. ينبغي مناقشة اعتبارات الإغلاق وما بعد الإغلاق منذ البداية. إذا نجحت تنمية المجتمع، فسيكون المجتمع في وضع جيد للتعامل مع التغييرات التي قد يجلبها الإغلاق. تميل صناعة التعدين إلى استخدام تنمية المجتمع لوصف الأنشطة التي يتم تنفيذها بشكل مباشر أو غير مباشر مع المجتمعات الواقعة على مقربة جغرافية من العمليات التي تهدف إلى تحقيق نتائج اقتصادية و/أو بيئية و/أو اجتماعية إيجابية لتلك المجتمعات.

تستخدم بعض الشركات أيضًا مصطلحات مثل «البرامج المجتمعية» و «دعم المجتمع» و «الاستثمار الاجتماعي». يختلف مجال النشاط من موقع إلى آخر، اعتمادًا على السياق وحجم العملية والسلعة وتأثير العملية والتوقعات

الاجتماعية والسياسية المختلفة. تميل الأنشطة المدرجة عادة في تقارير الاستدامة في إطار تنمية المجتمع إلى تضمين العمالة المحلية (المباشرة أو غير المباشرة من خلال توفير السلع والخدمات)، والتدريب وتنمية المهارات، وتوفير البنية التحتية (مثل الطرق والمياه ومرافق الصرف الصحي)، وتقديم الخدمات (مثل الصحة والتعليم)، والعمل التطوعي للموظفين، والتبرعات، والفرص غير المتعلقة بالتعدين (مثل برامج بناء القدرات والتمكين).

ومع ذلك، في كثير من الأحيان ليست الأنشطة نفسها هي التي تشير إلى تنمية المجتمع، ولكن العمليات المستخدمة. يمكن لبرنامج التوظيف أن يخدم أهداف الشركة، ولكن إذا تم توجيهه وتمكينه من قبل المجتمع، فيمكنه أيضًا تلبية احتياجات وتطلعات المجتمع المحلي. العملية هي مفتاح التنمية المجتمعية الناجحة (Evans, & Kemp, 2011).

## • الآثار الاجتماعية للتعدين

يمكن للتعدين أن يخلق فرص عمل، ويعزز الاقتصادات، ويوفر الاستثمار لمشاريع التنمية المحلية. ومع ذلك، فإن عمليات التعدين التي لا تحترم حقوق الإنسان أو تحمي البيئة يمكن أن تسبب ضررًا كبيرًا للمجتمعات المحيطة.

تتفاقم الآثار السلبية للتعدين عندما لا يتم استشارة السكان المحليين أو عدم إعطائهم معلومات شفافة حول منجم مقترح. غالبًا ما تعطل الألغام أراضي وحياة مجتمعات السكان الأصليين، الذين يعيشون في موقع التعدين المقترح منذ أجيال. بالنسبة للسكان الأصليين، تعد الموافقة الحرة والمسبقة والمستنيرة حقًا بموجب القانون الدولي وهي ضرورية لحماية الأراضي المقدسة والهوية الثقافية. تتأكد شركات التعدين من موافقة أصحاب الأراضي التقليديين على عملية التعدين، ومن إتاحة الفرصة لهم للاستفادة من عملياتها. تساعد منظمة أوكسفام المجتمعات على المشاركة بشكل هادف في المشاورات مع شركات التعدين من خلال تزويد المنظمات المحلية بالمشورة الاستراتيجية والدعم المالي والتدريب الفني.

## • تأثير التعدين على النساء

وتتأثر النساء بشكل غير متناسب بالتعدين. ونادرا ما تتم استشارتهن عندما تتفاوض الشركات بشأن الحصول على الأراضي أو التعويضات أو المزايا، وأي فوائد يدفعها المنجم تدفع عموما للرجال. كما أن احتمالات استفادة النساء من فرص العمل التي تأتي مع التعدين أقل من فرص الرجال. وإذا عملوا في المناجم، فإنهم غالباً ما يواجهون التمييز وظروف العمل السيئة وعدم المساواة في الأجر مقابل العمل المتساوي. إذا لم يعملوا في المناجم، فإنهم ما زالوا يتأثرون بالقوى العاملة الذكورية العابرة في مجتمعهم، مما قد يؤدي إلى مشاكل اجتماعية مثل

زيادة استهلاك الكحول والعنف والعاملين في مجال الجنس. يمكن للآثار البيئية للتعدين أن تقوض قدرة النساء على توفير الغذاء والمياه النظيفة لأسرهن ويمكن أن تزيد من عبء العمل الواقع على عاتقهن. تساعد منظمة أوكسفام في تعبئة منظمات حقوق المرأة وتضخيم المطالبات للنساء للاستفادة على قدم المساواة من الصناعات الاستخراجية والانتقال إلى الطاقة المتجددة.

## • إعادة توطين المجتمعات

وكثيراً ما يؤدي تطوير مواقع التعدين واسعة النطاق إلى نزوح المجتمعات المحلية من أراضيها وإعادة توطينها في أماكن أخرى. وفي حين أن الحكومات ومطوري المشاريع مسؤولون عن ضمان ألا يصبح الناس في وضع أسوأ بعد إعادة التوطين، فإن إعادة التوطين يمكن أن يكون لها نتائج سلبية - بما في ذلك المشقة والفقر للمجتمعات المتضررة. غالبًا ما تكون إعادة التوطين غير طوعية، حيث تضطر المجتمعات إلى الانتقال دون تشاور أو اختيار يذكر أو بدون أي تشاور أو اختيار.

يمكن أن تؤدي إعادة التوطين إلى فقدان سبل العيش وتقليل فرص الحصول على الغذاء والماء. إذا فشلت برامج إعادة التوطين أو كانت غير كافية، فإن الأسر لا تملك سوى قدرة ضئيلة أو معدومة على الزراعة أو الوصول إلى فرص الدخل الأخرى. غالبًا ما تكون مواقع إعادة التوطين معزولة، ويمكن أن تكون بعيدة عن المدن والخدمات الأساسية.

## البحث والتطوير في صناعة التعدين (R&D)

تعتبر صناعة التعدين والمعادن تقنية ناضجة إلى حد ما، حيث تنفق أقل من 1 % من إيراداتها على البحث والتطوير (R&D) Research and Development. في الفترة 2003 - 2008م، شهد هذا القطاع زيادة كبيرة للغاية في الربحية. ومع ذلك، خلال الفترة نفسها، واصلت شركات التعدين والمعادن خفض الإنفاق على البحث والتطوير، وهو الاتجاه الذي بدأ في أوائل الثمانينات. في المستقبل القريب، ستواجه صناعة التعدين والمعادن تحديات كبيرة بما في ذلك زيادة الطلب من العالم النامي الذي يقابله اتجاه عام نحو انخفاض درجات الخام ومع ارتفاع الضغط للحد من استهلاك الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

وللتغلب على هذه التحديات، من المرجح أن تواجه صناعة التعدين والمعادن الحاجة إلى زيادة جهود البحث والتطوير بشكل كبير. ومع دخول العالم فترة من عدم اليقين الاقتصادي، سيحتاج القطاع إلى مراجعة نهجه في التعامل مع البحث والتطوير، وإعادة النظر في موقفه ضد البحث التعاوني مع الأوساط الأكاديمية والمؤسسات الأخرى، وأن يكون أكثر إبداعًا عندما يتعلق الأمر بتمويل البحث والتطوير. تشتهر صناعة التعدين والمعادن (بما في ذلك تعدين الفحم) بدورات من الازدهار والكساد. كانت دورة الازدهار الأخيرة طويلة نوعًا ما؛ بدأت في عام 2003م تقريبًا وانتهت بشكل مفاجئ في عام 2008م مع أزمة الرهن العقاري، وما تلاها من انهيار شبه كامل للصناعة المالية الأمريكية وشبه الإفلاس في العديد من دول الاتحاد الأوروبي. وكما أشار الباحث همفريز (2010م)، فإن دورة الازدهار الأخيرة لم تكن طويلة إلى حد ما فحسب، بل شهدت أيضًا ارتفاع أسعار المعادن إلى مستويات لم يسبق لها مثيل، حتى بالقيمة الحقيقية (المعدلة حسب التضخم). وتُعزى دورة الازدهار الاستثنائية هذه إلى مزيج من الطلب القوي، من الصين بشكل رئيسي، وضعف أداء

العرض. تميزت فترة الازدهار 2003–2008م أيضًا بالاندماج المستمر، مما أدى إلى اختفاء بعض القوى الكبرى في العالم الغربي، وظهور لاعبين عالميين جدد في صناعة التعدين والمعادن (Sinding, 2009). وكان الصعود الأكثر إثارة هو صعود شركة ميتال، التي استوعبت العديد من المنافسين من الحجم المتوسط إلى الكبير وفي عام 2006م استحوذت على شركة أرسيلور لتصبح أكبر منتج للصلب تحت اسم أرسيلور ميتال ArcelorMittal.

في الولايات المتحدة الأمريكية، في عام 2007م، أصبحت شركة فيلبس دودج، وهي شركة تعدين عملاقة لها تاريخ يزيد عن 100 عام، جزءًا من فريبورت ماكموران. وفي الوقت نفسه، استحوذت المصالح غير الكندية على ثلاث من أكبر شركات التعدين والمعادن الكندية – إنكو، وفالكونبريدج، وألكان. وقد حلت الآن شركات Tata Steel و Baosteel و Chinalco وغيرها من شركات المعادن الموجودة في العالم النامي محل أسماء Bethlehem Steel و Corus (British Steel) و Reynolds وما شابه. ولم تكن العوائد الكبيرة للغاية في صناعة المعادن والفلزات الأولية بين عامي 2003 و2008م مصحوبة بتغييرات متفائلة مماثلة في الطريقة التي تستعد بها هذه الصناعة لمستقبلها.

على العكس من ذلك، تسارع الانخفاض في الإنفاق على البحث والتطوير في صناعة المعادن والفلزات الأولية، والذي بدأ قبل عدة سنوات من عام 2003م (Hitzman, 2002, King, 2007)، مع انخفاض عدد الشركات التي لديها برامج بحث وتطوير كبيرة من خلال عمليات الدمج والاستحواذ (Bartos, 2002).

وبالتالي، يمكن للمرء أن يستنتج أن الدافع وراء الربح القصير الأجل والاندماج في صناعة المعادن والفلزات الأولية قد وجه ضربة قوية لجهود البحث والتطوير في هذا القطاع. ومع ذلك، فإن المستوى المنخفض للإنفاق على البحث والتطوير

في صناعة المعادن والفلزات الأولية ليس من أعراض البحث عن الأرباح في العقد الماضي أو نحو ذلك.

تظهر البيانات الواردة من 14 عضوًا في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD, 2007) أنه في التسعينات، كانت كثافة البحث والتطوير، والتي تُعرف بأنها نسبة النفقات السنوية على البحث والتطوير إلى إجمالي الإيرادات السنوية، حوالي 0.6% فقط لصناعة المعادن الأساسية ومنتجات المعادن المصنعة و 0.8% صناعة المنتجات المعدنية اللافلزية. وتشير إحصاءات منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (2007م) أيضًا إلى أن كثافة البحث والتطوير في هذين القطاعين كانت في انخفاض منذ التسعينات.

وهذا هو الحال بالتأكيد في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث كانت كثافة البحث والتطوير في صناعة التعدين والمعادن في التسعينيات أقل بكثير مما كانت عليه في السبعينات والثمانينات (Morbey, 1988)، مما يعكس بشكل أساسي الانكماش الهائل في صناعة المعادن غير الحديدية في الولايات المتحدة في تلك الفترة الزمنية. لتوضيح هذه النقطة بشكل أكبر، في عام 1995م، كان لدى الولايات المتحدة 5 منتجين محليين رئيسيين للنحاس، بينما في عام 2010م كان هناك منتجان رئيسيان ومنتج أصغر. جميع منتجي النحاس الحاليين هم وحدات أعمال لشركات تمتلك ممتلكات أكبر بكثير في الخارج. تفاخر الرئيس التنفيذي لإحدى هذه الشركات (Magma Copper) في عام 1995م بأن شركته تدار كنموذج لمستقبل الصناعة بسبب عقود العمل الجديدة، وحماية الأسعار من خلال التحوط وتنفيذ التقنيات الجديدة (Winter, 1995).

وفي غضون أسابيع، استحوذت شركة أكبر متعددة الجنسيات (BHP) على هذه الشركة بالذات، وبحلول عام 2003م، تم إغلاق معظم أصولها في الولايات المتحدة. وليس من المستغرب أن تختفي جميع المجموعات الفنية التي تتخذ

من الولايات المتحدة مقراً لها والمسؤولة عن تطوير التقنية (مقابل التحسينات التشغيلية). استمر الانخفاض في كثافة البحث والتطوير في صناعة التعدين والمعادن في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. وقام الباحث باترهام (2004م) بمقارنة كثافة البحث والتطوير في أربع شركات تعدين ومعادن كبيرة (ألكوا، وأنجلو أمريكان، وبي إتش بي بيليتون، وريو تينتو) في الفترة 2000–2002م؛ ومن هذه الشركات فقط شركة ألكوا Alcoa هي التي زادت مستويات إنفاقها على البحث والتطوير. وجد مجلس ابتكارات التعدين الكندي (2008) Canadian Mining Innovation Council أنه في كندا، وهي دولة تتمتع بصناعة موارد كبيرة جدًا، انخفض الإنفاق «الداخلي» على البحث والتطوير في صناعة التعدين بنسبة 70 % تقريبًا في العقد 1995–2004م. وفي المقابل، بلغت كثافة البحث والتطوير في صناعة الأدوية العالمية في التسعينات وأوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين حوالي 10 %، مما يدل على اتجاهات تصاعدية قوية (OECD, 2007).

ربما كان الدمج والاستعانة بمصادر خارجية عاملين مهمين في انخفاض الإنفاق على البحث والتطوير. على سبيل المثال، ابتداءً من ثمانينات القرن العشرين، استوعبت شركة أوتوكومبو الفنلندية للتعدين والمعادن العديد من مقدمي التقنية في مجال التعدين وصناعة المعادن. بعد أن قامت شركة أوتوكومبو Outokumpu بتجريد معظم أصولها (باستثناء الفولاذ المقاوم للصدأ) في عام 2005م، تم فصل مجموعتها التكنولوجية كشركة مستقلة، والتي تسمى الآن أوتوتيك أويج Outotec Oyj. أدى الاندماج بين شركتي التعدين والمعادن الكنديتين نوراندا وفالكونبريدج في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين إلى الإغلاق الدائم لمركز نوراندا للتقنية.

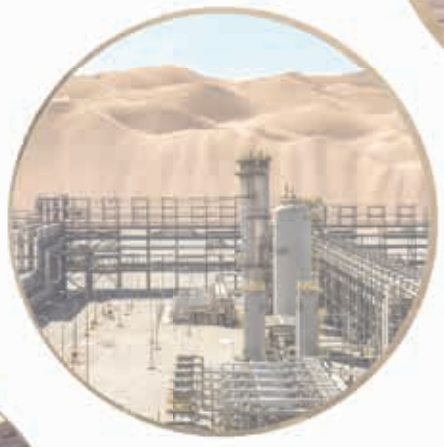
وربما ساهمت بعض حالات الفشل المذهلة في المشاريع أيضا في انكماش البحث والتطوير في صناعة التعدين والمعادن (أو العكس). وفي التسعينات، انتهى الأمر ببعض المشاريع البحثية إلى استثمارات ضخمة ثم إلى عمليات شطب ضخمة (Twigge-Molecey, 2003). وتشمل هذه الإخفاقات الكبيرة مصنع نوراندا للمغنيسيوم في كيبيك، كندا (Ficara et al., 1998)، ومشروع المغنيسيوم AMC في أستراليا (Jenkins et al., 2009)، ومشروع الترشيح بالضغط لاتريت نيكل بولونج في أستراليا (Nice, 2004, King, 2005a) ومؤخرًا مشروع الترشيح بالضغط للنيكل BHP Billiton Ravensthorpe في أستراليا أيضًا (Anonymous, 2009). وتُعزى هذه الإخفاقات جزئياً إلى ظروف السوق السيئة، أي ارتفاع تكاليف التشغيل وانخفاض أسعار المعادن بسبب المنافسة من البلدان النامية (Holywell, 2005).

ومع ذلك، فإن الاستخدام المتسرع للتقنية غير المثبتة دون التوسع الهندسي القاطع كان أيضًا عاملًا مهمًا (Nice, 2004, King, 2005a). وتحولت بعض المشاريع المبتكرة إلى كوارث فنية (بولونج Bulong، وماجنولا Magnola) مع تكاليف تشغيل لا يمكن تحملها، في حين انتهت مشاريع أخرى بتجاوزات ضخمة في التكاليف الرأسمالية (رافنثورب Ravensthorpe).

وبالتالي فإن الصناعة الاستخراجية لديها كل الأسباب التي تجعلها تتجنب الاستثمارات الكبيرة وعالية المخاطر. تتمتع الصناعة بسجل سيء للغاية في عدم تخصيص الوقت والمال المناسبين للبحث والتطوير اللازمين لجلب التقنية الجديدة إلى السوق (وفي المراحل المبكرة يكون المشروع أقل تكلفة). وينعكس الانخفاض في البحث والتطوير في استخراج المعادن والفلزات الأولية أيضًا في الاتجاهات السائدة في الأوساط الأكاديمية.

بحلول عام 2000م، تم تغيير أسماء معظم كليات التعدين والمعادن في أمريكا الشمالية إلى أسماء أكثر جاذبية من الناحية السياسية مثل «هندسة الأرض والبيئة» (القسم السابق لهندسة التعدين والمعادن والهندسة المعدنية بجامعة كولومبيا) أو «هندسة المواد» «(ما كان في السابق قسم الهندسة المعدنية بجامعة كولومبيا البريطانية). ومن المفترض أن هذا التغيير قد تم «لدمج العلوم والتقنية المتقدمة وتلبية الاحتياجات الصناعية والاجتماعية في العصر» (Flemings, 2001). ومع ذلك، يمكن أيضًا اعتبار تغيير العنوان - إلى شيء أكثر اتساعًا وغموضًا ولكن عصريًا - بمثابة (جزء من) جهد لإبطاء الانخفاض في معدل التحاق الطلاب بمدارس التعدين والمعادن/المواد. والنتيجة النهائية هي أن شركات التعدين والمعادن كانت تكافح لتوظيف مهندسين جدد خلال سنوات الازدهار 2003-2008م.

على الرغم من كل السلبيات المذكورة أعلاه، يجب على المرء أن يتذكر أن البحث والتطوير جزء لا يتجزأ من حياتنا الاقتصادية. على هذا النحو، فإنه يتبع الموجات والاتجاهات والوضع العام للاقتصاد.



# الفصل الخامس

## مستقبل صناعة التعدين في المملكة
## «التحديات والحلول»

- أهمية الاستثمار في قطاع التعدين
- التعدين في المملكة
- الاستثمار الاستراتيجي في قطاع التعدين
- دور الاقتصاد الدائري في صناعة التعدين
- آلية الإستثمار في القطاع التعديني
- المعادن والصخور الإقتصادية
- قطاع التعدين: التحديات والحلول
- خارطة الطريق لتحقيق الرؤية 2030

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

# مستقبل صناعة التعدين في المملكة

## مُقَدِّمَة

تنتشر الرواسب المعدنية في المملكة العربية السعودية في مواقع عديدة من الدرع العربي، حيث تتواجد غالبية مصادر المعادن الفلزية في الصخور التابعة لحقب طلائع الحياة (ما قبل الكمبري) للدرع العربي وهي الواقعة في الجزء الغربي من المملكة. أما المصادر اللافلزية فتتواجد في كل من صخور حقب طلائع الحياة (ما قبل الكمبري)، وصخور دهر الحياة الظاهرة (الفانيروزويك Phanerozoic) التي تنتشر في الأجزاء الوسطى والشمالية والشرقية من المملكة. ومن الناحية الميتالوجينية هناك رواسب معدنية تتميز بصحبة معينة من الصخور فعلى سبيل المثال رواسب النيكل ومجموعة عناصر البلاتين تتواجد عادة في صخور البريدوتايت أو السربنتينيت، ورواسب الموليبدينوم والقصدير تتواجد في صخور الجرانيت، ورواسب معادن الأساس مثل النحاس والزنك في الدرع العربي تكون مصاحبة للصخور البركانية أو الفتاتية بركانية الأصل.

يمثل التعدين قطاعا استراتيجيا، تنمويا، واقتصاديا بما يحققه من نتائج مباشرة وغير مباشرة، من خلال الإيرادات المالية التي يحققها وتلبيته للمتطلبات الصناعية وتطوير البنى التحتية ، ووجود العديد من الخامات المعدنية الفلزية واللافلزية باحتياطيات متميزة، وكذلك الاهتمام المتنامي عالميًا لهذا للقطاع وما يوفره من قيمه استثمارية وفرص عمل وتنميته للمجتمعات والعديد من العوائد الإيجابية الأخرى. يعد قطاع التعدين الركيزة الثالثة في الاقتصاد السعودي بعد قطاعي النفط والبتروكيماويات، وقد شهد قطاع التعدين في المملكة في السنوات القليلة الماضية نمواً وتطوراً كبيراً في البحث والتطوير، ويتوقع أن يحظى هذا

القطاع مستقبلاً بفرص نمو هائلة تماشياً مع رؤية المملكة 2030 التي تهدف إلى تنويع الاقتصاد من خلال مساهمة قطاع التعدين في الاقتصاد الوطني. بنيت رؤية المملكة 2030 على التعدين على أربع ركائز: تتمثل في إطلاق المسح الجيولوجي الإقليمي لتوفير البيانات الجوفيزيائية والجيوكيمائية وتوفير بيئة استثمارية مواتية، والعمل على مراجعة الممارسات البيئية والاجتماعية وحوكمة الشركات، للوصول إلى سلاسل القيمة المتكاملة.

يتطلب سوق العمل في مجال التعدين متخصصين في تقنيات الاستكشاف الجيولوجي و التنقيب و الاستخلاص و التجهيز و التركيز للخامات. لذا على أقسام الجيولوجيا تطوير خططها الدراسية لمواكبة المتطلبات و التوجهات و تتم التهيئة بتزويد الطلاب بالمعارف و المهارات اللازمة في مجال العمل على الثروات المعدنية الطبيعية. بالطبع قبل التطبيق يتم التواصل المستمر مع مسوقي العمل العام و الخاص للوقوف على الاحتياجات المعرفية و التقنية اللازمة و المتغيرة و الدقيقة.

يعتبر برنامج التنقيب عن المعادن هو الوسيلة المثالية لاستكشاف وتحديد الموارد المعدنية المخزونة في الأرض. تتبنى هيئة المساحة الجيولوجية برنامج التنقيب عن الثروات المعدنية وهو برنامج يتواءم أعماله ونتائجه مع توجهات الدولة واستراتيجيتها الحالية ويتصف البرنامج بتقديم الخدمات التنموية. وتتضمن مشاريع التنقيب عن المعادن بشقيها الفلزي واللافلزي أعمال الاستطلاع الإقليمي لتحديد الموارد المحتملة للمعادن بمختلف أنواعها، وإجراء التنقيب التفصيلي لاستكشاف الرواسب ذات القيمة الاقتصادية، والدراسات الاقتصادية ذات الصلة بتنمية موارد هذه المعادن وإعادة تقييم الأعمال السابقة في كلاً من الدرع العربي والرصيف العربي والسهل الساحلي للمملكة الموازي للبحر الأحمر. والعمل على مراجعة وتقييم المعلومات الجيولوجية ذات الصلة بتواجدات ونشأة

هـذه المعـادن المكتشـفة في المملكـة. وتشـمل هـذه البرامـج أيضـاً الأعمـال المتعلقـة بالاستكشـاف الجيوكيميائـي، والمسـوحات الجيوفيزيائيـة التـي تدعـم بصفـة خاصـة مشـاريع التنقيـب عـن المعـادن الفلزيـة.

لقـد أولـت الدولـة أيضـا اهتمامًـا بإنتـاج المعـادن النـادرة مثـل التيتانيـوم، فأصبحـت رابـع أكبـر دولـة منتجـة في العالـم بعـد الصـين واليابـان وروسـيا بنحـو 15.5 ألـف طـن أي نحـو 10 % مـن الإنتـاج العالمـي. وهـو يعـد معدنًـا خفيفًـا، لكنـه أقـوى مـن الحديـد 3 مـرات فيدخـل في صناعـة الطائـرات والغواصـات النوويـة والصواريـخ ، وأيضًـا هنـاك معـدن النيوبيـوم الـذي يُعـد مـن العناصـر المهمـة في الصناعـات المتقدمـة مثـل صناعـة الأجهـزة الإلكترونيـة الحديثـة والهواتـف الذكيـة والأقمـار الصناعيـة. تهـدف المملكـة رفـع نسـبة مسـاهمة قطـاع التعديـن في النـاتج المحلـي بعدمـا كان مغيبًـا تمامًـا لـ64 مليـار دولار مـن أجـل ضـخ قطـاع التعديـن بنحـو 450 ألـف وظيفـة جديـدة، أي مضاعفـة المحتـوى أكثـر مـن 3 مـرات، مـن أجـل رفـع ترتيبهـا في مؤشـر الأداء اللوجسـتي مـن المرتبـة الـ55 إلـى المرتبـة الـ25.

عمومـا فـإن تطويـر قطـاع التعديـن بهـدف توسـعة القاعـدة الصناعيـة في السـعودية جعـل الدولـة تتجـه نحـو الاهتمـام بهـذا القطـاع حيـث تمكنـت في نهايـة 2022م مـن إنشـاء 377 مجمـع تعدينـي في 35 موقعًـا موزعـة علـى 13 منطقـة تتـوزع المجمعـات التعدينيـة مـن حيـث نـوع المعـادن علـى أكثـر مـن 20 معدنًـا مختلفًـا، فيمـا هنـاك أكثـر مـن 5300 موقـع تنتشـر فيهـا الثـروات المعدنيـة تقـدر قيمتهـا أكثـر مـن 5 تريليونـات ريـال قابلـة للاسـتثمار.

# نظـــرة تاريخيـــة

يعـــود تاريـــخ التنقيـب عـن المعـادن في شـبه الجزيـرة العربيـة إلـى أكثـر مـن 900 عـام قبـل الميـلاد، وذلـك عبـر مناجـم الذهـب القديمـة التـي اسـتغلت بكثافـة شـديدة أثنـاء تلـك الفتـرات. كمـا أن النشـاط التعدينـي اسـتمر بـين القرنـين 8 – 13 الميلاديـين، أثنـاء الخلافتـين الأمويـة والعباسـية. أمـا النشـاط التعدينـي في العصـر الحديـث، فقـد بـدأ في عهـد المغفـور لـه الملـك عبـد العزيـز آل سـعود، عندمـا قـرر -رحمـه اللّه- اسـتقدام خبـراء جيولوجيـين لدراسـة أوضـاع الميـاه والبتـرول والمعـادن في المملكـة في عـام 1931م، حيـث أكدت المسـوحات الجيولوجيـة الأوليـة التـي أجراهـا الخبـراء، وجـود البتـرول في الإحسـاء، والذهـب في الحجـاز.

بعـد فتـرة وجيـزة مـن إبـرام اتفاقيـة الامتيـاز بـين المملكـة وشـركة سـتاندرد أويـل أوف كاليفورنيـا (سـوكال)، سـنة 1933م، أعطـى -رحمـه اللّه- توجيهاتـه لاسـتخراج واسـتغلال الذهـب مـن منجـم مهـد الذهـب، بوسـاطة نقابـة التعديـن العربيـة السـعودية التـي كانـت خاضعـة لإدارة المناجـم والشـركات بـوزارة الماليـة، وذلـك في الفتـرة مـن عـام 1939م وحتـى عـام 1954م. في عـام 1954م تم تحويـل إدارة المناجـم والشـركات وإعـادة تشـكيلها باسـم (المديريـة العامـة للزيـت والمعـادن) والتـي اسـتمرت بدورهـا تعمـل تحـت مظلـة وزارة الماليـة.

وفي الفترة الواقعة بين عامي (1954–1959م) قامت المديرية العامة للزيت والمعادن بمشروع تنفيذ الخرائط الجيولوجية بمقاييس رسم 1: 500000 و 1: 2000000 وذلك بالتعاون مع كل من شركة أرامكو ومصلحة المساحة الجيولوجية الأمريكية. كما قامت المديرية العامة للزيت والمعادن خلال تلك الفترة بتوثيق كافة الأعمال التعدينية والمناجم القديمة وإجراء دراسات مختلفة عن مصادر المياه.

في عام 1961م تم إنشاء وزارة البترول والثروة المعدنية، وفي عام 1963م تأسست (المديرية العامة للثروة المعدنية) وألحقت بوزارة البترول والثروة المعدنية، حيث تركزت أعمالها على المسح الجيولوجي، والتنقيب عن المعادن، وتنفيذ الخرائط الجيولوجية. وقد تزامن تأسيس المديرية مع الانتهاء من طباعة كافة الخرائط التي تم تنفيذ مشاريعها خلال الفترات السابقة، وبدأ العمل على إبرام اتفاقيات حكومية وعقود مع العديد من الهيئات والشركات الدولية المختصة في هذا المجال.

في عام 1963م أبرمت اتفاقية مع الحكومة الأمريكية ممثلة بمصلحة المساحة الجيولوجية، وفي العام نفسه، تم التعاقد مع هيئة المساحة الجيولوجية اليابانية لتنفيذ بعض الأعمال الفنية التي انتهت في عام 1974م.

في عام 1964م، أُبرم اتفاق حكومي بين المملكة وفرنسا، بحيث يقوم بموجبه مكتب الأبحاث الجيولوجية والتعدينية الفرنسية BRGM بأعمال التنقيب عن المعادن، والمسح الجيوفيزيائي، وعمل الخرائط الجيولوجية تحت إشراف المديرية العامة للثروة المعدنية.

في عام 1965م أبرم اتفاقية مع شركة الحفر العربية تقوم على أساسه الشركة بتنفيذ برامج الحفر للمديرية العامة للثروة المعدنية. وفي عام 1966م تم إنشاء الشركة العربية للجيوفيزياء والمساحة (**أركاس**) لتقوم من خلال العقود التي تبرم معها على إجراء أعمال المسوحات الجيوفيزيائية والطبوغرافية المختلفة.

في عام 1976م تم إبرام اتفاقية فنية لتأسيس بعثة جيولوجية مع شركة ريوفينكس تقوم بموجبه بفحص ودراسة وإنجاز الاستكشاف المعدني في المملكة، وقد تضمن ذلك، الكشف الإقليمي والتفصيلي، وتقويم المواقع المعدنية، والتحليل

الاقتصادي بقصد تطوير تنمية الثروة المعدنية في المملكة. وكان من بين نشاط البعثة أعمال الكشف التي أجرتها على رواسب الفوسفات في منطقة سرحان/ طريف. وفي العام نفسه، 1976م، وقع عقد مع شركة بريتش ستيل البريطانية لتقوم بالدراسات اللازمة لتطوير خام الحديد بوادي الصواوين في شمال غرب المملكة. أيضًا في عام 1976م منحت شركة جرانجس انترناشنال (جيسما) السويدية رخصة للكشف عن الفوسفات في منطقة الثنيات بهدف تطويره إلى منجم منتج للفوسفات.

في عام 1979م، تم توقيع عقد مع الشركة السويدية (جيسما) لإجراء دراسات للتجهيزات الأساسية لمشروع الفوسفات. وكان من ضمنها اختيار المواقع المهيأة لإقامة ميناء من أجل خدمة المشروع، بالإضافة إلى دراسات التسويق من ناحية أنواع وكميات المنتجات. مع الأخذ بعين الاعتبار موقع الخام والطرق الممكنة لمسار السكة الحديدية. وفي العام نفسه، تم توقيع عقد مع شركة ميناتوم الفرنسية للبحث عن المعادن المشعة (اليورانيوم) في المملكة، وقد توقفت أعمالها في عام 1985م.

في عام 1981م، تم توقيع عقد مع شركة سلترست لاستخراج الرواسب المعدنية (البوتاس) من ملاحات سواحل البحر الأحمر. وفي العام نفسه تم توقيع عقد مع شركة بروساج لتقوم بالاستكشاف المعدني في البحر الأحمر. في عام 1995م، تغير مسمى المديرية العامة للثروة المعدنية إلى وكالة الوزارة للثروة المعدنية، واستمرت بالعمل تحت مظلة وزارة البترول والثروة المعدنية.

في أبريل 1997م، أنشأت المملكة شركة التعدين العربية السعودية (**معادن**) المملوكة للدولة، والتي تقوم بتوحيد جميع مشاريع التعدين التي تشارك فيها الحكومة. لقد كان إنشاء شركة معادن المؤشر الملموس الرئيسي للنية الجادة من قبل حكومة المملكة لتحقيق توسع كبير في نشاط التعدين.

في عام 1999م صدر قرار مجلس الوزراء رقم 115 القاضي بإنشاء هيئة المساحة الجيولوجية لتقوم بمهام المسح والتنقيب عن المعادن، ولتحل محل البعثتين الجيولوجيتين الأمريكية والفرنسية ولتكون بمثابة الجهة الاستشارية للدولة في مجال علوم الأرض. (التقرير السنوي لهيئة المساحة الجيولوجية السعودية، 2003م).

وأخيرًا توجت هذه الجهود بصدور نظام الاستثمار التعديني بالمملكة بتاريخ 19-10-14441 هـ الموافق 11-6-2020م. كما صدر في عام 1442 هـ اللائحة التنفيذية لنظام الإستثمار التعديني.

## • الأهداف العامة لإستكشاف وصناعة التعدين

تهدف رؤية المملكة 2030، إلى زيادة القيمة المضافة من خلال تطبيق السياسات والاستراتيجيات المرسومة، لخلق قيمة مضافة حقيقية لقطاع التعدين في الاقتصاد السعودي. ومن هذه السياسات استكمال البنية الجيولوجية والمعدنية عن طريق تطوير الخرائط الجيولوجية والجيوفيزيائية والجيوكيميائية للمملكة والاستمرار في عمليات التنقيب عن المعادن بجميع أنواعها، ومعرفة استخداماتها المختلفة، بغرض رفد الصناعة الوطنية وتشجيع ودعم البحوث العلمية للخامات المعدنية، وتشجيع وتحفيز القطاع الخاص على استغلال الخامات المعدنية المتوفرة بالمملكة لإقامة صناعات تحويليه، والتعاون والتنسيق مع الجهات ذات العلاقة للوصول إلى حلول مثلى لاستغلال جميع المواقع التعدينية الواعدة، وهذا النهج سيكون مردوده بالنفع على القطاعات كافة، وما ينتج عنه من مردود اقتصادي، فضلا عن توطين المعرفة والتقنية.

يهدف الاستكشاف المعدني إلى تأمين احتياطيات استراتيجية مستديمة من الموارد المعدنية، ويتحقق هذا الهدف بالاستكشاف المستمر عن الموارد المعدنية بشقيها الفلزي واللافلزي في البر والبحر والعمل على تقييمها عبر المراحل التالية:

- تجميع المعلومات الضرورية لتحديد وحصر التواجدات المعدنية.
- البحث والتنقيب عن الموارد المعدنية باستخدام أحدث التقنيات العلمية، والعمل على تقويمها وتنميتها، واقتراح الطرق المثلى لاستغلالها.
- القيام بأعمال المسح الإقليمي للمناطق والأحزمة المتمعدنة لتحديد المناطق ذات النتائج الإيجابية.
- القيام بأعمال التنقيب التفصيلي لتحديد المواقع المتمعدنة الواعدة.
- التقويم الجيولوجي للخامات المعدنية الواعدة.
- البحث عن مصادر المياه في التعدين المحتملة ومواقع المناجم والنشاطات التعدينية.
- التعرف على الموارد المعدنية على طول السواحل في الجزر وفي قيعان البحار.
- التأكيد على وسائل وأساليب للإنتاج النظيف واستخدام الحد الأدنى من الموارد الحرجة.
- مراقبة المصانع من ناحية تطبيق اللوائح المتعلقة بمكافحة التلوث.
- تحقيق مبدأ التنمية المستدامة في قطاع الصناعة والتعدين.
- رفع كفاءة المصانع عن طريق تبني نظم التصنيع الحديثة.
- دعم الصناعات الأقل تلويثًا للبيئة.

## آليات تحقيق هذه الأهداف من خلال

- توجيه أعمال الاستكشاف العام والتنقيب الإقليمي إلى اكتشاف مناطق جديدة للرواسب المعدنية وتحديد المناطق المحتملة لمصادر المياه.
- تركيز الأولوية لأعمال الكشف والتنقيب على المعادن ذات الأهمية الاقتصادية والاستراتيجية للدولة.
- تحديد وتوثيق التواجدات المعدنية والمائية المتوفرة في المملكة.
- تحديد الأسس والمعايير الخاصة بالخامات، تلبيةً للاحتياجات الأساسية لقطاع التعدين في الدولة.
- إجراء دراسات التقويم الجيولوجي لمواقع الخامات المعدنية المحتملة.
- الإعلان عن المواقع المعدنية الواعدة وإتاحتها كفرص استثمار للجهات المعنية لتقوم بطرحها للاستثمار العام.
- الاستعانة بالتقنيات الجيوفيزيائية والطرق الجيوكيميائية لتحديد احتمالات التمعدن للمناطق غير المنكشفة المغطاة بصخور دهر الحياة الظاهرة.
- متابعة النظريات والتقنيات الحديثة في مجال التنقيب عن الموارد المعدنية.

## تنمية المصادر المعدنية: تحقيق التنمية المستدامة

تعتبر الدراسات التي تجريها هيئة المساحة الجيولوجية لتنمية الموارد المعدنية أعمالاً استكمالية لأعمال التنقيب عن المعادن بشقيها الفلزية واللافلزية وهي

الوسيلة الفاعلة لتحديد وتقدير كميات واحتياطيات المصادر المعدنية المخزونة في باطن الأرض. سوف تتحقق أهداف تنمية الثروات المعدنية من خلال العمل على تقويم وتنمية هذه الثروات وتحديد طرق الاستغلال الأمثل لها، لغرض إتاحتها كفرص استثمارية يمكن للجهات المعنية القيام بطرحها للاستثمار العام، لتنويع مصادر الدخل القومي.

- إجراء الدراسات الاقتصادية عن طبيعة وحجم الاستثمارات في قطاع التعدين والصناعات التعدينية.
- تحديد الخامات المعدنية الواعدة بإجراء دراسات الجدوى الاقتصادية الأولية عليها.
- دراسة المناجم القديمة ومدى الاستفادة من التقنيات الحديثة في استثمارها.
- دراسات إحتياجات السوق المحلية والعالمية من المعادن المكتشفة في المملكة.
- إجراء التطبيقات الصناعية للخامات المعدنية لاستحداث مواد أولية تفي بأغراض صناعية محددة.
- تزويد المستثمرين في الصناعات التعدينية بالمعلومات الفنية والمعايير اللازمة لهذه الصناعة.

## ويتم تحقيق أهداف البرنامج عبر السياسات الآتية

- توجيه أعمال الاستكشاف العام والتنقيب الإقليمي إلى خامات المعادن التي تفي باحتياجات الصناعات الوطنية المهمة والملحة.
- اتباع الأساليب الحديثة في مجال التطبيقات الصناعية والمعالجة المثلى للخامات المعدنية.

# أهمية الإستثمار في القطاع التعديني

تزخر جيولوجية المملكة بالثروات التعدينية الطبيعية من: ذهب وفضة ونحاس وزنك وحديد وفوسفات وبوكسيت ورمال السيليكا عالية النقاوة، وحجر الجير ودولوميت وجبس وصلصال وفلسبار وركام خفيف الوزن (الإسكوريا) وأحجار الزينة، بالإضافة إلى بعض المعادن الصناعية الأخرى التي توجد بكميات أقل مثل: الجارنت والأوليفين والتلك وعروق المرو عالية النقاوة، وأملاح البوتاش وكلوريد الصوديوم (الملح) والبارايت والمغنيزايت وغيرها. إن الاستثمار في قطاع التعدين والصناعات التحويلية المتعلقة به، هو أحد أبرز خيارات التنويع الاقتصادي، ولذلك حاولت الدولة التركيز على هذا القطاع خلال خططها التنموية. كما نجح القطاع الخاص في استغلال الصخور والمعادن اللازمة لأعمال البناء، واستغلال أحجار الزينة، كالجرانيت والرخام وذلك بسبب قلة المخاطرة في مثل هذه المشاريع. في حين، لم يجازف بالاستثمار في المعادن الأخرى لارتفاع تكلفتها، وقلة المردود، وطول فترة استرداد رأس المال.

أن الدراسات الفنية والاقتصادية أثبتت وجود العديد من الخامات المعدنية الواعدة القابلة للاستثمار والتي من أهمها: خامات الفوسفات والبوكسيت والمغنيزايت والحديد والنحاس والزنك والذهب والفضة. كما أشارت الأبحاث إلى أن تشغيل مشروع الفوسفات سوف يحقق استخداماً لكميات كبيرة من الغاز والكبريت المتوفرة في المملكة لتصنيع الأسمدة وتصديرها إلى أسواق العالم. كما سيؤدي تشغيل مشروع البوكسيت إلى تزويد مصاهر الألمنيوم الموجودة في منطقة الخليج بمادة الألومينا، وأيضاً سيتم استغلال خام المغنيزايت الموجود في ضرغط خلال السنوات القادمة لإنتاج الصودا الكاوية و بعض المنتجات عالية القيمة. كما أن استغلال خام الحديد في وادي الصواوين سوف يسهم في تزويد مصانع الحديد بالجبيل، ويمكن استغلال خام النحاس في جبل صايد وتركيزه

وتصديره أو الاستفادة منه في إقامة مصهر للنحاس، وأيضاً خام الزنك في الآمار والخنيقية يمكن استغلاله وتركيزه وتصديره أو الاستفادة منه في مصهر الزنك المتوقع إنشاؤه في مدينة ينبع الصناعية، أما خامات الذهب المستغلة فلا يمكن تصنيعها في المملكة دون وجود مصفاة للذهب تعمل على أساس تجاري. علاوة على ذلك، قامت صناعات تعدينية تحويلية عديدة تعتمد على خامات المعادن الصناعية المكتشفة، مثل صناعات الإسمنت الأبيض والإسمنت المقاوم والخرسانة خفيفة الوزن والتوسع فيها، وصناعة الزجاج والخزف والجبس، وذلك لتوفر كمية كبيرة من الخامات اللازمة لهذه الصناعات في المملكة.

إن الانفتاح في المجالات التعدينية وما يرافقه من بنى تحتية و أساسية لهذه المجالات الصناعية يفتح آلاف الفرص الوظيفية للشباب السعودي، معظمها في الوظائف الفنية والتقنية والإدارية مما يخفف من نسبة البطالة ويؤدي إلى تنويع مصادر الاقتصاد السعودي ويزيد من الناتج المحلي ويرفع من مستوى الدخل القومي دون الاعتماد على العنصر الأجنبي فالشباب السعودي قادر على استكشاف ثروات بلاده الباطنية. كما أنه سيساهم بصورة مباشرة في تحسين المستوى المعيشي للإفراد ويحقق أهداف الدولة في الاستفادة القصوى من الثروات الوطنية بما يضمن إستقرار الاقتصاد السعودي خاصة وأن الوضع الحالي يتطلب البحث عن مصادر بديلة عن النفط.

وبالاستفادة من التجربة الصينية نجد إن للمعادن دور كبير في تطور الصين ونهوضها الاقتصادي الذي غطى العالم أجمع، حتى اكتسحت معادنها الأسواق العالمية واحتكرته حتى أصبحت منافسة لدول منطقة اليورو وأمريكا فأطلق الاقتصاديين على الصين «**أوبك المعادن**» نتيجة استغلال الموارد المعدنية استغلال مثالي وبكفاءة وفعالية مما أدى إلى فوزها بحصص عالية من الأسواق العالمية.

وتجدر الإشارة إلى أن هناك عوامل تؤكد نجاح هذا الاستثمار مثل توفر الطاقة (البترول بأسعار زهيدة) بالقرب من هذه المعادن وتوفر الملاءمة المالية لدى الشركات المستثمرة ووجود أنظمة الاستثمار التعديني التي تشجع المستثمرين بالإضافة إلى الطلب العالمي المتنامي وخاصة على الفوسفات والألمنيوم. وقد قامت شركة معادن بدور كبير في مواصلة بناء البنية التحتية في هذا المجال. كلنا أمل إن يفتح مورد التعدين وصناعاته واستثماراته المستقبلية باب خير على المملكة مما يعود نفعه على المواطن بشكل مباشر.

## • المعوقات والتحديات التي تواجه قطاع التعدين

على الرغم من وجود إمكانات كبيرة للثروة المعدنية، لتلعب دورا مهمًا في التنمية، إلا أن الناتج الإجمالي المحقق من النشاط التعديني يُعد في مجموعه أقل، بكل المقاييس، مقارنة بالنشاطات الاقتصادية النفطية أو مقارنة بالإمكانات الحقيقية لهذا القطاع العام. ويعود ذلك إلى تعرض النشاط التعديني إلى العديد من المعوقات، نورد أهمها على سبيل المثال لا الحصر:

- وجود الخامات المعدنية فى مناطق نائية يؤدى إلى أن تتحمل مشروعات تنميتها كل أو أغلب تكاليف عناصر البنية الأساسية مما يشكل عبئا كبيرًا على هذه المشروعات ويؤثر فى جدواها الأقتصادية من خلال ارتفاع كلفة انتاجها.
- نقص الخبرات المدربة تدريبا عاليا على أعمال التنقيب والإستكشاف والمناجم واستخراج الخامات ومعالجتها والطرق المثلى لاستخلاصها.
- نقص الخبرات والكوادر العالية فى أعمال تصميم وتنفيذ مشروعات التعدين.

- قلة مراكز التدريب المهنى فى مجال صناعات التعدين والثروة المعدنية.

- إنخفاض عدد الشركات أو المؤسسات الصناعية المتخصصة فى عمليات تركيز الخام و تجهيزه وجعله ملائما للصناعات المطلوب من أجلها لإمكان الأستفادة من الخامات منخفضة الجودة.

- التخطيط أو التنسيق تجاه تنمية الصادرات لمواجهة اسواق التصدير العالمية المفتوحة خاصة في مجال أحجار الزينة.

- ارتفاع تكلفة النقل من مكان إلى آخر وتكلفة التأمين، بالاضافة إلى اجور وتكاليف المناولة (التفريغ والتحميل) في المحطات أو الموانيء وكذلك أجور التخزين.

- المعلومات الأساسية عن الأسواق الخارجية واحتياجاتها وحجم ومعدلات نمو هذه الاحتياجات بالنسبة للمنتجات المصدرة، وكذلك متطلبات هذه الأسواق من مواصفات العرض للمنتجات.

- المعلومات عن القنوات التسويقية والمستوردين الرئيسيين ومعلومات عن السلع المنافسة والأسعار وغيرها من المعلومات الاساسية لعمليات التصدير.

**علاوة على ذلك، يواجه قطاع التعدين بعض التحديات من أهمها:**

- اعتماد العديد من الصناعات الأساسية والتحويلية على استيراد العديد من الخامات التعدينية مثل الكاولين والجارنت والكوارتز النقي ودخولها في الصناعات المحلية.
- ارتفاع أسعار المواد الكيميائية وقطع الغيار المستخدمة في معالجة الخامات المعدنية.
- المناجم التعدينية الحالية لا تسد حاجة المصانع المحلية في حال توقف سلاسل الإمداد والذي بدوره يتطلب المزيد من أعمال الاستكشاف والتنقيب عن مواقع جديدة.
- الموارد المحلية من المعادن لا تفي باحتياجات العديد من المصانع في حال انقطاع أو تأثر سلاسل الإمداد.

# آلية الإستثمار في القطاع التعديني

صدر نظام الإستثمار التعديني بالمملكة بتاريخ 19-10-14441 هـ الموافق 11-6-2020م. كما صدر في عام 1442هـ اللائحة التنفيذية لنظام الاستثمار التعديني في المملكة والتي نصت مادتها الثانية على تعزيز مبادئ حوكمة الاستثمار التعديني وتحديد الاليات التي تعزز المسؤولية والكفاءة والفاعلية والاستجابة لتطبيق النظام، وكذلك وضع إجراءات واضحة للرخص مبنية على العدالة والشفافية لأجل بناء الثقة في اتخاذ القرار وتعزيز الاستقرار المطلوب لتطوير الرواسب المعدنية لتحقيق الفائدة. بجانب ضمان كفاءة العمليات التي تجري على الانشطة التعدينية ووضع آليات فاعلة لتسوية الخلافات.

أن فرص النمو التي حددتها الإستراتيجية الشاملة لقطاع التعدين ستسهم في توفير فرص استثمارية مهمة؛ نظراً لما تتمتع به المملكة من مزايا تنافسية تساعدها على تحقيق النجاح في قطاع التعدين، ومن أهمها: المزايا التنافسية، وتوافر الثروة المعدنية المدعومة بالطلب المحلي الكبير، مما يؤهل المملكة لتكون واحدة من أهم الدول المنتجة للمعادن في العالم بحلول عام 2030م. حيث تزخر المملكة بثروات معدنية متنوعة تنتشر في أكثر من 5,300 موقع، وتقدر قيمتها بنحو خمسة تريليونات ريال، بما في ذلك عدد من المعادن الأكثر وفرة مثل: الذهب، والفضة، والنحاس، والزنك، والفوسفات، والبوكسايت، والحجر الجيري، ورمل السيليكا، والفلسبار، وصخور الزينة المستخدمة في واجهات المباني مثل: الجرانيت وغيرها من المعادن الأخرى.

تنتج المملكة العديد من المعادن والمنتجات المعدنية التي لها دور مهم في تطوير سلاسل القيمة للمعادن الفلزية، كالحديد، والألمنيوم، والنحاس، والزنك،

والذهب، وكذلك منتجات المعادن اللافلزية، مثل: الأسمدة الفوسفاتية، والأسمنت، والزجاج، والسيراميك، إذ يبلغ إنتاج المملكة من البوكسايت حوالي 4.9 ملايين طن سنويًا، يتم معالجته لإنتاج حوالي مليون طن من الألمنيوم سنويًا، كما يتم إنتاج حوالي 409 آلاف أوقية من الذهب من عدد المناجم الموجودة في المملكة بمنطقة الدرع العربي الغنية بالمعادن النفيسة والمعادن الأساس. المملكة تنتج نحو 68 ألف طن سنويًا من مركزات النحاس والزنك، ونحو 24.6 مليون طن من خام الفوسفات سنويًا، حيث تتم معالجته لإنتاج نحو 5.26 ملايين طن من الأسمدة الفوسفاتية سنويًا، وتعد المملكة من بين أكبر 5 منتجين للأسمدة الفوسفاتية، كما نجحت في تطوير عدد من الصناعات المعدنية الأخرى.

أن رؤية المملكة وإستراتيجية التعدين ستعزز من الزيادة على طلب الحديد خلال الـ 10 سنوات القادمة، بنوعيه الإنشائي والمسطحات ليرفع الاستهلاك من 12 مليون طن إلى ما يزيد على 20 مليون طن. وتهدف الخطة الوطنية لهيكلة قطاع الحديد والصلب التي تتضمن 41 توصية لتمكين القطاع واستدامته، ورفع كفاءة التشغيل في المصانع، ودعم زيادة توظيف السعوديين بكفاءة عالية؛ لمواجهة التغيرات العالمية والمحلية التي تضمن استدامة القطاع، وحسن التأقلم مع المتغيرات الاقتصادية والجيوسياسية.

أن الإستراتيجية الشاملة لقطاع التعدين تهدف إلى زيادة إنتاج الذهب، والنحاس، والمعادن الأساسية عشرة أضعاف مقارنة بالوضع الحالي، بالإضافة إلى التوسع في صناعة الأسمدة الفوسفاتية لجعل المملكة من بين أكبر ثلاث دول منتجة حول العالم، ومن بين الدول العشر الأولى عالميًا في إنتاج الألمنيوم والقدرة الإنتاجية للصناعات التحويلية المتعلقة، كما تهدف إلى مضاعفة إنتاج الحديد والزجاج من أجل تلبية النمو المتوقع في الطلب وتحقيق الاكتفاء الذاتي،

والتوسع في سلاسل القيمة الجديدة مثل: العناصر الأرضية النادرة، والتنتالوم والنيوبيوم، التي تعد من العناصر المهمة للعديد من الصناعات المتقدمة مثل: صناعة الأجهزة الإلكترونية الحديثة، والهواتف الذكية والأقمار الصناعية.

أن التطلعات والأهداف الرئيسة التي وضعتها الإستراتيجية الشاملة لقطاع التعدين والصناعات المعدنية تركز على الاستخدام الأمثل لهذه المعادن من خلال تطوير سلاسل القيمة الصناعية التي سيكون لها تأثير اقتصادي مهم خلال مراحل الصناعات الوسيطة والتحويلية لهذه المعادن وما ينتج عنها من فرص عمل، ونقل التنمية إلى مناطق المملكة المختلفة التي توجد فيها هذه الخامات المعدنية، مما سيكون له أثر إيجابي على تنمية المجتمعات المحلية في تلك المناطق، وتحقيق الاستدامة في قطاع التعدين وحماية البيئة.

تسعى وزارة الصناعة والثروة المعدنية إلى تعظيم القيمة المحققة من قطاع التعدين وفق مستهدفات رؤية المملكة 2030م، حيث بدأت في تنفيذ عدد من المبادرات والبرامج لتحقيق هذه المستهدفات، من بينها: البرنامج العام للمسح الجيولوجي الذي سيغطي منطقة الدرع العربي الغنية بالمعادن في غرب المملكة، لهدف توفير المعلومات والخرائط الجيولوجية المفصلة والدقيقة، وإتاحة هذه المعلومات والخرائط للراغبين في الاطلاع عليها من خلال البوابة الإلكترونية لقاعدة البيانات الجيولوجية الوطنية (NGD) على موقع هيئة المساحة الجيولوجية، التي تتيح الحصول على ما يعادل 80 عامًا من السجلات الوطنية للمعلومات الجيولوجية، حيث يتم تحويل هذه البيانات التاريخية الجيولوجية لصيغة رقمية، من ثم تغذيتها بالمعلومات الحديثة التي سيتم الحصول عليها من خلال هذه البرامج والمشاريع.

ومـن منطلـق التـزام المملكـة بقطـاع التعديـن فقـد تم إطـلاق مبـادرة تسـريع أعمـال الاستكشـاف، وزيـادة الإنفـاق على أعمـال الكشـف والتنقيـب التـي تسـتهدف عشـرات المكامـن المعدنيـة في المملكة ذات المؤشـرات الاقتصاديـة المشـجعة، وحسـاب الموارد المعدنيـة لهـذه المكامـن، مـن خـلال اسـتخدام أفضـل طـرق الكشـف والتنقيـب، وتنفيـذ أعمـال الحفـر الماسـي (اللبي)، والمسـوحات الجيوفيزيائية الأرضية والجوية، والمسـوح الجيوكيميائيـة التفصيليـة.

وعمومًـا، تتحـد آليـات تمكين الاسـتراتيجية الشـاملة لقطـاع التعديـن في المملكة في خمـس ممكنـات رئيسـة تشـمل:

- تسـريع عمليات الاستكشـاف والتنقيب.
- تعزيز الجدوى الإقتصادية للمشاريع.
- تشـجيع الاسـتثمار وتحسـين هيكلة القطاع.
- تعزيز المنافع الاجتماعية التي تنشأ عن سلسلة القيمة.
- رفع مساهمة القطاع التعديني لإيرادات الدولة.

يتضـح ممـا سـبق ذكـره، الاهتمـام الكبيـر واللامحـدود بقطـاع التعديـن حيـث يعمـل برنامـج تطويـر الصناعـة الوطنيـة والخدمـات اللوجسـتية علـى تعظيـم مسـاهمة هـذا القطـاع ليكـون الركيـزة الثالثـة للصناعـة السـعودية بحلـول 2030م حيـث يطمـح إلـى تعظيـم المسـاهمة في النـاتج المحلـي الإجمالـي لتصـل إلـى 176 مليـار ريـال (مركـز أسـبار، تقريـر 105، 2023م) مـن خـلال:

- تطويـر الأنظمـة والتشـريعات وتحسـين الممكنـات لرفـع مسـتوى تنافسـية قطـاع التعديـن.

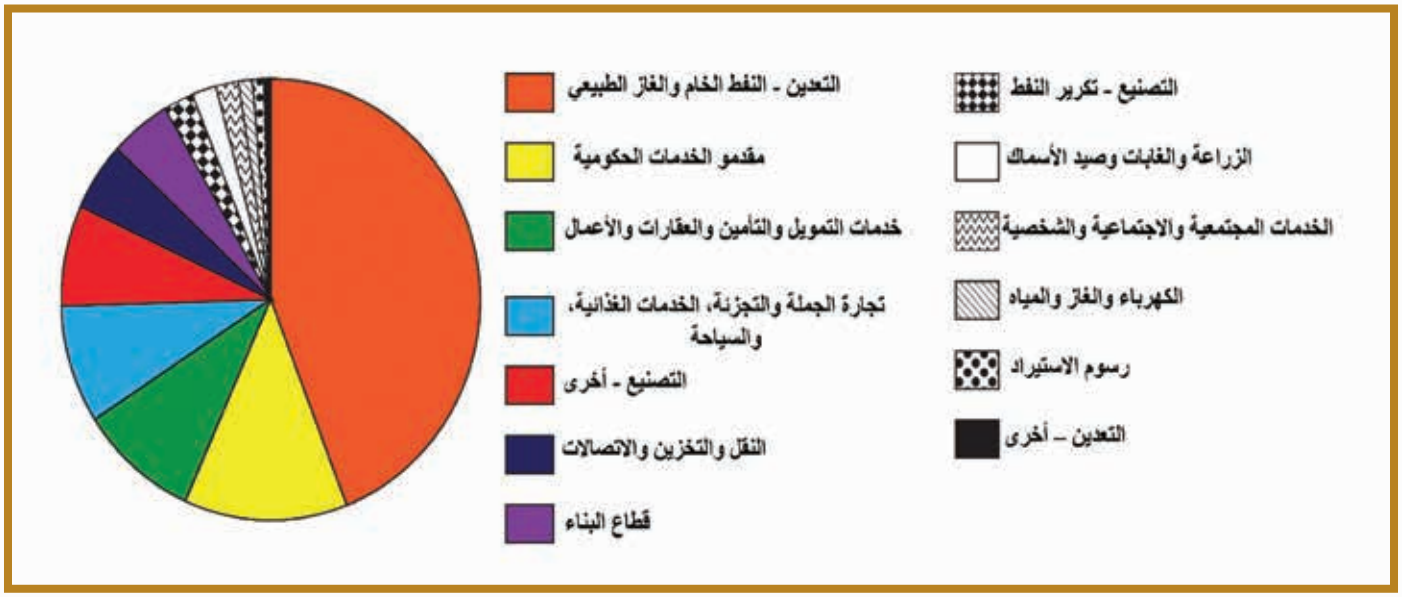
- خلق فرص وظيفية وتنمية الكوادر الوطنية.
- توفير البيانات الجيولوجية اللازمة بالعمل على إتمام أعمال البرنامج العام للمسح الجيولوجي في الدرع العربي.
- رفع الإنفاق على أعمال الاستكشاف للوصول إلى معدلات الإنفاق العالمي من خلال استثمارات القطاع الخاص.
- تحسين تجربة المستفيد ورفع مستوى الرضا من خلال تحسين الخدمات وتوفير البيانات اللازمة بصيغة رقمية ودرجة عالية من الموثوقية وتسهيل الوصول إليها .
- تقليص مدة إصدار تراخيص الكشف لتصل إلى 60 يوماً.
- تعظيم القيمة المضافة للخامات المعدنية من خلال تطوير سلاسل القيمة المضافة للصناعات المعدنية بمشاركة القطاع الخاص لتوفير فرص استثمارية كبيرة ونوعية.

وحقيقة أنه سوف تكون هناك حاجة إلى المزيد من المعادن إذا أريد للمملكة قيادة عملية التحول إلى اقتصاد أقل كثافة في استخدام الكربون. هناك حاجة إلى إنتاج أدوات جديدة وإنتاجها بشكل أكثر استدامة.

تعد المملكة ضمن مجموعة الدول العشرين الآمنة والمأمونة اقتصاديًا، مع قوة عاملة متعلمة، وترحب بشدة بالشركات الأجنبية المهتمة بالتعدين، وهي تشهد تحولًا قويًا. إن **منتدى مستقبل التعدين السنوي** سيصبح أكثر حدث تعديني أهمية لمنطقة أفريقيا والشرق الأوسط وغرب ووسط آسيا. وهو مكان للحوار بين المستثمرين والمديرين والمنظمات غير الحكومية للاتفاق على جدول الأعمال المستقبلي للتعدين.

# التعديـــن في المملكـــة

تشـتهر المملكـة علـى مسـتوى العالـم بمواردهـا النفطيـة الهائلـة، ولـم تحـظ إمكاناتها التعدينية الهائلة باهتمام كبير حتى الوقت الحالي. لدى المملكة العربية السـعودية 32 منجمًـا محـددًا مدرجًـا في The Diggings™. أكثـر السـلع الأوليـة الأكثـر شـيوعًا في مناجـم المملكـة العربيـة السـعودية هـي الذهـب والزنـك والفضـة. وأثنـاء مسـح هـذه المناجـم، لوحـظ أن 11 منجمًـا في المملكـة العربيـة السـعودية تحـوي علـى تمعـدن خـام في نتـوء أو حفـرة ضحلـة أو حفـرة حفـر معزولـة - تُعـرف باسـم منجـم الصدفـة.




**تكوين الناتج المحلي الإجمالي للمملكة العربية السعودية حسب قطاع الصناعة. حيث إن هيمنة إنتاج التعدين والنفط والغاز الطبيعي يبقى المحرك للاقتصاد السعودي ومفتاح حيويته على مر السنين. (Burton, 2016)**

من المسلم به وكما تم ذكره مسبقا، يُعد التعدين في المملكة جزءًا أساسيًا من التنويع الاقتصادي الذي هو جزء من رؤية السعودية 2030م بعد النفط والغاز والبتروكيماويات. إذ يُرى التعدين على أنه الركيزة الثالثة المحتملة لنمو الدولة الصناعي. ولكي يحدث هذا، هناك حاجة ماسة وملحة إلى الخبرة والمعرفة.

إنّ نمو قطاع التعدين في المملكة يقوده القطاع الخاص إلى حد كبير، وهو ما يتماشى مع أهداف الرؤية لزيادة أرباح قطاع التعدين. وكما سيتم تقنينه بموجب القانون السعودي، سيكون قطاع التعدين في المملكة مفتوحًا لجميع االمستثمرين. تقوم الوزارة حاليًا بإجراء مسوحات جيولوجية طموحة لتأكيد التقديرات التي تشير إلى وجود احتياطيات معدنية بقيمة 1.3 تريليون دولار في المملكة. يتضح ذلك من التحول الكبير الذي شهدته المملكة في استخدام البوكسيت والألومنيوم والفحم. ونعلم أيضًا أن المملكة لديها رواسب كبيرة من الفحم والنحاس والزنك والفوسفات واليورانيوم والذهب. ويبلغ الاحتياطي المحتمل للفوسفات وحده 7.3 مليار طن.

إن النظام البيئي السعودي، وسهولة ممارسة الأعمال التجارية، يجعل من شركاتها أحد أفضل الخيارات لعمال المناجم ومعالجة المعادن. ولديه فترة سماح تحفيزية مدتها خمس سنوات للمناجم الجديدة وحوافز أخرى أيضًا. إن العمل جارٍ على وضع المملكة لتتماشى مع التوجه الحالي نحو الطاقة المتجددة. على سبيل المثال، تطوير «**الهيدروجين الأخضر**» لإنتاج «**الفولاذ الأخضر**». هناك عمل على وضع لوائح جديدة لجعل الاستثمار في التعدين اقتراحًا أسهل وصديقًا للبيئة أيضًا.

جانب آخر مهم من «الاقتصاد الأخضر» هو بطاريات السيارات الكهربائية، التي يمكن أن يكون تصنيعها عملية معقدة. هناك عدد من الجهات المهتمة بتعدين المواد المستخدمة في السيارات الكهربائية في المملكة. حيث تهدف

المملكة إلى إنتاج 300 ألف سيارة ومركبة كل عام، تماشيًا مع رؤية 2030م. وتشارك حاليًا في 10 مشاريع عملاقة تشمل الفولاذ الأخضر والألومنيوم. لذلك، توجد كل هذه الفوائد في منطقة واحدة مع زيادة الطلب من داخل المملكة (Hammond, 2023).

تم استخراج أكثر من 5 فلزات معدنية و15 معدنًا صناعيًا في المملكة في عام 1995م. ومن بين الخامات المعدنية، تعتبر رواسب الذهب ذات أهمية عالمية بسبب قيمتها وكميتها. وتشير بعض التقديرات إلى أن المملكة تضم 20 مليون طن من خام الذهب. وقد ساهمت رواسب الذهب بشكل كبير في تلبية احتياجات السوق المحلية البالغة 2000 طن، وكذلك الأسواق الخارجية مثل الهند وأوروبا والولايات المتحدة. توجد رواسب كبيرة جدًا من المعادن الصناعية ذات القيمة المعتدلة نسبيًا، مثل الرخام والمغنيسيوم والدولوميت والملح الصخري والمواد الخام الأسمنتية ومعادن الزجاج والسيراميك والطين الحراري والزيوليت والفوسفات والبوكسيت.

نظرًا لجهود الاستكشاف المكثفة التي كانت ترعاها وكالة الوزارة للثروة المعدنية وتنفذها هيئات معروفة، بما في ذلك هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS)، ومكتب البحوث الجيولوجية والتعدينية (BRGM) من فرنسا، وشركة Riofinex Ltd من المملكة المتحدة، وشركة Watts Griffis McOuat الكندية، منذ خمسينات القرن العشرين، قامت المملكة بجمع بيانات دقيقة إلى حد معقول عن إمكانات المملكة المعدنية غير النفطية.

## إنتاج السعودية من أبرز المعادن خلال 10 سنوات

الذهب 47,410 كجم

الفضة 61,976 كجم

النحاس 125,363 طن

الزنك 458,551 طن

## القطاع في تصريحات ولي ولي العهد الأمير محمد بن سلمان

قيمة القطاع
1.3 تريليون دولار

المستغل من القطاع
%3

قيمة الذهب في السعودية
240 مليار دولار

قطاع التعدين
نفط آخر غير مستغل

## القطاع في رؤية 2030

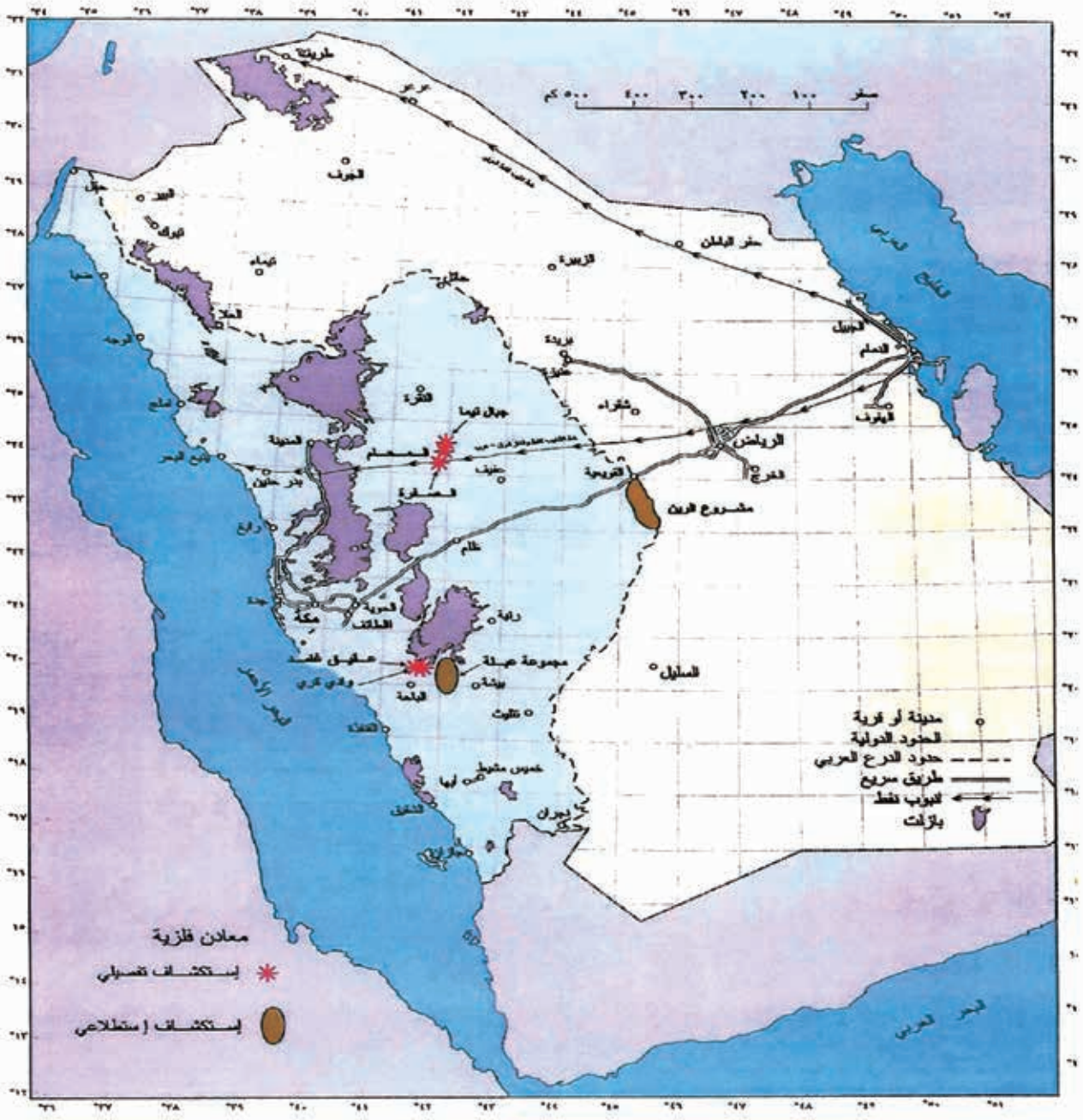
رؤية VISION 2030

المملكة تستهدف تنمية القطاع إلى 97 مليار ريال في 2020

مساهمة القطاع في الناتج المحلي الإجمالي لا تزال دون المأمول

المملكة تهدف لزيادة عدد فرص العمل في القطاع إلى 90 ألف فرصة عمل بحلول 2020

السعودية تنوي تكثيف الاستكشاف وتسهيل استثمار القطاع الخاص




خريطة تبين مواقع الاستكشاف التفصيلي والاستطلاعي للتنقيب عن المعادن في المملكة. (التقرير السنوي لهيئة المساحة الجيولوجية السعودية، 2019)

# المعادن والصخور الإقتصادية

تنتشر الثروات المعدنية في المملكة في أكثر من 5,300 موقع، وثمة نحو 360 مجمعً تعديني تنتج العديد من المعادن والمنتجات المعدنية التي لها دور مهم في تطوير سلاسل القيمة للمعادن الفلزية واللافلزية؛ إذ يبلغ إنتاج المملكة من البوكسايت (الخام الطبيعي الذي يصنع منه معظم معدن الألومنيوم) حوالي 4.9 ملايين طن سنويًا، يتم معالجته لإنتاج حوالي مليون طن من الألمنيوم سنويًا، كما يتم إنتاج حوالي 409 آلاف أوقية من الذهب بمنطقة الدرع العربي الغنية بالمعادن النفيسة والمعادن الأساس، ونحو 68 ألف طن سنويًا من مركَّزات النحاس والزنك، و24.6 مليون طن من خام الفوسفات سنويًا، حيث تتم معالجته لإنتاج نحو 5.26 ملايين طن من الأسمدة الفوسفاتية.

- تستهدف المملكة ضمن رؤية 2030م رفع الناتج المحلي من قطاع التعدين من 17 مليار دولار إلى 64 مليار دولار بحلول 2030م، ورفع نسبة مشاركة قطاع التعدين في الناتج المحلي الوطني لتتجاوز 5%، بزيادة أعمال الكشف عن المعادن، وزيادة قيمة الاستثمارات التعدينية من نحو 3.9 مليار ريال خلال 2020م، إلى 115 مليار ريال في 2025م، بفتح المجال أمام المستثمرين المحليين والأجانب في مجال التنقيب عن المعادن.

- المعادن التي يتم استخراجها وإنتاجها في المملكة هي الملح، والجرانيت، والطوب الأحمر، وكربونات الكالسيوم المطحونة، والزجاج، والسيراميك، والركام، وبلاط الأرضيات الفسيفسائي، والباريت، وسيليكات الصوديوم، والصودا الكاوية.

- يتم إنتاج الذهب والفضة والنحاس والزنك والحديد والرصاص بكميات معتدلة، وبالتالي يتم استهلاكها في السوق المحلية في الغالب نتيجة توسع الصناعة التحويلية المعتمدة على هذه المعادن خلال العقدين الماضيين. وفي مجال المعادن والمنتجات المعدنية، تعد المملكة مستوردًا كبيرًا لخام الحديد وصخور الفوسفات والمواد الخام المصنوعة من الألومنيوم والذهب.

- وقد أدى التوسع واسع النطاق في الصناعة المحلية القائمة على المعادن خلال السنوات الخمس عشرة الماضية إلى ارتفاع حاد في الإنتاج. على سبيل المثال، انتهت مصانع الأسمنت الثمانية من التوسعة المخطط لها، وزادت طاقتها بنسبة 40 % في عام 1998م.

- وقد اعتمد التوسع في إنتاج الحديد والصلب والأسمدة على واردات المواد الخام مثل خام الحديد وخردة الصلب وفحم الكوك وحامض الفوسفوريك وكلوريد البوتاسيوم. وفي عام 1998م بلغ إجمالي الصناعة المعدنية 351 مصنعًا بتكلفة إجمالية تزيد عن 28 مليار ريال.

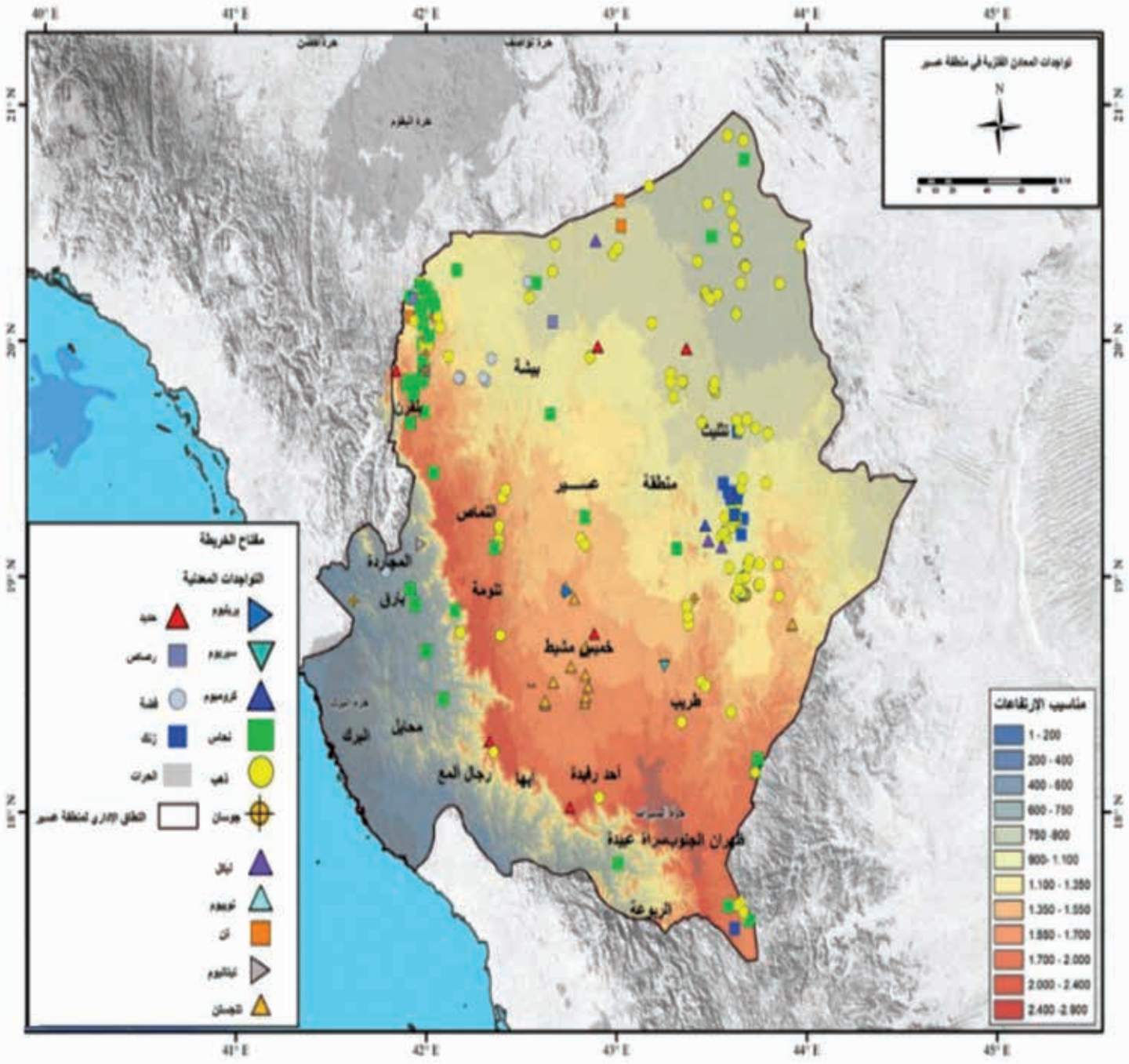
## الصناعات القائمة على مواد خام أولية من المعادن الصناعية

| الرقم | الصناعة | المواد الخام الأولية |
|---|---|---|
| 1 | الاسمنت | حجر جيري – طين – رمل – جبس - خام الحديد |
| 2 | الصوف الصخري | البازلت |
| 3 | الجبس | الجبس |
| 4 | الخزف والسيراميك | الفلسبار – الطين الكاولينيتي – رمل السليكا |
| 5 | الزجاج | رمل السليكا – حجر جيري – فلسبار - أكاسيد |
| 6 | أنابيب خزفية | طين تراكيبي – طين كاولينيتي - رمل |
| 7 | طوب أحمر | طين تراكيبي - رمل |
| 8 | إسمنت أبيض | حجر جيري – طين كاولينيتي – جبس – رمل السليكا |

**تم اكتشاف العديد من رواسب المعادن في المملكة، تم تقسيمها إلى قسمين :**

### رواسب المعادن الفلزية ورواسب المعادن اللافلزية:

- رواسب معادن فلزية: كالذهب والنحاس والفضة والحديد والكروم والألومنيوم والزنك والرصاص والمنغنيز والنيكل والتنغستن والموليبدينوم والفاناديوم والكوبالت. بالاضافة إلى معادن مشعة وغير مشعة : التنتالوم، النيوبيوم، التيتانيوم، اليورانيوم، الثوريوم، الزركونيوم، البريليوم والليثيوم والبزموت والكادميوم والزئبق.
- رواسب معادن لا فلزية: كالفحم، الكبريت، الفوسفات. معادن صناعية: كالماغنسيوم والفلورايت والأسبستوس والمايكا. أحجار الزينة والبناء: كالجرانيت والرخام والطين الرمل الزجاجي.




توزيع المعادن الاقتصادية في منطقة عسير

# رواسب المعادن الفلزية Metallic Mineral Deposits

## النحاس Copper

يتميز النحاس بقدرته العالية على السحب والطرق واللدونة وموصل جيد للكهرباء والحرارة ويعتبر الثاني في الترتيب بالنسبة للتوصيل الحراري بعد معدن الفضة، وأول معدن استخدمه الإنسان قديما في صناعة السهام والسكاكين والأدوات الحربية وأدوات قطع الأشجار. كما يتميز بإمكانية تدوير استعماله مرات عديدة دون أن يفقد خواصه ولأنه معدن غير سام فيمكن تشكيله على البارد والساخن، وصنع سبائك منه في قوالب مع عناصر أخرى. له أهمية كبيرة في الصناعات الكيميائية؛ كالأغذية والأسمدة والمبيدات وفي الأصباغ والطلاء.

تحوي أراضي المملكة العربية السعودية على احتياطيات تزيد عن 60 مليون طن من معادن النحاس، ممثلة بما يزيد عن 800 مكمن لخام النحاس، أهمها جبل صايد، الذي يقع على بعد نحو 150 كيلومترًا من المدينة المنورة، ويُعتقد أنه يحوي على 20 مليون طن من خام النحاس، كما تنتشر رواسب جيدة في كل من جبل سمران ومنطقة النقرة وحلاحيلة.

حصلت الوكالات الحكومية اليابانية حينها على ترخيص للتنقيب عن النحاس في المنطقة الغربية من البلاد (Michalski, 1997). يحوي مكمن المصانع على 7.2 مليون طن من الكبريتيدات المتعددة المعادن، بنسبة 5.3 % زنك، 1.4 % نحاس، 1.2 جرام/طن ذهب، و40.2 جرام/طن فضة.

## الزنـــك Zinc

الزنـك معـدن فلـزي يميـل لونـه إلـى الأبيـض أو الرمـادي الفـاتح أو الأزرق الفـاتح، ويسـمى بالخارصـين في اللغة العربية، وقد استعمل منذ القدم في صناعة العمـلات. وينتشـر اسـتخدام الزنـك في الصناعـة وذلـك لانخفـاض تكاليفـه، ويستعمل بشكل واسع في السبائك والتغليف والاستخدامات الكيميائية، وصناعة السيارات والدهانات. وتعتبر عملية الجلفنة وهي طلاء المنتجات المعدنية وخاصة الحديد والفولاذ بواسطة طبقة من الزنك أحد أهم التطبيقات المنتشرة عالميًا والمستعملة على نطاق واسع في حماية المعادن ومشغولاتها من الصدأ والتأكسد أو التفاعلات الكيميائية. ونظرًا لانخفاض درجة انصهاره ومتانة نسيجه فإنه يعتمد عليه في صناعة السبائك ذات الأحجام والأبعاد الدقيقة وفي بعض الاستعمالات الصناعية المهمة.

وتستخدم سبائك الزنك في صناعة أجزاء عديدة من السيارات مثل خلاطات الوقود ومقابض الأبواب، كما تستخدم ألواح الزنك في صناعة أغلفة البطاريات وألواح الحفر اللازمة للطباعة وأغراض الحماية للهياكل المصنوعة من الفولاذ. يدخل الزنك في صناعة مواد التجميل وصناعة الورق والمعدات الكهربائية، وفي صناعة الأسمدة وغذاء الحيوانات وبعض المستحضرات الطبية.

هنـاك أكثـر مـن 400 مكمـن للزنـك في صخـور الـدرع العربـي، ومـن أهمهـا؛ خـام الزنـك في الخنيقية بمحافظة القويعية، ومكمن كتام شرق ظهران الجنوب، ومنجم المصانع بمنطقة نجران، ويوجد الزنك أيضًا في منطقة الشعيب الواقعة بمنطقة عسير. كذلك يوجد الزنك منتجًا ثانويًا في منجمي الأمار ومهد الذهب.

### منجـــــم المصانـــــع:

تستمر دراسة مخزون منجم المصانع المرخص لشركة الدرع العربي للصناعات التعدينية (ASMIC)، وهو يحوي على 7.2 مليون طن من الكبريتيدات متعددة المعادن، بنسبة 5.3 % زنك، 1.4 % نحاس، 1.2 جرام/طن ذهب، و40.2 جرام/طن فضة.

### مكمـــــن الخنيقيـــــة:

هو مشروع متقدم للزنك والنحاس يقع على بعد 170 كم غرب الرياض. أوضحت دراسة جدوى أولية أجرتها وكالة الوزارة للثروة المعدنية على مخزون الزنك في الخنيقية أن احتياطيات الزنك فيها تبلغ 1.9 مليون طن، بنسبة 15.3 % زنك و0.9 % نحاس قابلة للتعدين تحت الأرض، أو 3.2 مليون طن بنسبة 12.2 % زنك و 0.8 % نحاس يمكن استخراجها عن طريق منجم مفتوح. تشير توقعات وكالة الوزارة للثروة المعدنية إلى معدل إنتاج سنوي يبلغ 34400 طن من مركزات الزنك بنسبة 56 %.

في الشهر التاسع من عام 2022م، أعلن عن فوز تحالف عجلان - موتشيكو في أول مزاد متعدد الجولات على الإطلاق للحصول على رخصة تعدين سعودية في الخنيقية، بقيمة 73 مليون دولار، حيث يمضي التحالف في المشروع، ويعمل مع المجتمعات المحلية، وقد بدأ في بناء وتطوير عمليات التعدين.

## الذهـــــب Gold

الذهب معدن ثمين ولين، سهل الطرق، إذ يُعد أكثر المعادن قابلية للطرق. وهو عنصر خامل؛ غير نشط كيميائيا، ونقاوته تقاس عالميًا بدرجة الصفاء، ويتصف بقوة توصيله للحرارة والكهرباء، ومقاومة التحلل، ولذلك كان من أفضل المعادن في صناعة المجوهرات والعملات، وفي أغراض الزينة والزخرفة لدوام بريقه وعدم تأكسده أو تلفه عند تعرضه للهواء أو الماء.

لـه اسـتعمالات صناعيـة وكيميائيـة عديـدة، فيدخـل ضمـن المـواد الكيميائيـة المسـتخدمة لأغـراض التصويـر، وفي حشـوات الأسـنان وفي صناعـة الترانزسـتور والمحفـزات ومـواد اللحـام والعمـلات المعدنيـة، وفي الإلكترونيـات كالأجهـزة الطبيـة والكهربائيـة والحواسـيب والهواتـف الخلويـة. تم اكتشـاف مـا يقـارب 1000 مكمـن للذهـب في المملكـة، وأهـم مناجـم الذهـب المنتجـة في المملكـة هـي: منجـم مهـد الذهـب ومنجـم الأمـار ومنجـم الصخيبـرات ومنجـم الحجـار.

تم اكتشـاف العديـد مـن رواسـب الذهـب ذات الأهميـة التجاريـة في الـدرع العربـي. هنـاك إمكانيـة تطويـر ثلاثـة مناجـم للذهـب في الحجـر والعمـار وبلغـة. مشـروع الحجـر قيـد الإنشـاء مـن قبـل شـركة التعديـن العربيـة السـعودية (معـادن)، بطاقـة إنتاجيـة سـنوية تبلـغ 55 ألـف أوقيـة مـن الذهـب و236 ألـف أوقيـة مـن الفضـة، ابتـداء مـن عـام 2001م. موقعـا العمـار وبلغـة، اللـذان يتمتعـان بإمكانيـات مـوارد تبلـغ 30 مليـون طـن، حيـث يمكـن أن يمثـل مسـتودع العمـار تحـت الأرض إنتاجًـا يتـراوح بـين 60.000 و90.000 أوقيـة مـن الذهـب سـنويًا، وحفـرة بلغـة المفتوحـة كميـة مماثلـة.

وفي ديسـمبر 1998م، مُنحـت شـركة معـادن أيضًـا ترخيصًـا للتنقيـب عـن الذهـب في الدويهـي بمنطقـة مكـة المكرمـة. ويعتقـد أن هـذا الموقـع يحـوي علـى 14 ألـف كيلوغـرام مـن الذهـب. كمـا أن هنـاك أعمـال التنقيـب في سـمران وشـيبان وحمضـة (Al-Attas, 2002).

## الفضـــــة Silver

تعـد الفضـة مـن المعـادن الثمينـة التـي تنفـرد وتتميـز بلـون أبيـض، وبريـق صـاف جميـل، وهـي عنصـر مـرن ولـين قابـل للتمـدد بالطـرق والسـحب. ولهـا أهميـة خاصـة في صناعـة المجوهـرات والحلـي. تتميـز الفضـة برونـق وجمـال وجاذبيـة

يجعلها إحدى أهم المواد المستعملة في الأواني وأدوات الزينة والزخرفة وصناعة العملات النقدية. تعتبر أفضل موصل للكهرباء والحرارة لذلك تستخدم في صناعة أجهزة اللمس الكهربائية مثل؛ أجهزة الميكروويف وغسالات الأواني المنزلية والتلفاز والهواتف وأجهزة الحاسوب.

توجد الفضة غالبًا مصاحبة لخام الذهب، كما في منجم مهد الذهب، ومنجمي سمرة وسميرة، وكذلك توجد بعدد من المواقع تشمل؛ وادي الغول ومكمن أم حديد ومكمن حجلان والسيدرية ومكمن مرجان.

## النيكـــــل Nickel

النيكل معدن صلب لامع يتميز بلون أبيض فضي، وموصل للكهرباء والحرارة نسبيًا، وله مقدرة الاندماج مع غيره من المعادن، وتتشابه صفاته الكيميائية مع صفات عنصر الحديد. قابل للمغنطة والطرق والسحب، ويمنع الصدأ والتآكل عن المعادن الأخرى. ويتميز النيكل بصلابته وقوة مقاومته للتآكل والأكسدة، ولذلك يستعمل في عدد كبير من الصناعات مثل؛ المعدات الزراعية وآلات القطع وقطع غيار السفن والمركبات وطواحين الفولاذ، وفي معدات حفر الآبار وأدوات البناء. كذلك يتميز بسهولة إعادة تدوير نفاياته واستعماله صناعيا مرات عديدة دون أن يفقد خواصه. يستخدم بشكل رئيس في صناعة السبائك المعدنية مثل؛ صناعة الأجزاء القوية من الأدوات الصلبة المستعملة في التطبيقات الالكترونية والكهربائية، أو في صناعة الصمامات الصلبة وقوالب صناعة الزجاج والبلاستيك ومضخات البنزين في الطائرات. يستعمل كذلك في تجهيزات الأفران والمصانع.

يوجد في عدد من المواقع مثل؛ وادي قطن جنوب الدرع العربي، وجبل جدير جنوب شرق محافظة رنية، ووادي خمال على بعد 40 كم إلى الشمال من مدينة ينبع البحر.

## الحديـــــد Iron

يتميز الحديد بقابليته للسحب والطرق والثني والمغنطة. وهو غير مستقر في الظروف الطبيعية؛ ولونه الأصلي عندما يكون نقيا يميل إلى الفضي، وسرعان ما يتغير إلى اللون الأحمر أو البني إذا تعرض للهواء الرطب. الحديد هو المكون الرئيس لصخور النيازك، ويعد من أكثر المعادن وأوسعها استعمالا من قبل الإنسان لميزاته العديدة وخواصه وتوفره في القشرة الأرضية، وإمكانية استخلاصه وفصله من الصخور المكونة له. ويُعد الحديد أساس الصناعات الهيكلية؛ فسبائكه شائعة الاستعمال في جميع الهياكل المعدنية، والهندسية البنائية، وفي الخراطة والمشغولات، ووسائل النقل، والمكابس، والأربطة الحديدية، والمكائن. ويستغل خام الرمل الحديدي من قبل مصانع الأسمنت.

تتواجد رواسب الحديد في عدة مواقع أهمها؛ وادي الصواوين جنوب غرب مدينة تبوك، (الذي يحوي مخزونه على احتياطيات قدرها 84 مليون طن بنسبة 42.5 % حديد)، وحديد أدساس جنوب غرب مدينة الرياض، وحديد وادي فاطمة في منطقة الشميسي غرب مكة المكرمة.

## الكـــــروم Chrome

الكروم عنصر يتفاوت لونه بين الأسود إلى الأسود المائل إلى البني مع لمعان فلزي، ويتميز بدرجة انصهار عالية، لا رائحة له ولا طعم وقابل للتشكيل بالطرق. يستعمل في حفر النحاس، وفي صناعة البطاريات، وتصفيح الحديد الصلب وكذلك في صناعة الأصباغ وفي بطانة الأفران التي تعكس الحرارة الشديدة نظرا لمقاومته للصهر. يستعمل أيضا في صناعة الحديد الصلب الغير قابل للصدأ، وفي إنتاج الفولاذ المقاوم للحرارة، وكذلك يستعمل في المواد الملونة. يتم خلط الكروم مع الفولاذ ليكون فولاذا مقاومًا للتآكل، ومن أمثلة ذلك استخدامه

في إنتاج الفولاذ الذي لا يصدأ. كذلك يستخدم الكروم بشكل أقل في صناعة بعض الكيماويات الخاصة بعملية دباغة الجلود، وتستخدم مركبات الكروم في صناعات النسيج لإنتاج اللون الأصفر ولإضافة مقاومة التآكل والمظهر اللامع للمعادن، كما يستعمل لأغراض الزينة.

تم اكتشاف عدد من الرواسب خام الكروم في مكامن؛ العيص ووادي الحمضة ومنطقة الشزم وظلم وحلبان. من أهم هذه المواقع؛ جبل الوسق، ويقع شمال شرق ينبع، وبئر طلوحة في منطقة حائل، وهو عبارة عن سلسلة من العدسات بعرض 1-3 متر وطول عدة أمتار، وهناك حالات انتشار محدود في جبل جحفة وجبل الحمدانية وجبل سخيرة وظلم.

## الألمنيـــوم Aluminum

الألومنيوم أكثر العناصر الفلزية الموجودة في القشرة الأرضية وثالث العناصر وفرة بصفة عامة بعد الأكسجين والسليكون. ويكوّن الألومنيوم حوالي 8 % من القشرة الأرضية. فلز خفيف الوزن، لونه فضّي ويمكن تشكيله بسهولة في أي شكل. ويمكن أن يدلفن أو يُطرق إلى ألواح سميكة لاستخدامه في الدّبابات المصفحة، أو إلى رقائق رهيفة تستخدم في لف بعض أنواع الحلوى. ويمكن سحبه على شكل أسلاك أو تصنيعه في شكل علب. والألومنيوم لا يصدأ، ويقاوم التآكل بفعل الظروف الجويّة أو المواد الكيميائية. تستخدم صناعة الإنشاءات المعمارية سبائك الألومنيوم، لصناعة مواسير المجاري المنزلية، والقطاعات المختلفة في المساكن والأسقف والجدران للمباني، وكذلك مواسير الأسلاك الكهربائية والإطارات الخارجية للنوافذ. وتُستخدم كميات كبيرة من الألومنيوم

في تصنيع وسائل النقل، مثل الطائرات والسّيارات والسُّفن وعربات السكك الحديدية. كما يستخدم الألومنيوم في العديد من المنتجات الكهربائية، وأسلاك الهاتف.

بدأت «معادن» إنتاج الألمنيوم العام 2012م من خامات البوكسايت من منجم البعيثة في منطقة القصيم، وتولت نقله إلى مدينة رأس الخير للصناعات التعدينية على ساحل المملكة الشرقي على الخليج العربي.

## البازلـــت Basalt

البازلت صخر ناري يتميّز بصغر حجم حبيباته، هو أحد الصخور المشهورة على سطح الأرض، ويتدرج لونه من الرمادي إلى الأسود الغامق، غنيٌّ بعدة عناصر منها المغنسيوم والحديد، كما أنه يتكون من عدة معادنَ مهمةٍ وهي؛ الأوليفين والبيروكسين والبلاجيوكليز، ويحتوي على نسبةٍ من السليكا تتراوح ما بين 45 % إلى 52 %. غالبًا ما يتكون البازلت في قيعان المحيطات (عند مراكز الانتشار)، وقد تتشكل جزرٌ كاملةٌ منه نتيجة البراكين التي تنفجر هناك، وقد تتكون هضابٌ كاملةٌ منه، كما هو الحال في الحرات، وأيضًا هناك براكين بازلتية على المريخ والزهرة. تمدنا طبيعة الصخور البازلتية بأدلّة مفيدة عن تراكيب الأرض والقمر الداخلية ودرجة حرارته. لقد ساهمت الخصائص المغناطيسية للصخور البازلتية في توفير المعلومات أو المعرفة الحاليّة للسلوك القديم للمجال المغناطيسي الأرضي، ومعدّل انتشار قاع البحار.

وقد يوجد البازلت على شكل حجر خفاف اسفنجي ومقذوفات (Bombs)، ويُسمَّى حجر الخفاف البازلتي جفاء أو سكوريا (Scoria)، وهو يختلف عن الخفاف (Pumice) الريولايتي فاتح اللون والغني بالسيليكا. ويستخدم البازلت في العزل

الحراري والكهربائي والصوتي، وفي أعمال البناء لإنشاء قواعد الطرق والسكك الحديدية، وفي تصنيع البلاط والأنابيب والقضبان والصناعة الطبية لجراحة العظام. ويعد البازلت مادة مثالية لأعمال الديكورات الداخلية، وزخرفة المجوهرات.

تغطي حقول البازلت (الحرات) المنتشرة في الدرع العربي في المملكة حوالي 90 ألف كيلو متر مربع، وأهمها حرة رهط، وحرة الحرة، والنعيمية شمال جدة، وحرة المحيسنية، وحرة كشب شمال شرق جدة، وحرة هتيمة، وحرة البرك، وحرة خيبر، وحرة نواصيف، وحرة البقوم، وحرة حضن شمال شرق الطائف.

## الرصـــاص Lead

الرصاص عنصر فلزي لين، قابل للطرق والسحب، أبيض مائل إلى الزرقة، يمتاز بلمعة ساطعة جدًا، كما أنه شديد المقاومة للتآكل، ويتم سبكه في بعض الأحيان مع الأنتيمون لتقسيته. وهو من أقدم الفلزات المعروفة في العالم. ونادرًا جدًا ما يوجد الرصاص في الطبيعة. وأكثر الأشكال شيوعًا الذي يوجد فيه الرصاص هو الجالينا أو كبريتيد الرصاص الطبيعي، ويتم استخراجه بواسطة عملية تحميص. كما يوجد أيضًا في الأنجليسيت (كبريتات الرصاص)، وسيروسيت (كربونات الرصاص)، وأكسيد الرصاص الأحمر ($Pb_3O_4$). وهو من المصادر المهمة لتلوث البيئة بالرصاص، وتشمل أنشطة التعدين والصهر والتصنيع وإعادة التدوير والاستخدام في طائفة واسعة من المنتجات. ويُستهلك الرصاص في العالم أساساً لأغراض صناعة بطاريات الرصاص الحمضية للسيارات، وفي عدة منتجات أخرى من قبيل الأصباغ والدهانات واللحام والزجاج الملون والأواني البلورية والذخيرة، وفي الخزف المُزجّج والمجوهرات ولعب الأطفال. ويستخرج معظم الرصاص المستخدم لأغراض تجارية في العالم في الوقت الحالي من عمليات إعادة التدوير.

## السيانايت النيفيليني Nepheline Syenite

يُعد خام السيانايت النيفيليني صخرا خشنا إلى متوسط الحبيبات، ويتكون أساسا من الفلسبار القلوي ومعدن النيفيلين. وينشأ السيانايت النيفيليني خاليا من الكوارتز، ومحتويا على ألومنيوم وصوديوم بنسب أكبر من تلك التي في الجرانيت. ونظرا لمحتوى السيانايت النيفيليني المرتفع من الألومينا والقلويات، وكذلك محتواه المنخفض من المعادن المحتوية على الحديد والمغنيزيوم فإنه يُعد مصدرًا منافسًا للفلسبار في صناعة الزجاج، وخاصة في صناعة الأواني والألواح الزجاجية، كما توجد له استعمالات في صناعة الخزف. ويستخدم كذلك في صناعة الدهانات والمطاط واللدائن. يوجد خام السيانايت النيفيليني في جبل سودة في مدين/ منطقة تبوك حيث يمثل الجبل جسما ناريا جوفيا يبلغ قطره حوالي 2 كيلومتر.

## الزيـــولايت Zeolite

الزيولايت معدن طبيعي ومهم اقتصاديا، يتألف من سيليكات الألومنيوم المائية المتبلورة للقلويات والمعادن القلوية الأرضية. توجد الزيوليتات في الحالة الطبيعية في الحجارة البازلتية وفي الرواسب، وللزيولايت في الطبيعة ثلاثة أشكال:

- الزيولايت المالئ للشقوق والعروق وفجوات الصخور البركانية.
- الزيولايت الحر: المتشكل بدرجات حرارة عالية.
- الزيولايت المتشكل بالحرارة المنخفضة.

جميع أنواع الزيوليت ذات تعدين سطحي (منجم مفتوح). ويستخلص الزيولايت من طحن ونخل الطف الحامل للزيولايت.

يوجد 150 نوعًا من الزيوليتات الاصطناعية. من المواد الرئيسة التي تدخل في صناعة الزيولايت السيليكا أو أكسيد الألومنيوم. يستعمل الزيولايت لمعالجة التربة والأسمدة لزيادة إنتاج المحاصيل الزراعية. ويعمل محفزا في صناعة الأسمنت وفي الصناعات البتروكيميائية وصناعة المنظفات الكيميائية ومساحيق الغسيل ومعجون التنظيف، وفي صناعة الزجاج وصناعة الإطارات المطاطية، وفي صناعة الأجهزة الإلكترونية ماصا للرطوبة، وفي صناعة الخزف والبورسلين.

يوجد الزيولايت في المملكة في الصخور البركانية لمجموعة جيزان التابعة للعصر الثلاثي في حرة شامة (طفيل) وجبل شامة، وكذلك في الطفوح والفوهات البركانية الفتاتية في حرات العصر الثلاثي والرباعي.

# رواسب المعادن اللافلزية Nonmetallic Mineral Deposits

## المغنـزايـــت Magnezite

المغنيزايت معدن أبيض إلى رمادي اللون وتتدرج ألوانه من الأبيض إلى الأسود، ويتواجد في الطبيعة على هيئة كتل أرضية أو عروق غير منتظمة، ويعتبر المغنيزايت الخام الرئيسي لعنصر المغنيسيوم ثامن العناصر من حيث الانتشار في القشرة الأرضية. ومن أهم منتجات المغنيزايت : المغنيسيا المقاومة للصهر وتشكل 85 % من حيث الإنتاج وتستخدم في مصانع الفولاذ لتبطين الأفران وتغطية المحولات الكهربائية وفي مسابك النحاس وفي تبطين أفران الأسمنت. المغنيسيا الكاوية وتشكل حوالي 10 % من حيث الإنتاج وتستخدم بدرجة كبيرة في مجال صناعة المواد الكيميائية والورق وصناعة الحرير المستخرج من السليولوز وفي مجالات الزراعة، وتعتبر المغنيسيا المنصهرة أثمن أنواع المغنيسيا الكاوية لاستخدامها في الدوائر الكهربائية والعوازل.

تعد المملكة موطن أكبر توضعات المغنزايت في العالم. تم بالفعل تحديد موقعين يحويان على كميات هائلة من المغنزايت. الأول يقع في منطقة ضرغط على بعد نحو 400 كيلومتر شمال شرق المدينة المنورة، ويحوي على 1.6 مليون طن من المغنزايت. واستنادًا إلى دراسة جدوى مكتملة، من المتوقع أن تنتج الخامات من هذا الموقع 20,000 طن سنويًا من المغنيسيا المنصهرة كهربائيًا، عالية الجودة لاستخدامه في أسواق الحراريات العالمية. ويوجد موقع المغنزايت الرئيس الآخر في جبل ركمان، على بعد نحو 180 كم جنوب شرق المدينة المنورة. ويوجد بنسب متفاوتة؛ في شرق الدفينة، وجبل بتران، وجبل عبت، وأملج، وجبل الحميرية، وجبل المليحنات وجنوب جبل وسمة.

كما أن حجر الدولوميت في خريصان (60 كم شمال مدينة الخرج)، وهو أحد المصادر الرئيسة للمغنيسيوم. ومصدر آخر واسع النطاق للدولوميت هو رواسب وادي عرعر، التي تغطي أكثر من 100 كيلومتر مربع على جانبي طريق الجوف - عرعر السريع، في شمال المملكة.

## الفوسفات Phosphate

الفوسفات مركب معدني لا يوجد في الطبيعة في شكله الذاتي، حيث إنه سريع التفاعل مع الأوكسجين، وتتباين ألوانه ما بين الداكن إلى الفاتح ويظهر على شكل رواسب فتاتية أو متصلبة. وتطلق كلمة فوسفورايت على رواسب الفوسفات التي يمكن تعدينها واستغلالها اقتصاديا، في حين يطلق مصطلح الصخور الفوسفاتية على تلك التي تحتوي على نسب منخفضة من الفوسفات. ويستعمل الفوسفات في عدد من الصناعات أهمها: صناعة الأسمدة؛ وهي تمثل حوالي 77 % من استخدامات الفوسفات، حيث يمثل غذاء أساسيا لنمو النباتات. كذلك في صناعة الفوسفور الحراري وحمض الفوسفور؛ وتمثل هذه الصناعة 8 % من استخدامات الفوسفات. ويتم استخدامها في معالجة أسطح المعادن مثل الألومنيوم والنحاس والحديد، وفي المنظفات الكيميائية والمبيدات الحشرية. يستخدم أيضا غذاءً للمواشي؛ وتمثل هذه الصناعة نسبة 6 % من استخدامات الفوسفات، وفي صناعة بولي فوسفات؛ وتمثل 5 % من استخدامات الفوسفات، كما يستخدم في منظفات الغسيل الصناعية والمنزلية. .

تمتلك المملكة بعض أكبر رواسب الفوسفات في العالم، وتقع في الغالب في المناطق الشمالية والشمالية الغربية. وتقدر رواسب طريف وسنام ورواسب الجلاميد المثيرة للإعجاب بمئات الملايين من الأطنان. ووفقًا لتقديرات معادن، فإن حقل الجلاميد وحده سيسمح باستغلال نحو 200 مليون طن من

الفوسفات، وهو ما سيدعم عملية التعدين لمدة 20 عاما في البلاد. وقد أعلنت شركة معادن عن اكتشاف عدد إضافي من رواسب الفوسفات ذات المستوى العالمي في الجزء الشمالي من المملكة. ومن خلال استثمارات القطاع الخاص، تستطيع المملكة استغلال الفوسفات المنتج محليًا لتعزيز مكانتها كثالث مصدر للأسمدة في العالم (Spencer, 1999).

تتوقع وكالة الوزارة للثروة المعدنية أن تستحوذ المملكة على 16 % من سوق الفوسفات العالمي. وتشمل الأسواق المستقبلية المحددة للفوسفات الصين والهند واليابان وباكستان وإيران.

## البوكسـيت Bauxite

البوكسيت خام لتربة متبقية Residual Soil، يميل لونه إلى الاحمرار، وهو أهم مصدر لعنصر الألومنيوم. تستخدم الأنواع عالية الدرجة في إنتاج الألومنيوم، في حين تستخدم الأنواع الأخرى الأقل درجة في صناعة مواد الصنفرة والحراريات والإسمنت الغني بالألومنيوم، وفي صناعة المادة المزيلة للألوان، وفي صناعة الفلاتر لأغراض التنقية. كما يستخدم في الصناعات الكيميائية وصناعة السيراميك وخام البوكسيت الأحمر ذي الدرجة العالية. ومن الاستخدامات الثانوية لخام البوكسيت تلك في مصافي تكرير النفط.

تؤكد الإحصائيات أن هناك احتياطيات كبيرة من هذه المادة الخام تكفي لأكثر من 50 سنة قادمة لدعم تصنيع الألومنيوم. وتشير المعلومات إلى أنه تم اكتشاف رواسب مهمة من البوكسيت في الزبيرة عام 1979م من قبل شركة ريوفينكس المحدودة. وقامت ريوفينكس بإجراء المزيد من أعمال الاستكشاف فيما بين عامي 1979–1984م، والتي حددت تلك المواقع الممتدة بدون انقطاع على طول 105كم، بمتوسط عرض يقرب من 2.05 كيلومترات (حوض الزبيرة).

ويشمل الحوض ثلاثة قطاعات رئيسة: الشمالي والأوسط والجنوبي، وكل منها بطول تقريبي يصل إلى 30 كيلومتراً.

وقد حازت شركة معادن على حق الاستكشاف ودراسة جدوى مواقع البوكسيت في الزبيرة. وفي شهر ديسمبر من عام 2001م، كلفت معادن إحدى الشركات العالمية بدراسة الموقع حيث أظهرت النتائج أن إجمالي الاحتياطي (بما فيه الموارد المؤكدة والمرجحة والمحتملة) في المنطقتين الجنوبية والوسطى من حقل الزبيرة بـ 377 مليون طن متري، تحتوي تقريباً على 50.4 % من الألومينا وحوالي 8.3 % من السليكا، حيث قدرت الاحتياطات من الخام المؤكد والمحتمل في الزبيرة وفي المنطقة الجنوبية منها بحوالي 39.40 مليون طن متري.

وفي تقرير خبراء شركة معادن المتعلق بالألومنيوم، أشير إلى أن إجمالي المصدر المتوقع للمنطقة الجنوبية من رواسب الزبيرة والذي بلغ 240 مليون طن، 50 % منها ألومينا و8 % منها أكسيد السليكا. يتمتع المخزون بالقدرة على إمداد صناعة الألومنيوم في دول مجلس التعاون الخليجي. وقد بدأت سنة 2008م، العمليات الإنتاجية في المنجم، الذي يتألف من منجم مفتوح مرافق معالجة.

## البنتونيت Bentonite

لبنتونيت صلصال يتكون أساسًا من معادن الطين وبعض الشوائب من معادن الصخور النارية، وهناك نوعان من البنتونيت هما: البنتونيت الصودي؛ وهو النوع الذي ينتفخ ويزداد حجمه من 15 – 20 مرة عند إضافة الماء، والبنتونيت الكلسي؛ وهذا لا ينتفخ ولا يزداد حجمه عند إضافة الماء.

ويستخدم النوع الأول بصفة رئيسة في تجهيز طين الحفر المستخدم في حفر آبار البترول، كما يستعمل بكميات أقل في مواد التجميل والصناعات الدوائية وفي مواد منع التسرب، وفي أعلاف الحيوانات للمساعدة على الهضم وفي الزراعة.

توجد رواسب البنتونيت في أماكن عدة من أهمها؛ راسب خليص وراسب عسفان. ويتميز راسب بنتونيت خليص باحتوائه على معدن السمكتيت، وقد أجريت اختبارات على هذه الرواسب لاستعمالات هندسية أثبتت جدواها إلى حد كبير، ولكنه يحتاج إلى معالجة عند استخدامه لأغراض الحفر.

يوجد في راسب حليفة ومشاش الوبيلية في صخور الغطاء الرسوبي، إلى الشمال الشرقي من الدرع العربي.

## البـــاريت Barite

يظهر الباريت بلون أبيض إلى عديم اللون عندما يكون نقيًا، ولكنه بشكل عام يتأثر بصبغة الشوائب المصاحبة له؛ فيتراوح لونه من رمادي إلى أسود متدرج إلى الأصفر والأخضر والأزرق، ويشكل الباريت المادة الرئيسة أو المادة اللاحمة للأجسام المتطابقة الموجودة في التتابعات الرسوبية الطبقية. خصائص الباريت تجعله عاملًا مثاليًا في تبريد وتشحيم معدات الحفر القاطعة للصخور، وتقوية جدران مثاقب الحفر، ويستخدم 90 % من الباريت المنتج حاليا في عمليات الحفر العميقة. ونظرا لمقاومة الباريت للضغط العالي للبترول والغاز، فإن ذلك يساعده على منع حوادث الانفجارات، وكذلك يستخدم في تصنيع أنواع محددة من الزجاج، وكمادة حشو في إنتاج اللدائن (بي. في. سي.) والورق، والخزف، والدهان، ومادة صابغة في الصناعة الكيميائية.

يظهر أكبر راسبين معروفين للباريت في المملكة (رابغ والعقيق)، وتوجد المواقع الأخرى في وادي شعيلة والنقرة الشمالية، وجبالة والتي تقع جميعها شمال شرق المدينة المنورة، كما يوجد الباريت في عدة مواقع على امتداد السهل الساحلي للبحر الأحمر خاصة في وادي أظلم، وضيلان، وينبع.

## الكوارتـــزيت Quartzite

الكوارتزيت صخر متحول عالي المحتوى من أكاسيد السيليكا، وينشأ عن صخور الحجر الرملي ويتميز عنه بوجود التشققات، ويتواجد عادة مصاحبا لرواسب الحجر الرملي. ويستخدم الكوارتزيت عوضا عن رمال السيليكا في إنتاج سبائك الحديد والسيليكون وفي إنتاج السيليكون عالي النقاوة الذي يستخدم في صناعة الكترونيات وأجهزة الحاسب الألي.

يتواجد خام الكوارتزيت المصاحب لرمل السيليكا بمحافظة الغاط وبجبال الدغم بمنطقة الرياض.

## الفلدســـبار Feldspar

الفلدسبار معدن ذو ألوان فاتحة غالبا كالأبيض والوردي والأخضر والبرتقالي أو الرمادي. ويستخدم في العديد من الصناعات أهمها: صناعة الزجاج حيث يعطي قوة ميكانيكية ومقاومة حرارية للزجاج، وصناعة الخزف ويستخدم فيها كعامل مساعد للصهر وفي صناعة مواد الكشط نظرا لقدرته على التكسر ويستخدم أيضا كمواد حشو في صناعة البلاستيك، والدهانات، والمطاط، وصناعة العوازل الكهربائية.

من أهم مناطق تواجد الفلدسبار في المملكة: منطقة الرويضة غرب الرياض وهو ملائم لصناعة الخزف. منطقة بئر نبط شمال ينبع البحر وهو ملائم لصناعة السيراميك. منطقة بئر سرار شمال مدينة بيشة وهو ملائم لصناعة الخزف و منطقة جبل سودة جنوب مدينة حقل.

## البـــوزولان Pozolane

البوزولان مادة بركانية فقاعية خفيفة، تتميز باللون الداكن إلى الأسود. يستخدم لإنتاج الاسمنت البورتلاندي نظرا لأنه يزيد من المقاومة الكيميائية للأسمنت، ويلعب دورًا في جعل عجينة الاسمنت أكثر لدونة أثناء فترة التصلب، ويقلل من نفاذية الاسمنت، ويقلل من كمية الاسمنت المستخدمة في الخرسانة والبلوك. يحسن البوزولان من خواص اللدونة والتماسك ويقاوم الماء الكبريتي والمياه ذات الملوحة. ويدخل في صناعة البلوك ومواد البناء، وفي الخرسانة الخفيفة مسبقة الصنع في المباني السكنية والعامة، حيث يقلل الأحمال على أساسات المباني بنسبة لا تقل عن 30 %، وكذلك الحال عند استعمال البلوك البوزولاني بديلًا عن البلوك الإسمنتي في تلك المباني.

يوجد العديد من المخاريط البركانية في الحرات البازلتية تحتوي على مواد بوزولانية، ومنها؛ حرة هتيمة، وحرة لونير، وحرة كشب، وحرة البقوم، وحرة نواصيف، وحرة الحرة.

## الملـــــح Halite

يتكون الملح الطبيعي من معدن الهاليت، الذي يتألف من عنصرين هما الكلور والصوديوم، ويعرف كيميائيا باسم كلوريد الصوديوم، وتجاريا بملح الطعام. وهو مركب أبيض اللون، شفاف إلى شبه شفاف، يتوفر بألوان أخرى منها الأحمر والأصفر والبرتقالي والوردي والأخضر والأزرق والبنفسجي والرمادي، وهو جيد الذوبان في الماء، كما يتميز بخاصيته في إذابة الثلوج والجليد. ويوجد الملح في الطبيعة على عدة هيئات: محاليل ملحية طبيعية مثل مياه البحار والمحيطات والينابيع، ملح صلب على هيئة رواسب طبقية، وقباب ملحية، وسبخات ساحلية أو داخلية.

الملح ذو استخدامات كثيرة من أهمها: إنتاج الكيماويات، وفي إضفاء نكهة للطعام وحافظ للأغذية الإنسانية والحيوانية، وعامل تخفيض درجة تجمد الماء لإذابة الثلوج والجليد. ويستخدم في عمليات الأمطار الاصطناعية في المناطق الصحراوية.

توجد الرواسب الملحية في المملكة في عدة مناطق من أهمها: الرواسب الملحية على ساحل البحر الأحمر، وفي جازان يظهر الملح على شكل قبة ملحية على سطح الأرض، وفي جزر فرسان يوجد الملح على هيئة ترسبات ملحية، وفي رأس كركومة، إلى الجنوب من مدينة ضبا، وفي الكراع شمال محافظة جدة، وفي سبخة الرياس جنوب مدينة الجبيل، وسبخة جيب عويد جنوب مدينة الظهران، وسبخة رأس القرية جنوب مدينة الدمام، وسبخة أبا الحمام. ومن أهم ترسبات السبخات الملحية الداخلية: مملحة القصب؛ وتقع شمال غرب محافظة ضرما، وحظوظاء في وادي السرحان، والعوسجية في منطقة القصيم. كما توجد عدة ترسبات ملحية سبخية على ساحل البحر الأحمر مثل: سبخة خليج سلمان وسبخة السودة بالشعيبة شمال محافظة الليث.

## الكاولـــين Kaolin

الكاولين صخر طيني دقيق الحبيبات غالبا ما يكون أبيض اللون، ويتدرج إلى اللون الرمادي ثم الأصفر، ويوجد في الطبيعة على هيئة عدسات مسطحة أو طبقات متتابعة. ومن خواص الكاولين القدرة على امتصاص الماء، كما أنه ينتفخ بوجود الماء، وهو مادة خاملة، كما أن ناقليته للحرارة والكهرباء ضعيفة ويتميز باعتدال ثمنه. واستخدامات الكاولين الصناعية هي: صناعة الورق حيث تستهلك صناعة الورق حوالي 50 % من إنتاج الكاولين في العالم، لأنه يضفي

على الورق الملمس الناعم والبريق الزجاجي وصلاحيته للطباعة، هذا بالإضافة إلى قلة تكلفته. كما يدخل في صناعة البلاستك وصناعة السيراميك حيث ينظر إلى صناعة السيراميك أنها الأولى تاريخيا في استخدام الكاولين، وفي صناعة المطاط لتحسين قوة الشد، ومقاومة التآكل وزيادة الصلابة، وفي صناعة مواد الطلاء والدهانات.

يوجد الكاولين متعدد الألوان في عدة مناطق بالمملكة ومن أهمها: - الزبيرة، وخشم راضي شرق الخرج، وجبل شهبة، ودرب سعد شمال شرق الرياض.

## الأسبســـتوس Asbestos

الأسبستوس (الحرير الصخري) عبارة عن مواد غير عضوية تحتوي على العديد من المعادن الطبيعية التي يدخل في تركيبها أملاح السيليكات، إلا أنها تختلف عن بعضها في التركيب الكيميائي والخواص الطبيعية لاختلاف كميات المغنسيوم والحديد والصوديوم والأوكسجين والهيدروجين فيها. وهناك ثلاثة أنواع رئيسة من الأسبستوس. كل نوع منها ينتمي إلى عائلة الأسبستوس السربنتيني أو الأمفيبولي:

- الأسبستوس الأبيض كريسوتايل؛ يتم الحصول عليه من صخور السِّرْبِنتين. والكريسوتايل من أكثر الأنواع استخدامًا في الصناعة.
- الأسبستوس البني أموسايت؛ وهو الاسم التجاري للأمفيبولات،
- الأسبستوس الأزرق (ريبيكايت أمفيبوليي) ويُعد أخطر الأنواع. يستخدم هذا الأسبستوس في مجال البناء وتسقيف المنازل، وفي العوازل الداخلية والخارجية، وأنابيب صرف المياه والأدخنة والتهوية. وتدخل ألياف الأسبستوس في صناعة

أغلفة الأبواب المقاومة للحريق والخزائن الفولاذية، وكذلك يستخدم مادة عازلة للكابلات والأسلاك واللوحات الكهربائية.

تقع أهم مواقع الأسبستوس في المملكة في كتل السربنتينايت المرتبطة بدروز الأفيولايت، وقد تم تدوين سبعة مواقع في درز ينبع الالتحامي (جبل ربان وجبل خشم نابون وجبل خضراء وأملج)، وثمانية في درز نبيتة الالتحامي (جبل الحميرية وبئر طلوحة وجبل الكرب والدفينة وحمضة وهجرة)، وأربعة في درز الامار الالتحامي (أم حجة و جبل بتران وجبل التيس وحفيرة)..

## الجبس Gypsum

الجبس من أكثر المعادن انتشارا في الطبيعة سواء كان معدنا أو صخرا رسوبيا. ويوجد في الطبيعة مع حجر الجير والطين، ويتدرج لونه من الزجاجي الشفاف إلى الأبيض شبه الشفاف إلى الرمادي، ومن البني إلى الأحمر. وللجبس استخدامات صناعية عديدة في البناء وبلاط الأسقف، والفواصل. وكذلك يستخدم عوازل حرارية ومنظمات لقياس الرطوبة، وفي إنتاج الاسمنت البورتلاندي، ويستخدم الجبس الطبيعي كسماد طبيعي، كما يستخدم في صناعة الزجاج، ويستخدم الجبس الناعم في صناعة الدهانات والصمغ، وفي صناعة حشوات الورق.

أهم مواقع الجبس في المملكة؛ على امتداد ساحل البحر الأحمر من خليج العقبة شمالا إلى جازان جنوبا، وتتركز بين خليج العقبة ومدينة ينبع البحر: منطقة مقنا - شرم محار- شرم حسي، في جبل بوانه شمال شرم محار. منطقة القصب: يوجد الجبس شمال ينبع البحر، وفي شرم الخور مصدر

للجبس الأبيض. كما يوجد أيضا في منطقة الخرج القريبة من مدينة الرياض وخاصة في السهول الجنوبية وجنوب شرق أشقر مراغة، وفي العيون.

توجد رواسب الجبس شمال مدينة بريدة. ويوجد الجبس أيضا بكميات كبيرة في المنطقة الشمالية وكذلك في المنطقة الشرقية بموقع خشم أم حويض على خليج سلوى وفي منطقة عين دار.

## رمـــل الســـيليكا Silica Sand

رمل السيليكا أو الرمل الزجاجي هو المادة الأساسية لصناعة الزجاج. يستعمل رمل السيليكا عالي الجودة في عدد من الصناعات أهمها تصنيع الزجاج وبعض صناعات المواد الإنشائية. وأهم الصناعات التي تستخدم رمل السيليكا أساسًا لمنتجاتها صناعة الزجاج وسبك المعادن، ويمزج بالصلصال أو الزيت لتصنيع قوالب سبك المعادن. تتطلب عمليات تصفية مياه الشرب أو معالجة مياه الصرف الصحي إلى رمل السيليكا الخشنة. يستعمل رمل السيليكا في الكواشط كورق الزجاج وفي عمليات تنظيف السطوح، في صناعة السيراميك. كما أن له خصائص حرارية مناسبة لإنتاج طوب السيليكا الحراري بمتانة كافية، وكذلك مواد البناء الخالية من الشوائب. ويستخدم في صناعة الصابون والمنظفات. يعد رمل السيليكا المادة الأولى التي استخدمت في صناعة الخلايا الشمسية، وهي تشكل محتوى مهما في صناعة الإلكترونيات. وتستخدم في إنتاج الخرسانة الخفيفة ذات الألواح المسلحة وغير المسلحة للجدران والأسقف. وهناك منتجات عديدة قائمة على رمل السيليكا أهمها: ألواح الزجاج المسطح والمرايا الزجاجية، وفي واجهات الأبنية والألياف الزجاجية، وفي الصوف الزجاجي العازل.

يوجد في المملكة ما يزيد عن 256 موقعا يحتوي على رمل السيليكا من أهمها: جبال الدغم شمال شرق الرياض، وفي جبل الفوهة، وفي تيماء بمنطقة تبوك، وجبل صدوي في المنطقة الشرقية، وكذلك يوجد رمل السيليكا بمنطقة الجوف.

## الجـــرانيت Granite

الجرانيت صخر ناري متبلور قابل للقطع والصقل والتلميع ، ويعتبر أهم ما يمكن إضافته إلى المنشآت المعمارية. يتميز بالقدرة على تحمل الخدش والعوامل الجوية الأخرى. ويستخدم الجرانيت في المنشأت في تغطية الواجهات والأرضيات لإكسابها الجمال .

يوجد بالمملكة الكثير من مواقع الجرانيت وأهمها: الرويضة بمحافظة القويعية - بر عسكر: شمال غرب نجران ويتميز باللون البني. النجوف: غرب نجران ويتميز باللون الأحمر القرمزي، جبل كور شمال غرب رنية يتميز باللون الأخضر وجبل وردات شمال رنية يتميز باللون الوردي وجبل البكري شمال شرق عفيف يتميز باللون الرمادي. كما يوجد في منطقة مكة المكرمة في الهدا ووادي ليه والجموم وفي منطقة حائل.

## الرخـــــام Marble

خام الرخام عبارة عن صخر جيري متحول، ذي حبيبات متبلورة دقيقة، ويدل اللون الأبيض للرخام على نقاوته، في حين أن اللون الرمادي أو البني المصفر أو الأسود يدل على احتوائه على شوائب. وبينما يستخدم الرخام

بشكل واسع بكافة ألوانه وأشكاله في أعمال البناء لتكسية الواجهات الداخلية والخارجية، والأرضيات والسلالم، فإن الأنواع البيضاء منه تستخدم بعد طحنها لإنتاج كربونات الكالسيوم التي تدخل في عدة صناعات من أهمها: السجاجيد والموكيت، والدهانات، والورق، والغراء، والمواد اللاصقة، والأدوية.

يوجد الرخام في عدة مناطق بالمملكة، أهمها: جبل فرسان بمحافظة رابغ، وفي مدركة في جبل قرين شمال شرق جدة، وفي وادي فاطمة شمال مكة المكرمة، وفي وادي تربة جنوب شرق الطائف، وفي جبل خانوقة شمال مدينة البجادية، وفي جبل غزلان إلى الجنوب من عفيف، وفي جبل غدارة شمال شرق عفيف.

## الحجـــر الجـــير Limestone

خام حجر الجير عبارة عن صخر رسوبي يحتوي على نسبة لا تقل عن 90 % من كربونات الكالسيوم. وتتدرج ألوانه بين الأبيض والأصفر والبني والوردي والأحمر، وأحيانا اللون الأسود، ويُعد الحجر الجيري مادة رئيسة أو ثانوية في تكوين كثير من الصناعات منها: صناعة الاسمنت؛ حيث يمثل حجر الجير المادة الأساسية لهذه الصناعة، وفي إنتاج (رمادا الصودا) المستخدم في صناعة الزجاج وصناعة المنظفات والمطهرات. ومادة مساعدة في صهر الحديد والفولاذ. وأيضا في صناعة الجير الحي الذي يستخدم في الصناعات الكيميائية، والجير المطفأ الذي يدخل في صناعة مواد البناء وتثبيت المباني أو إكساء جدران المنازل. يعد حجر الجير من أهم المعادن المستخدمة في حشوات معدنية لكثير من القطاعات لسهولة طحنه وقلة امتصاصه للزيوت ولعدم تسببه في تآكل الأجهزة. كما يستخدم في صناعة لفات القار لعزل الخزانات من التسرب. يدخل حجر الجير في الصناعات

البلاستيكية اللازمة لصناعة القوالب، وفي السيارات وفي صناعة أدوات السباكة والكهرباء وقطع الأثاث. وفي صناعة أحجار الزينة لتغطية الأرضيات والواجهات الداخلية والخارجية للمباني، وفي صناعة مصفيات الصرف الصحي، وفي رصف الطرق.

يوجد أكثر من 400 موقع لخام حجر الجير في المملكة منها: جبال طويق؛ التي تمتد من السليل إلى الزلفي، وأم الغربان شرق مدينة الخرج، وفي سدوس؛ غرب مدينة الرياض، وفي وادي تربه جنوب شرق الطريف، وفي جنوب رابغ، وفي الشعيبة ورأس بريدي ورأس مهاريش، وفي الخرسانية بالمنطقة الشرقية. ويوجد أيضا في عدة مواقع أخرى بمنطقة الرياض منها: شمال الدرعية، ووادي حنيفة، والحائر، وشمال الجفير، وشمال الخرج.

## حجر الدلومايت Dolomite

حجر الدلوميت هو حجر جيري تزيد فيه نسبة معدن الدلوميت عن 50 % من الصخر. أطلق اسم الدولوستون (Dolostone) على الصخر، وذلك تجنباً لحدوث خلط بين معدن الدولوميت وصخر الدلوميت. يشبه نسيج حجر الدلوميت بصورة عامة حجر الجير، لكنه يختلف عنه في التفاصيل الدقيقة. ويرتبط حجر الدلوميت ذو الحبيبات الدقيقة نمطياً بصخور المتبخرات. وفي أغلب الصخور التي تحتوي على الظر (Chert) والدلوميت، يبدو أن الظر قد حل محل الدلوميت وليس العكس. يوجد الدلوميت غالباً مع حجر الجير المرافق له وذلك في شكل طبقات متداخلة أو متدرجة على جوانب حجر الجير، وفي بعض المناطق لا يتطابق حجر الدلوميت مع مستويات التطبق. يستخدم حجر الدلوميت للزينة وركام خرساني، ومصدر خام لاستخراج اكسيد المغنيسيوم، وكذلك في عملية بيدجون لإنتاج المغنيسيوم. كما يُعد

صخـرًا ذا قيمـة اقتصاديـة لتخزينـه للبتـرول. يتـم اسـتخدام حجـر الدلوميـت أحيانـا لصهـر الحديـد والصلـب، وفي صناعـة الزجـاج المصقـول.

يوجـد حجـر الدلوميـت في المملكـة بكثـرة في عـدة مناطـق: خريصـان (شـرق الخـرج)، وفي ثـول (شـمال جـدة)، وفي جبـل الشـهبة (غـرب عفيـف)، وفي جبـل غـدارة (شـمال شـرق عفيـف)، وفي وادي عرعـر (الجـوف)، وجـال الخرطـم (عنيـزة)، وجـال الشـجر (بريـدة)، وفي الدمـام والجبيـل وفي الـدرب (شـمال جيـزان)، وفي الطرطيـة (جنـوب عفيـف)، وفي جبـل الطـراد والبجـر (شـرق رنية).

## الحجـــر الرملـــي Sandstone

صخـر رسـوبي عبـارة عـن رمـال متصلـدة، تم اسـتعماله في البنـاء، والوانـه تتـدرج مـن الأصفـر إلـى البنـي إلـى الأحمـر. تتكـون معظـم حبيبـات الحجـر الرملـي مـن الكوارتـز ، ذات نسـيج فتاتـي مـع مـادة لاحمـة بـين الحبيبـات، ويسـتخدم الحجـر الرملـي في سـن المنشـار والسـكين وشـحذ الشـفرات وغيرهـا مـن نـواتج الفـولاذ وفي مـواد البنـاء، ويسـتخدم في أحجـار الزينـة، يوجـد في المملكـة الكثيـر مـن المواقـع التـي يتواجـد فيهـا الحجـر الرملـي منتشـرة في جميـع أنحـاء المملكـة.

## اليـــورانيـــوم Uranium

اليورانيـوم عنصـر كيميائـي مشّـع وسـام، لونـه أبيـض مائـل للفضـي، وهـو فلـزّ ثقيـل ينتمـي لسلسـلة الأكتينيـدات، كمـا أنّـه يُعـدّ مـن ضمـن أكثـر العناصـر الـ (48) وفـرة في العالـم، وهـو أكثـر وفـرة مـن الفضـة بأربعـين مـرة، ولا يوجـد حـراً في الطّبيعـة إنّمـا ضمـن فلـزات مثـل؛ الأورانيـت والبتشـبلند واليورانينيـت، والكارنوتيـت، والأوتونيـت، والتوربِرنيـت. اليورانيـوم المخصّـب هـو نـوع مـن اليورانيـوم الـذي تكـون

نسبة اليورانيوم 235 فيه تتراوح بين 3 % - 5 % بدلاً من النّسبة المعتادة التي تبلغ 0.7 %، وتتم زيادة نسبة اليورانيوم235- عن طريق فصل النّظائر، أو باستخدام جهاز الفصل المركزيّ. يستخدم في إنتاج الطّاقة النووية لأغراض عسكريّة، وفي صناعة الدّبابات والصّواريخ، وكذلك في إنتاج الطاقة النوويّة لأغراض تجاريّة، وفي تقدير عمر المواد إشعاعيًا، وفي تصنيع الأسمدة الفوسفاتيّة، وتلوين الزّجاج بحيث يشع بلون أصفر مائل للاخضرار عند تعريضه للضّوء الأسود (الأشعة فوق البنفسجية).

يبلغ مخزون اليورانيوم في المملكة تقريبا 60 ألف طن، ما يعادل 6 % من الاحتياطي العالمي، ويوجد في تسعة مواقع، تتركز معظمها في منطقة حائل وغرب تبوك، وبالقرب من جبل صايد في المدينة المنورة.

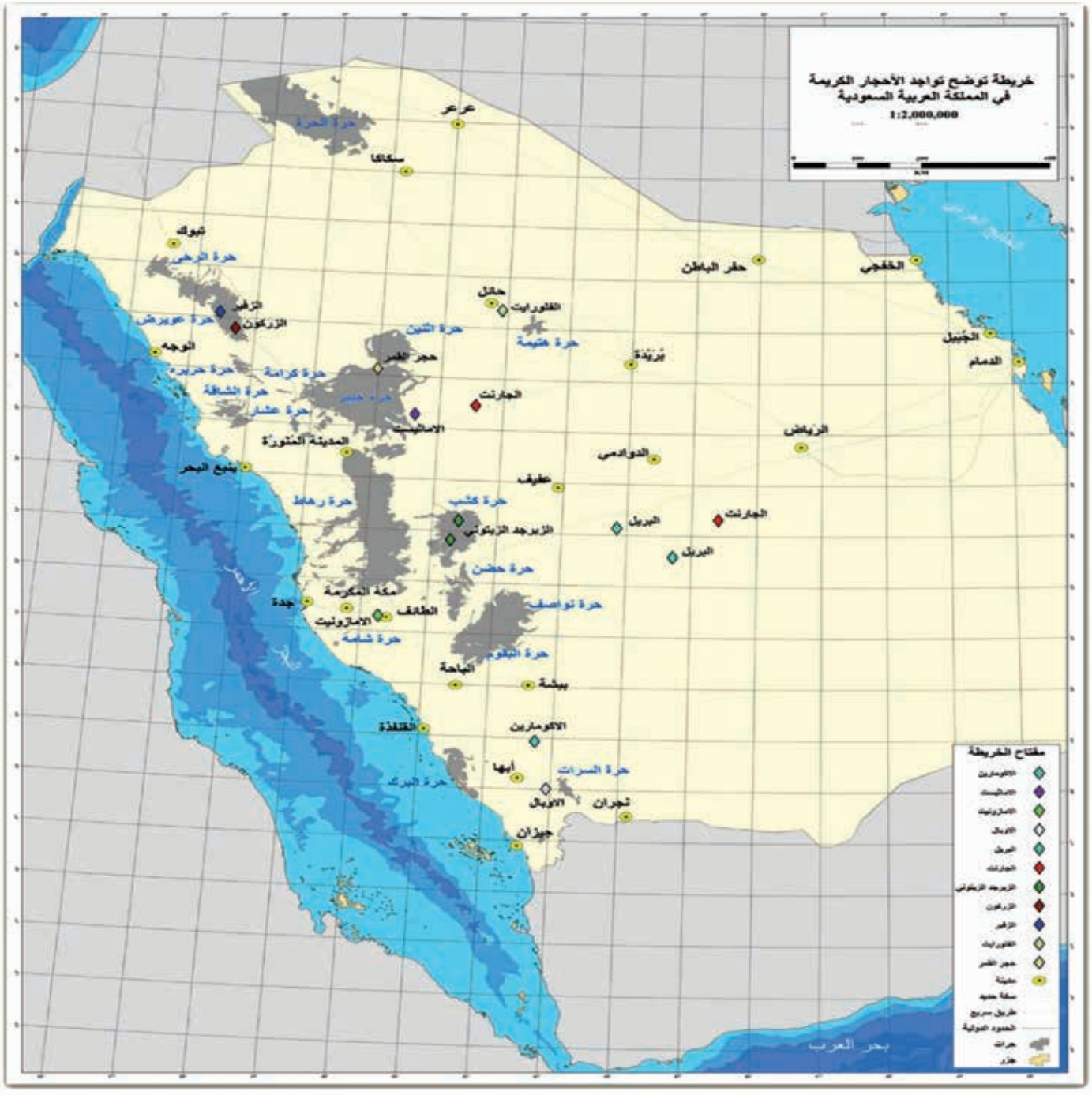
# الأحجـــار الكريمـــة في المملكـــة

الأحجار الكريمة عبارة عن مواد طبيعية يستخدمها الناس منذ آلاف السنين لأغراض الزينة والحلي، حيث إن ألوانها الجميلة جذبتهم وجعلتهم يهتمون بها وبالبحث عن مناجمها. تنقسم من حيث الأصل إلى نوعين: **النوع الأول**: أحجار كريمة ذات أصل عضوي و يكون منشأها كائن حي مثل اللؤلؤ والمرجان والكهرمان والعاج والأصداف و هذه مواد رخوة تمتاز بالجمال والندرة وتستخدم في صناعة الحلي والمجوهرات والسبح وأعمال النحت. **النوع الثاني**: أحجار كريمة ذات أصل غير عضوي و هي عبارة عن معادن طبيعية صلبة ذات تركيب كيميائي مميز وترتيب ذري ثابت قد تكون متبلورة أو غير متبلورة ويتم إستخدامها في صناعة الحلي و المجوهرات كالياقوت و الألماس والزمرد وغيرها.

تتكـــون بعض الأحجـــار الكريمة في أعمـــاق مختلفة قد تصل إلى عمق 200 كم كما في حالة الألماس الذي يتكون في ظروف ضغط و درجة حرارة عالية جدا وتعتبر الصخور النارية البقماتاتية و الصخور المتحولة و الرسوبية من أهم مصادر الأحجار الكريمة و تعتبر الرواسب الوديانية مصدر رئيسي للأحجار الكريمة خاصة الألماس و الياقوت.

تتميز المملكة بتنوع كبير في المعالم الجغرافية والجيولوجية والبيئية. تم اكتشاف بعض أنواع الأحجار الكريمة وشبه الكريمة في الحمم البركانية (الحرات)، والصخور المتحولة والعروق البجماتايتية في الجرانيت، وفي الصخور الرسوبية. تم اكتشاف عدد من الأحجار الكريمة مثل؛ الياقوت الأزرق، والبريل والتورمالين وحجر القمر والأمازونيت والكوارتز والجمشت والزبرجد والعقيق وغيرها.

يعد موقع الحرة الحرة شمال جنوب سكاكا موقعا خصبا للأحجار الكريمة والنادرة. تحتوي منطقة صحراء الطويل بالجوف على ملايين الأطنان من الصخور الرسوبية والرمال التي تستخدم كمكون رئيسي في صناعة الأسمنت والجبس والفخار والسيراميك والزجاج. تحتوي حرة رهط البركانية جنوب المدينة المنورة على أكثر من 500 فوهة بركانية وملامح جيولوجية فريدة وأحجار كريمة مثل أحجار القمر. كما تحتوي منطقة بيشة على أحجار كريمة مثل البيريل بأنواعه.




خريطة تبين أهم مواقع الأحجار الكريمة في المملكة

## الجـــــارنت Garnet

يمثل معدن الجارنت مجموعة من سيليكات الحديد والألمنيوم مع تركيب كيميائي يتمايز بتبادل مجموعة عناصر الكالسيوم، المغنيزيوم، الحديد أو المنجنيز، كذلك عناصر الألمنيوم والكروم أو التايتانيوم. ولهذه المعادن خصائص فيزيائية متشابهة هي: قساوة تتراوح بين 7.5 – 8، مقاومة كيميائية وفيزيائية عالية ، مكسر محاري، وألوان متعددة أكثرها شيوعاً اللون الأحمر القاني. وتشمل المعادن الرئيسية في هذه المجموعة:

- الجارنت الألوميني الأمنديني.
- الجارنت الكلسي الأندرادايتي.
- والجارنت أوفاروفايتي. يستخدم الجارنت للأغراض الصناعية مثل أغلفة الكشط لورق الصنفرة، وفي تجهيز المطاط والبلاستيك والزجاج، وكذلك يستخدم لأغراض الكشط بالرمل المضخوخ هوائياً وفي تنقية وترشيح الماء وللسطوح غير الانزلاقية.
- ويستخدم بعض أنواع الجارنت كأحجار شبه كريمة في تجارة المجوهرات.

يوجد الجارنت في عدة مواقع، ولكن جودته كانت منخفضة جدًا حيث إنه يفتقد إلى النقاوة والشفافية، وهذا يعني عدم إمكانية استخدامه كحجر شبه كريم. أهم المواقع التي يوجد فيها هي جبل الحماط ووادي الخيام بمربع الساخن، حيث وجد فيها حبيبات من اليوفاروفيت جارنت ذات اللون الأخضر الزمردي، ولكن بأحجام لا تتجاوز الملمتر، وحرة الجعلاني وجبال الشمط ووادي مضللة جنوب الطائف حيث عثر على بلورات جارنت حمراء نصف شفافة كاملة الأوجه من نوع المندين.

بلـــورات جارنت طبيعية

## الزفـــــير Sapphire والزركـــــون Zircon

يُعد الزفير من الأحجار الكريمة النادرة، وهو أحد أنواع معادن الكورندوم $Al_2O_3$، ويوجد في الطبيعة بجميع الألوان، الأحمر منها ويطلق عليه ياقوت Ruby، أما الألوان الأخرى فتسمى زفير. يتكون الزركون من سيليكات الزركونيوم $(ZrSiO_4)$ المطعم بشوائب مختلفة وبلورة الزركون رباعية الشكل. واللون الطبيعي للزركون يتدرج من عديم اللون إلى الأصفر الذهبي والأحمر والبنى والأخضر. يُعد الزركون من أشهر الأحجار الكريمة حيث يوجد في جميع صخور القشرة الأرضية؛ من صخور نارية ورسوبية ومتحولة.

في عام 2005م، أطلقت هيئة المساحة الجيولوجية السعودية مشروعًا لاستكشاف الأحجار الكريمة في حرة عويرض وتحديدًا الزفير والزركون. تقع حرة عويرض في الجزء الشمالي من المملكة حيث إنها تمثل الحافة الغربية لمحافظة العلا، وتبعد مسافة 400 كم شمال غرب المدينة المنورة.

حبيبات زفير زرقاء

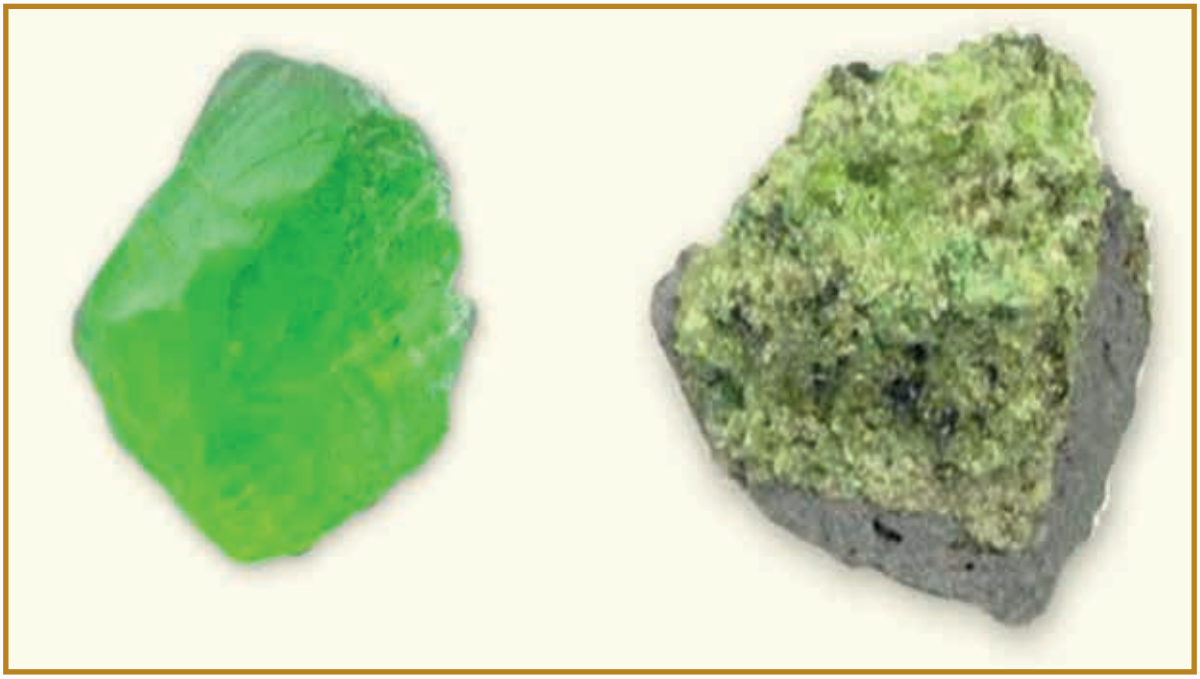
بعض حبيبات الزركون

بعض حبيبات الزفير والزركون التي تم اكتشافها في حرة عويرض

## الزبرجـــــد Peridot

يعرف الزبرجد بأنّه أحد الأحجار الكريمة الشفافة، وهو من أنواع معدن الأوليفين، وتركيبته الكيميائية تتكوّن من سيلكات الحديد والمغنيسيوم المزدوجة، ويحتوي على الحديد الأمر الذي يضفي عليه اللون الأخضر، كما أنّ تركيبه المعدني قريب من تركيب حجر الزمرد.

عثر على الزبرجد في مناطق الحرات البازلتية الحديثة التابعة للعصر الثلاثي والرباعي مرافقة للمخاريط البازلتية الفتاتية البركانية ولكن بأحجام صغيرة لا تزيد عن 3 ملم، وهناك مواقع مهمة في حرة كشب (تقع على بعد 200 كم شمال شرق الطائف) عثر فيها على أحجار الزبرجد بكميات اقتصادية وبأحجام كبيرة قد تصل 10 غرام للبلورة الواحدة وبجودة عالية وألوان جذابة.

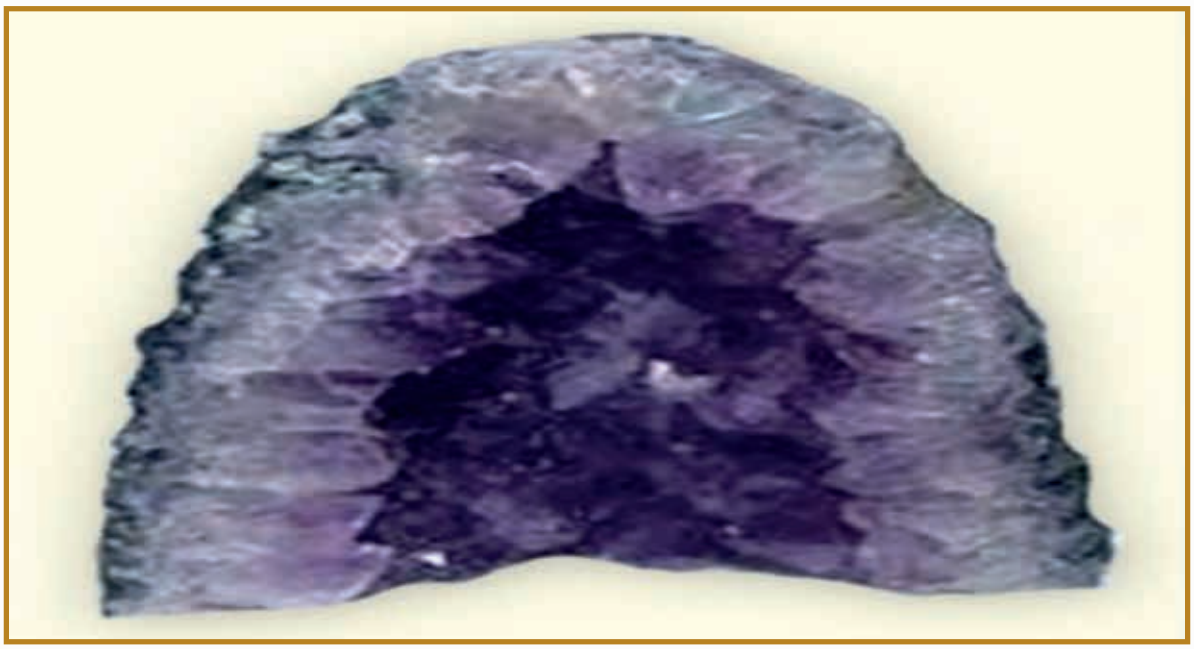


**(على اليمين) بلورات زبرجد عندما تكون في الخام الحامل لها، وبعد فصلها (على اليسار).**
**(هيئة المساحة الجيولوجية السعودية، 2014)**

## الكوارتـــــز Quartz

عبارة عن ثاني أكسيد السليكون $SiO_2$ وهو من الأحجار شبه الكريمة الشائعة في الطبيعة. تعتبر أحجار الكوارتز الشفافة من أكثر الأحجار الشبه كريمة انتشارًا في المملكة، وغالبًا ما تكون مصاحبة لصخور الجرانيت والبقماتيت وصخور الحجر الرملي، وقد تتواجد مفككة أو مجتمعة في مناطق الكثبان الرملية بحفر الباطن والقيصومة والزلفي والخرج والعلا. وقد عثر في بعض المناطق، مثل جبل الزبير بوادي الصفرا بمنطقة بدر التابعة لمحافظة المدينة المنورة، على حجر الجمشيت ولكن بدرجة لون بنفسجي فاتح. وهناك بعض المواقع التي تتواجد بها نارجيلات من الكوارتز التي يمكن استخدامها في شمال المملكة بمنطقة طبرجل بالجوف.

معدن حجر كوارتز شفاف



بلورات جمشيت بنفسجية اللون.

## الأمـــازونيت Amazonite

تتطلق كلمة أمازونيت على حجر الميكروكلين (Microcline) ذي اللون الأخضر المزرق. عُثر على حجر الأمازونيت (الميكروكلين ذي اللون الأخضر التفاحي) بوادي النعمان (وادي الخرار)، على بعد 11 كم جنوب شرق طريق مكة الطائف. ولكن هذا الموقع غير مجدٍ من الناحية الاقتصادية نظرًا لصغر حجم البلورات فيه، وندرة الجيد منها.

بلورات الأمازونيت الخضراء

## حجـــــر القمـــــر Moonstone

**حجر القمر** هو حجر شبه كريم، وهو أحد أنواع الفلسبار، وتركيبه الكيميائي يتكون من سيليكات الألومنيوم وعنصر البوتاسيوم، وهو ذو لمعان لؤلؤي، يعزى إلى تداخل الضوء المنعكس على شوائب دقيقة من معدن الألبيت بداخله.

عثر على حجر القمر في مواقع الحرات الحديثة التابعة للعصر الرباعي وخاصة حرة المدينة وحرة رهط وحرة اثين، حيث توجد أحجار القمر على هيئة مكتنفات ضمن صخور البازلت، أو على هيئة بلورات مفككة وملقاة في مجاري الأودية، وهي تمتاز بالصفاء والشفافية، وتتراوح أحجامها من 0.5 – 50 مم.

بلورات حجر القمر

## البيريـــــل Beryl

معدن البيريل من السليكات الحلقية ويتركب كيميائياً من أكسيد البيريليوم بنسبة (14,1 %) وأكسيد الألومنيوم بنسبة 19 %، وثاني أكسيد السليكون بنسبة 66,9 %. وقد يحتوي أحياناً على بعض الأكاسيد القلوية مثل: أكسيد الصوديوم وأكسيد البوتاسيوم وأكسيد الليثيوم .

عثر على أحجار البيريل في خمس مناطق في المملكة وهي بئر كراث وبصايرت بيشة وجبل الحصاة (الهوشاه) وجبل دومه وجبل تربان. لكن للأسف كلها لا تصلح لاستثمارها من الناحية الاقتصادية لاستخدامها في صناعة الحلي والمجوهرات.

بلورات حجر البيريل

# الاستثمار الاستراتيجي في قطاع التعدين

بين عامي 2011م و 2020م تم استثمار مبلغ 22.5 مليار دولار في قطاع التعدين، والذي شمل الاستثمار في تطوير المناجم الجديدة، وتوسيع المشاريع القائمة، وتحديث بُنى وتقنيات التعدين بالأشعة تحت الحمراء. تقوم المملكة بتوجيه استثمارات كبيرة إلى قطاع التعدين لديها، بهدف الوصول إلى 2.5 تريليون دولار، مما يعزز دور القطاع باعتباره حجر الزاوية **للرؤية** 2030.

## ♦ نمـــو المشـــاريع والإيـــرادات

وقد شهد القطاع ضخ 1,013 مليار دولار للمسوحات الجيولوجية، التي تهدف إلى رسم خرائط الموارد المعدنية الوفيرة في المملكة. واللافت أن إيرادات قطاع التعدين في عام 2023م ارتفعت إلى 480 مليون دولار، أي بزيادة 33 % ما كانت عليه في عام 2022م، حيث تجاوزت إيرادات قطاع التعدين 1.35 مليار ريال سعودي.

## ♦ أهـــداف إنتـــاج الذهـــب

يبلغ إنتاج المملكة الحالي من الذهب 430,000 أوقية، مع هدف طموح لمضاعفة هذا الرقم إلى مليون أوقية بحلول عام 2030م.

## ♦ المســاهمات الاقتصاديــة الكليــة

اعتمد الصندوق الصناعي 25 قرضًا لهذا القطاع بقيمة 1,358 مليون ريال بنسبة 26 % من إجمالي عدد القروض المعتمدة خلال العام المالي 2010م و21 % من قيمة هذه القروض. وبذلك جاء القطاع في المرتبة الثانية من حيث عدد وقيمة القروض المعتمدة خلال العام. وقد مولت هذه القروض بناء 17 مشروعًا صناعيًا جديدًا وتوسعة 8 مصانع قائمة.

ومن بين القروض الجديدة الملتزم بها لقطاع التعدين خلال عام 2010م، تقديم قرض بمبلغ 330 مليون ريال للمساعدة في بناء مصنع في جازان لإنتاج مكثفات النحاس والزنك وسبائك الذهب والفضة. تضمنت قروض التوسعة قرضًا بقيمة 91 مليون ريال سعودي لتوسعة مصنع في الدمام لإنتاج الأنابيب الفولاذية الملحومة، وقرضين بمبلغ 39 مليون ريال سعودي لتوسعة مصنع في الدمام لإنتاج الأنابيب المنحنية والأنابيب الفولاذية الملحومة بالمقاومة الكهربائية. وبحلول عام 2030م، من المتوقع أن يساهم قطاع التعدين بمبلغ قدره 80 مليار دولار في الناتج المحلي الإجمالي، وهي قفزة كبيرة من 12 مليار دولار في عام 2022م. وقد تم تحديد أكثر من 5300 موقع للثروة المعدنية، منها 1700 موقع مرخص بالفعل، مما يسلط الضوء على الإمكانات التوسعية للقطاع.

## ♦ خلق فرص العمل والاحتياطيات المعدنية المتنوعة

يعد هذا القطاع مصدرًا رئيسيًا لفرص العمل، حيث يوفر أكثر من 200.000 فرصة عمل مباشرة وغير مباشرة، وفقًا لما ذكرته الغرف التجارية السعودية.

## ♦ جذب الاستثمارات العالمية

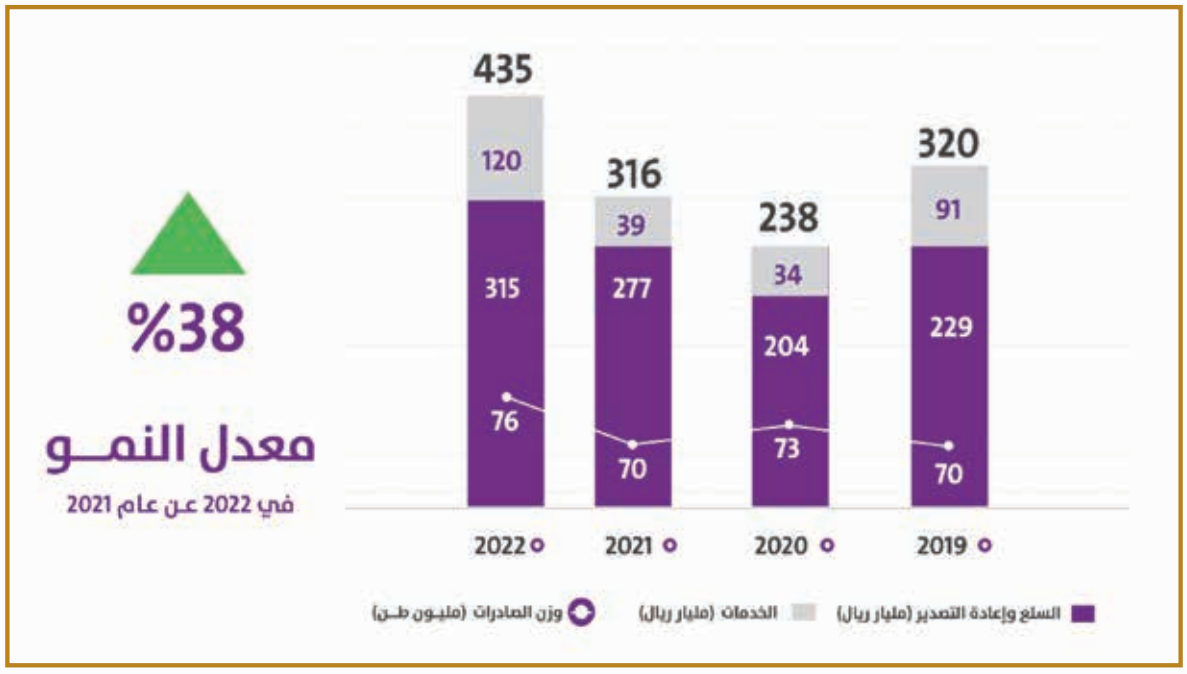
وتعمل المملكة بنشاط على تقديم الحوافز والتسهيلات لجذب الاستثمارات الأجنبية، مما يشير إلى بيئة ترحيبية لأصحاب المصلحة الدوليين.

## ♦ قطاع جاهز للمستقبل

ومع هذه التطورات، يستعد قطاع التعدين في المملكة لتحقيق نمو كبير، مما يعد بمستقبل مشرق كجزء من إطار الرؤية السعودية 2030م الأوسع. يعد قطاع التعدين السعودي بمثابة شهادة على التزام المملكة بالتنويع الاقتصادي والنمو المستدام، مما يضع معيارًا عالميًا في صناعة التعدين (Alshabanah, 2024).

## مساهمة قطاع المعادن غير النفطية في الاقتصاد السعودي

على الرغم من تاريخ المملكة التعديني الطويل نسبيًا وإمكاناتها الكبيرة من الموارد المعدنية غير النفطية، إلا أن التعدين لم يشكل سوى نحو 0.3 % من الناتج المحلي الإجمالي للمملكة بين عامي 1970م و 1995م. ولم يشكل القطاع أكثر من 0.4 % في العقدين الماضيين بسبب النقص في الموارد المعدنية من رأس المال المتاح للاستثمار في التعدين. فقد تراوحت حصة إجمالي استثمارات رأس المال الثابت المخصصة للتعدين في المملكة خلال الفترة 1970–1995م بين 1.2 % و13.7 %، وبلغ متوسط الفترة نحو 4.4 %.




أرقام قياسية في إجمالي الصادرات غير النفطية في المملكة.
(هيئة المساحة الجيولوجية السعودية، 2023)

وبسبب الانخفاض التدريجي في معدل الاستثمار الثابت في التعدين خلال السنوات الـ 13 الماضية، فقد تخلف متوسط معدل النمو السنوي للتعدين عن

معدلات التصنيع والزراعة، والاقتصاد ككل. وكان المتوسط في الفترة 1983-1995م هو 2.8 % للتعدين، و38 % للصناعة التحويلية، و8.4 % للزراعة. بين عامي 1984م و1995م، تراوحت حصة السلع المعدنية غير النفطية من إجمالي الواردات بين 14.9 % و20.6 %، بمتوسط 17.1 %. وخلال الفترة نفسها، أدى الارتفاع النسبي في قيمة المعادن غير النفطية المستوردة إلى المملكة إلى تدفق مدفوعات بالعملة الصعبة إلى الخارج بأكثر من 212 مليار ريال سعودي. والسلع المعدنية الرئيسية غير النفطية المستوردة بكميات كبيرة هي الذهب وخام الحديد وصخور الفوسفات والسيراميك والزجاج. وكانت قيمة المعادن غير النفطية في صادرات المملكة أقل بكثير من قيمة المنتجات الصناعية. كانت حصة منتجات التعدين في إجمالي صادرات المملكة منخفضة نسبيًا، وتضاءلت بين 0.3 % و9.9 % في عامي 1984م و1995م، على التوالي. صادرات المملكة من السلع المعدنية الرئيسة هي؛ منتجات السيراميك والأواني الزجاجية والمصنوعات الحجرية والجص والأحجار الكريمة والأسمنت. ويمكن أن تعزى هذه المساهمة المنخفضة في التوظيف بشكل رئيس إلى ما يسمى بتأثير «المرض الهولندي» Dutch disease Effect. ومثل هذا التأثير من شأنه أن ينقل العمال، بسبب الأجور المرتفعة، من القطاع القابل للتداول إلى القطاع المزدهر داخل الاقتصاد. قد يكون السبب الآخر هو أن صناعة التعدين أصبحت تتقدم تدريجيًا لتحل محل المزيد من العمال بآلات جديدة. حددت حكومة المملكة التعدين عنصرًا أساسيًا في برنامجها لتنويع الاقتصاد بعيدًا عن اعتمادها الحالي على النفط. وتشمل أهداف الحكومة المتوسطة وطويلة المدى لهذا القطاع التواصل مع المستثمرين من القطاع الخاص والأجانب لإنشاء صناعات لاستخراج ومعالجة المعادن، وتزويد قطاع التصنيع السعودي بمتطلباته من المواد الخام، فضلًا عن جعل المملكة مصدرا رائدا للمعادن. وفي دولة شاسعة مثل المملكة، لم تركز الدولة على العثور على التوضعات المعدنية فحسب، ولكن أيضًا على جعلها متاحة للاستغلال.

# استراتيجية شركة «معادن» حتى عام 2040م

لقد كان إنشاء شركة معادن المؤشر الملموس الرئيس للنية من قبل حكومة المملكة لتحقيق توسع كبير في نشاط التعدين. ومن المتوقع أن تقود «معادن» أنشطة الاستكشاف والتعدين، وقد حصلت بالفعل على العديد من التراخيص لاستخراج المعادن النفيسة والصناعية. علاوة على ذلك، من المتوقع أن تصبح شركة معادن حافزًا لاستثمارات القطاع الخاص. وهي تحقق ذلك حاليًا من خلال الاستثمار المباشر في تطوير قطاع التعدين، وكذلك من خلال المشاريع المشتركة مع مستثمرين من القطاع الخاص. كما ستشجع شركة معادن أيضًا إجراء تغييرات في تشريعات التعدين، والمزيد من الشفافية وتبسيط الأنظمة لتحفيز الاستثمار الخاص. كما أن «معادن» تدرك أهمية وجود قوانين وأنظمة شفافة، والحاجة إلى استقطاب الخبرات العالمية في مجال التعدين.

تعتمد استراتيجية «معادن» حتى عام 2040م على أربع ركائز بما في ذلك الاستفادة من موارد المملكة، والتركيز على القيمة، وزيادة الإنتاجية من خلال الإشراف القوي على الحوكمة البيئية والاجتماعية والمؤسسية (ESG) والتمكين الأساسي للاستكشاف. تشتمل محفظة «معادن» لتسريع الأعمال المربحة على العديد من المبادرات الإستراتيجية في إطار الركائز الإستراتيجية الأربع بما في ذلك، على سبيل المثال لا الحصر؛ مبادرات الأسمدة المتنوعة لتصبح من بين أكبر 3 منتجين في سوق الأسمدة العالمية، ونمو الطاقة الإنتاجية الأولية للألمنيوم لتصبح من بين أفضل 10 منتجين، محفظة الذهب العالمية والمتنوعة بالإضافة إلى المعادن الأساسية بما في ذلك النحاس والزنك والمعادن الصناعية الأخرى.

لكن «معادن» تدرك أن هذا النمو السريع يجب أن يكون متوازنًا مع أهداف الأعمال البيئية والاجتماعية والحوكمة. ولهذا السبب تبنت شركة معادن ودمجت بالكامل استراتيجية فاعلة للمعايير البيئية والاجتماعية والحوكمة لتعزيز المحاولات العالمية لإحداث تغيير إيجابي ودائم في صناعة التعدين. هدف «معادن» هو أن تكون رائدة عالميًا في إظهار كيف يمكن لصناعة التعدين أن تعمل بطريقة تساهم بشكل إيجابي في أجندة الاستدامة العالمية، (Ma'aden, 2022).

## الفوسفات

يعد الفوسفات من أكثر منتجات «معادن» أهمية للحياة. فهو يتشكل طبيعيًا من عنصر الفوسفور، الذي يعد أحد ثلاثة عناصر غذائية رئيسة في عملية التركيب الضوئي للنبات ونمو المحاصيل الزراعية. وتنتج شركة معادن الفوسفات ثنائي الأمونيوم (DAP) والفوسفات أحادي الأمونيوم (MAP) أكثرها استخدامًا في الزراعة الحديثة.

تخطط الشركة لإدخال مركبات فوسفات جديدة لتصبح واحدة من أكبر الشركات الموردة للأسمدة الفوسفاتية في العالم. فمع استمرار تزايد عدد سكان العالم، يزداد الطلب على الأغذية الغنية بالبروتين، وتنخفض حصة الفرد من الأراضي الصالحة للزراعة؛ فتلعب الأسمدة - بما في ذلك أسمدة فوسفات الأمونيا - دورًا مهمًا في زيادة إنتاج المحاصيل، والمساهمة في توفير مستمر للإمدادات الغذائية في جميع أنحاء العالم. يزداد الطلب العالمي على الفسفور بنحو 1.5 مليون طن في السنة. بفضل مخزون الفوسفات الطبيعي في شمال المملكة، وإمكانية الوصول إلى ومعالجة الكبريت والغاز الطبيعي، والقرب من الأسواق الواعدة في جنوب آسيا وشرق إفريقيا، فإنه بوسع الشركة تلبية الطلب العالمي من هذه المواد (Ma'aden, 2022).

## • المعـــادن الأساسية والمعـــادن الجديـــدة

يتمتع الذهب بمكانة خاصة في مزيج أعمال شركة «معادن». فهو أكثر خطوط إنتاجها شهرة، حيث كانت الشركة تحصل على كل دخلها تقريبا من إنتاج الذهب، وقد شكل الأساس لنمو أعمال وتنوع محفظة منتجات الشركة. تتولى وحدة أعمال المعادن الأساسية والمعادن الجديدة الاستراتيجية إنتاج وإدارة أعمال الذهب والنحاس والفضة والزنك. ويشكل الذهب أكبر نسبة من أعمالها. وقد أنتجت الشركة في عام 2022م ما يقرب من 335,207 أوقية ذهب من سبعة مناجم في المملكة. قامت شركة معادن بالعمل في مناجم جديدة من خلال تطوير خط أنابيب بطول 413 كم لجلب مياه الصرف المعالجة من بلدية الطائف إلى موقع مناجم الذهب. ويمثل هذا الحل المستدام بيئيًا أول مثال على توظيف مياه الصرف المعالجة للأغراض الصناعية في المملكة. تدير شركة معادن للذهب ومعادن الأساس سبع مناجم للذهب بالإضافة إلى منجم نحاس وهو مشروع مشترك مناصفة بين معادن وباريك الشرق الأوسط:

- **منجم الدويحي:** يقع منجم الدويحي في محافظة الخرمة التابعة لمنطقة مكة المكرمة. وهو منجم مكشوف يضم مصنع معالجة بطريقة الترشيح بالكربون. بدأ الإنتاج فيه منذ عام 2016م وبلغ حجم الإنتاج فيه 174,799.86 أوقية في عام 2022م.

- **منجم الأمار:** يقع منجم الأمار جنوب غرب محافظة القويعية، شرق الدرع العربي، وهو أحد مناجم «معادن» تحت سطح الأرض. بدأ الإنتاج فيه عام 2009م، ويستعمل تقنية معالجة الترشيح بالكربون. ينتج منجم الأمار خامًا عالي الجودة من الذهب مصحوبًا بمعادن الأساس، وفيه تتم معالجة سبائك الذهب وتركيزات النحاس وكبريتيد الزنك، لتصديرها للأسواق العالمية. وقد بلغ إنتاج المنجم ما يقارب 27,443.42 أوقية ذهب في عام 2022م.

- **منجم بلغة والصخيبرات:** بينما يقع منجم الصخيبرات للذهب في محافظة عقلة الصقور بمنطقة القصيم، فإن منجم بلغة يقع على بعد 70 كيلو من منجم الصخيبرات في محافظة الحناكية التابعة إداريا لمنطقة المدينة المنورة. يتبع المنجمان طريقة تعدين المناجم المكشوفة. يحوي منجم الصخيبرات على مصنع معالجة للخام عن طريق الترشيح بالكربون. تتم معالجة الخام ذي التركيز العالي في موقع الصخيبرات، حيث يتم إنتاج الذهب وبيعه سبائك، في حين يتم نقل الخام منخفض التركيز بواسطة الشاحنات إلى موقع بلغة للمعالجة بطريقة أكوام الترشيح. بلغ إنتاج منجمي بلغة والصخيبرات 74,372.25 أونصة من الذهب في عام 2022م.

- **منجم السوق:** هو منجم ذهب مكشوف، بدأ الإنتاج فيه عام 2014م. يتم فيه استخراج الخام منخفض التركيز ومعالجته باستخدام تقنية أكوام الترشيح. وقد بلغ إنتاج المنجم 17,042.39 أوقية ذهب في العام 2022م.

- **منجم مهد الذهب:** يقع هذا المنجم على بعد 167 كيلو مترا جنوب المدينة المنورة، وهو أحد مناجم «معادن» التي تتبع التعدين تحت سطح الأرض. تم استغلال الخام في مهد الذهب، في عهد الملك عبد العزيز، بواسطة نقابة التعدين السعودية بين عامي 1939م و1954م. ثم أعيد افتتاحه في عهد الملك فهد عام 1983م، وما يزال ينتج حتى الآن. يحوي المنجم على أكثر من 60 كم من الأنفاق، ويتم إجراء عمليات التنقيب على عمق عمودي يتجاوز 400 متر. يحوي موقع المهد على مصنع لمعالجة الخام بتقنية الترشيح بالكربون. وينتج المنجم الخام على شكل سبائك ذهب ومركزات النحاس والفضة، وقد بلغ إنتاجه 29,566.34 أوقية ذهب في عام 2022م.

- **منجم منصورة ومسرة:** يقع منجم منصورة ومسرة في محافظة الخرمة التابعة لمنطقة مكة المكرمة، وهو أحدث مناجم الذهب وأكبرها في المملكة، وأكثرها تطورًا تقنيًّا. يشتمل الموقع على منجمين منفصلين يتبعان نظام التعدين المكشوف. يحوي هذا المنجم على تقنيات حديثة للتعدين والمعالجة والاستدامة البيئية، ويضم الموقع مصنعًا يقوم على تقنية معالجة الترشيح بالكربون، وتقنية التعقيم بالترشيح لإنتاج خام الذهب. بدأت عمليات الإنتاج الأولي في سبتمبر 2022م، حيث حقق المنجم نتائج قياسية بإنتاج 11,982.84 أوقية ذهب.

## شـــركة معـــادن باريـــك للنحـــاس

شركة معادن باريك للنحاس هو مشروع مشترك مناصفة بين معادن وباريك الشرق الأوسط لتشغيل جبل صايد هو منجم نحاس كبير تحت الأرض وقد تم تشغيل المنجم في منتصف عام 2016م. ينتج المصنع مركّز النحاس الذي يصدّر للأسواق العالمية لإنتاج النحاس. في عام 2022م، تمت معالجة ما مجموعه 2.732 مليون طن بدرجة 2.67 % وبمعدل استخلاص 93.8 % مما أدى إلى إنتاج 150.7 مليون رطل من النحاس (Ma'aden, 2024).

## شـــركة المعـــادن الصناعيـــة IMC

تُعد شركة المعادن الصناعية مؤشرًا على التوجه نحو المستقبل؛ إذ إن حداثة ونوعية وتعدد استخدامات هذه المصادر تتطلب جهودًا كبرى لمواكبة تطور الصناعات والتقنيات الناشئة، وتسعى «معادن» ضمن استراتيجية توسيع محفظة أعمالها على استكشاف وتقييم الموارد المعدنية الجديدة، التي تتحول إلى أعمال جديدة ومستقلة، وذلك الى جانب مجالات عملها الرئيسة. وتلعب

المعادن الصناعية دورًا مهمًا في حياتنا؛ فالمعادن الصناعية تستخدم كخام، أو كمواد مضافة في كثير من الصناعات والتطبيقات مثل مواد البناء والسيراميك، والطلاء والبلاستيك، بالإضافة إلى في التطبيقات الزراعية والبيئية والإنشائية والصناعية وهي مكونات قد لا تكون مرئية، لكنها موجودة في كل أنواع المنتجات؛ وخصائص هذه المواد الفيزيائية أو الكيميائية يصعب الاستغناء عنها. تركز شركة المعادن الصناعية (IMC) التابعة لشركة معادن حاليًا على استخراج ثلاثة من المعادن الصناعية هي: البوكسايت منخفض التركيز (LGB)، والكاولين، والمغنيزيا الكاوية المتكلسة (CCM) وتصدر هذه المنتجات من هذه المعادن إلى الشركات التابعة لشركة معادن، وإلى شركات عالمية. وقد نما قطاع المعادن الصناعية الحديث نسبيًا بشكل مطرد وثابت منذ بداية إنتاج البوكسايت منخفض التركيز عام 2008م، وجاء إنتاج الكاولين والمغنيزيا الكاوية المتكلسة عام 2011م، ليسجل نموًا سنويًا متناميًا منذ ذلك الحين، مع وجود علامات قوية للنمو في كافة المنتجات.

## ♦ الكاولين والبوكسايت منخفض التركيز

يقع منجم الزبيرة للبوكسيت منخفض التركيز والكاولين في منطقة حائل على بعد 65 كم إلى الشمال من البعيثة و 80 كم شمال بلدة تربة. ويتألف الموقع من منجم مفتوح بالإضافة إلى مرافق معالجة. وقد بدأت العمليات في المنجم عام 2008م.

## ♦ المغنيزايت

يهدف مشروع المغنيزايت لاستثمار هذا الخام في محافظة الغزالة بمنطقة حائل، لإنتاج مادتي المغنيزيا الكاوية والمغنيزيا الخامدة وبعض الانواع الاخرى من الحراريات السائبة ذات الخصائص الفيزيائية والكيميائية عالية الجودة، في مصنع المعالجة الموجود في المدينة الصناعية بالمدينة المنورة.

وتدخل المغنيزيا، وهي أحد أكثر العناصر وفرةً في العالم، في صلب عمليات شركة معادن؛ إذ يتم في منجم الغزالة للمغنيزايت، تكسير الخام وفرزه، ثم نقل درجات مختلفة من الخام إلى مصنع المعالجة في المدينة الصناعية بالمدينة المنورة، حيث يتم تحويله في فرن ذي مواقد متعددة إلى المغنيزيا الكاوية المتكلسة.

ويتميز خام المغنيزايت الموجود في محافظة الغزالة بارتفاع درجة نقاوته واحتوائه على نسبة ضئيلة جدًا من الشوائب، وقد بدات معادن الإنتاج الأولي من المصنع في الرابع من شهر إبريل 2011 (Ma'aden, 2024).

### ♦ الألمنيـــــوم

يعتبر الألومنيوم أحد أكثر المعادن تعددًا للاستعمال في العالم، ويعتبر دليلًا على تطور أعمال شركة معادن. وكما يتشكل الألومنيوم ويتحول إلى مجموعة واسعة من المنتجات، وقد ساهم هذا المورد في تحويل معادن إلى شركة ذات مستوى عالمي. يُعد الألومنيوم ثالث أكثر العناصر وفرة بعد الأكسجين والسيليكون في قشرة كوكبنا. وهو أيضًا أكثر الفلزات غير الحديدية استخدامًا، حيث إن إنتاجه يتجاوز إنتاج جميع المعادن عدا الحديد. وتجعله خصائصه المميزة- انخفاض الوزن، والمتانة العالية، والموصلية الكهربائية، ومقاومة التآكل، والقدرة على التكيف- عنصرًا رئيسًا في الصناعة والتجارة في جميع أنحاء العالم. كما أنه يدخل في تصنيع الأدوات المستخدمة يوميا، بدءًا من علب الصودا والمقالي (جمع مقلاة) إلى خطوط الطاقة والطائرات.

يعود السبب وراء توجه شركة «معادن» إلى الألومنيوم لأهميته العظيمة. وقد نتج عن هذه الرؤية تطوير صناعة محلية مستدامة جديدة، ونقل المعرفة الفنية المرتبطة بها، وإبراز المملكة بصفة مشارك أساسي في صناعة عالمية ذات آفاق واعدة للنمو والتطور في مستقبل. أنشأت شركة «معادن» مشروعًا مشتركًا مع شركة ألكوا في عام 2009م، ثالث أكبر منتج للألمنيوم في العالم، لبناء أكثر مشاريع الألومنيوم تكاملًا على مستوى العالم في المملكة، ويتضمن هذا المشروع

الذي تبلغ تكلفته 10.8 مليار دولار أمريكي منجم البوكسيت ومصفاة ومصهر ومصانع للدرفلة، ويتم بيع منتجات هذه المصانع الى الأسواق المحلية والعالمية، وهي من أجود أنواع الألومنيوم، وهو ما يشجع على تطوير صناعات إضافية تعتمد على الألومنيوم في المملكة.

### ♦ تكامل الإنتاج

يتضمن مشروع «معادن» للألمنيوم تطوير وتصميم وبناء وتشغيل موقعين مدمجين في شبكة منجم واحد للمعادن؛ البعيثة في محافظة القصيم الشمالية، ومجمع الألومنيوم المتكامل في مدينة رأس الخير الصناعية. يتم استخراج المواد الخام من مخزون البوكسيت في منطقة البعيثة، والتي تشمل المنجم بالإضافة إلى منشآت التكسير ومنشآت المعالجة، ويقدر إنتاج المنجم بـ 4 ملايين طن سنويًا من البوكسيت الجاف، والذي يتم نقله عبر خط السكك الحديدية الجديد بين الشمال والجنوب إلى رأس الخير. تستضيف رأس الخير المصفاة والمصهر ومصنع الدرفلة، وتمتلك شركة «معادن» أول مصفاة لمادة الألومينا في منطقة الشرق الأوسط، بقدرة استيعابية تنتج 1.8 مليون طن سنويا من الألومينا التي يتم معالجتها في المصهر، وينتج المصهر 740,000 طن سنويًا من الألومنيوم. ويساهم مصنع الدرفلة، بطاقة انتاجية تصل إلى 460,000 طن متري، لإنتاج لفافات صفائح الألومنيوم التي تستخدم لاحقا في الصناعات التحويلية لمواد التعليب وأغطية علب المشروبات، وفي صناعة هياكل السيارات وأجزائها.

### ♦ المواد الكيميائية

الصودا الكاوية هي مادة أساسية وضرورية لتكرير البوكسيت إلى الألومينا، تنتج شركة معادن للألمنيوم الصودا الكاوية من مشروعها المشترك مع شركة الصحراء للبتروكيماويات، إذ ينتج المصنع، الواقع في مدينة الجبيل الصناعية، مادة ثنائي كلوريد الإيثيلين (EDC)، على هيئة منتج ثانوي من معالجة الصودا الكاوية. يتم إنتاج 250,000 طن سنويًا من الصودا الكاوية المركزة، و300,000 طن سنويًا من ثاني كلوريد الإيثيلين (EDC)، (Ma'aden, 2024).

# مشاريع هيئة المساحة الجيولوجية في مجال التعدين

حيث إن رسالة الهيئة هي الاستفادة من الخبرات المحلية وشراكاتها والتقنيات الحديثة لتحقيق قيمة مميّزة بوصفها مرجعية في علوم الأرض للقطاعين العام والخاص في المملكة من خلال توفير خرائط وبيانات جيولوجية برؤى موضوعية علمية .

أنواع مشاريع التنقيب عن المعادن في هيئة المساحة الجيولوجية السعودية.

وتحقيقا للرؤى والتطلعات الاستراتيجية التي أُنشئت الهيئة من أجلها، فقد بلورت الهيئة أهدافها الرئيسة في مجال التعدين من خلال تأمين احتياطيات إستراتيجية مستدامة من الموارد المعدنية، ويتحقق هذا الهدف بالاستكشاف المستمر عن الموارد المعدنية بشقيها الفلزي واللافلزي، والاستغلال الأمثل لهما لتنويع مصادر الدخل القومي.

**تستند سياسة المسؤولية المجتمعية في الهيئة على أربع ركائز أساسية منسجمة مع رؤية المملكة 2030.**

حتى تحقق الهيئة أهدافها في مجال التعدين فإنها تقوم بتنفيذ عدد من المبادرات والمشروعات الداعمة منها:

- **مركز للتميز في قطاع التعدين والصناعات**
- **مركز المسح الجيولوجي والتنقيب عن المعادن**

إضافة إلى قيامها بإعداد خريطة نشأة الرواسب المعدنية (الميتالوجينية) لجميع الثروات المعدنية في المملكة العربية السعودية التي تحوي على معلومات فنية قيمة عن كل موقع مكتشف. وإعداد مشاريع الدراسات التعدينية وتقوم

على إعداد الدراسات الاقتصادية المتعلقة بالأنشطة التعدينية، ومعالجة البيانات وتحليلها، وتنمية الموارد التعدينية وتجهيزها كفرص استثمارية، ودراسة ومراقبة الأخطار البيئية المتعلقة بالأنشطة التعدينية. ومشاريع توثيق المواقع المتمعدنة.

## من المشاريع التي تنفذها الهيئة

- **المعادن الاستراتيجية في الدرع العربي**

يهدف المشروع إلى استكشاف المواقع الخاصة بالمعادن الإستراتيجية مثل؛ النحاس والحديد والليثيوم والتنغستن.

- **مشروع دراسة رمال السيليكا لإنتاج السيليكون المعدني**

يهدف المشروع إلى إنتاج السيليكون المعدني من الرمال السيليكاتية.

- **تقييم التطبيقات الصناعية المحتملة لرواسب البيروفلايت في جبل المجرد بينبع**

يهدف المشروع إلى استخدام خام البيروفلايت بديلًا لخام الكاولين المستورد في صناعة السيراميك، والفيبرجلاس، والأسمنت الأبيض، ومادة حشو في صناعة المطاط والورق والبلاستيك وغيرها من الصناعات.

- **الكتاب الإحصائي السنوي للمعادن**

يهدف المشروع إلى توجيه برامج الاستكشاف للخامات ذات الاستيراد العالي وإحلالها بالخامات الموجودة (محليًا) مما يحقق أحد اهداف رؤية المملكة 2030.

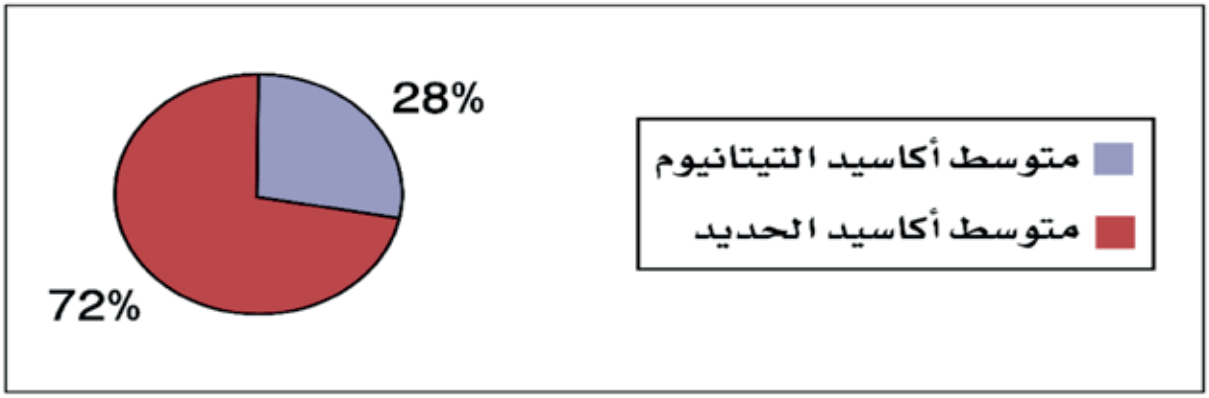
- **نشأة الرواسب المعدنية (الخريطة الميتالوجينية)**

يهدف المشروع إلى استنباط العلاقة ما بين الرواسب المعدنية المكتشفة في المملكة وبين التراكيب الليثولوجية والطبقية والبنائية عن طريق تجميع ومضاهاة وتفسير المعلومات الفنية المتعلقة بهذه الرواسب المعدنية، وذلك لغرض التحقق من أصول نشأتها وتكونها، وبناء قاعدة المعلومات الميتالوجينية لها، والمضي قدما في إجراء دراسات مستفيضة ومتخصصة لإيجاد نماذج للرواسب المعدنية

المكتشفة التي يمكن من خلالها فتح آفاق استثمارية واسعة لاكتشاف تواجدات معدنية مماثلة وجديدة وتحديد أكثر المناطق المناطق احتمالاً لاحتوائها على رواسب معدنية مماثلة.

### ♦ الاستكشاف العام لليثيوم والتياتانيوم في المملكة

أهداف المشروع هي تحديد البيئات واكتشاف احتمالية وجود مصادر لعنصري الليثيوم والتيتانيوم في المملكة.




النسب المئوية لأكاسيد التيتانيوم والحديد لمختلف السحنات الشاطئية لمنطقة الدراسة

النسب المئوية لأكاسيد التيتانيوم والحديد في الكثبان الرملية لمنطقة الدراسة

**نسب معدني التيتانيوم والحديد في منطقة القحمة على ساحل البحر الأحمر**
**(التقرير السنوي لهيئة المساحة الجيولوجية السعودية، 2007)**

### ♦ الاستكشاف العام للأحجار الكريمة في حرات المملكة (إقليم عسير)

يهدف المشروع إلى اكتشاف مواقع جديدة للأحجار الكريمة ذات الجودة العالية. وقد تم اكتشاف بعض الأحجار الكريمة في حرات إقليم عسير، مثل (العقيق، والتورمالين الأسود، وجارنت الألمندين، والإبيدوت، والبريناىت). (التقرير السنوي لهيئة المساحة الجيولوجية السعودية، 2021م).

### ♦ استكشاف اليورانيوم والثوريوم لمربع حقل

تقع منطقة الدراسة شمال غرب المملكة العربية السعودية، شرق مدينة حقل. حيث عثر على حجر رمل يحوي على رواسب غنية بتركيزات عالية من اليورانيوم، إذ إن نسبة اليورانيوم/الثوريوم (TH/U) في حجر الرمل مرتفعة جدًا، مما يشير إلى أن اليورانيوم حدث له إثراء في حجر الرمل نفسه.

### ♦ الدراسة التفصيلية لرمال السيليكا والحجر الجيري عالية النقاوة جنوب الخرج بمنطقة الرياض

أهداف المشروع هي الكشف عن مصادر عالية النقاوة من رمال السيليكا وحجر الجير بمنطقة الرياض، لما يمثله هذان الخامان من أهمية للعديد من الصناعات المهمة والمتطورة. ونظرًا للطلب المتزايد عليها تم العمل بهذا المشروع لإيجاد مصادر جديدة واعدة تلبي حاجة السوق.

## اللائحة المنظمة لتراخيص التعدين

للحصول على تصريح التعدين في المملكة العربية السعودية، يجب معالجة تعقيد الهيكل التنظيمي الذي ترأسه العديد من السلطات. تنظم وزارة الطاقة ووزارة الصناعة والثروة المعدنية صناعة التعدين، وتمنح التراخيص، وتنظم عمليات التعدين. ويجب أن تخضع الشركات الراغبة في الحصول على رخصة التعدين لأنظمة صارمة لضمان العمل والاستدامة البيئية والحفاظ على الموارد. تقوم الدراسات المتعلقة بتقييم الأثر البيئي بتقييم التداعيات المحتملة التي قد تحدثها أنشطة التعدين على البيئة المحيطة والمجتمع.

### ■ رخصة الكشف

ويتيح ترخيص التنقيب للشركات إجراء مسوحات وتقييمات أولية لاكتشاف المناطق الغنية بالتوضعات المعدنية. وهي فترة تتسم برسم الخرائط الجيولوجية، والعمل الميداني، والحفر، والتي يتم من خلالها تقييم الموارد الطبيعية وجودتها. عادة ما يكون للتعهدات، التي تظهر فيها الشركات جهودها تجاه أنشطة التنقيب، ذات فترات قصيرة من رخصة التنقيب. الخطوة الأولى بعد صلاحية تحديد الرواسب المعدنية هي منح الشركات ترخيص الاستثمار.

### ■ رخصة التعدين

يمكن للأشخاص بموجب ترخيص الاستثمار البدء بالتعدين تجاريًا، واستخراج المعادن من الأرض. في هذه المرحلة، يتم بناء البنية التحتية للتعدين، بما في ذلك مرافق التنقيب، ومصانع المعالجة، وشبكات النقل.

# قطـاع التعديــن: التحديــات والحلــول

في القرن العشرين، كانت المملكة العربية السعودية موردًا رئيسيًا للنفط لكل من الغرب والعالم النامي. واليوم، مع توقع تراجع الطلب على النفط على المدى الطويل، ترغب المملكة في إعادة تموضعها بين روسيا والصين والهند وأوروبا والولايات المتحدة كمركز عالمي رائد للطاقة والاتصال. وبعد رؤية المكانة القوية التي تتمتع بها الصين في سلسلة التوريد العالمية للمعادن الأرضية النادرة والمزايا التي تجلبها، تسعى المملكة إلى التعلم من التجربة الصينية وبناء دور مماثل لنفسها .

بالرغم من وجود امكانيات كبيرة للثروة المعدنية لتلعب دورا هاما في التنمية الا أن الناتج الإجمالي المحقق من النشاط التعديني يعتبر في مجموعة أقل بكل المقاييس مقارنا بالنشاطات الاقتصادية النفطية أو مقارنا بالإمكانات الحقيقية لهذا القطاع العام ويعود ذلك الى تعرض النشاط التعديني الى العديد من المعوقات نورد أهمها فيما يلي على سبيل المثال لا الحصر:

- مناطق التعدين متباعدة ومعظمها يقع في بيئة قارية ذات درجات حارة مرتفعة, علاوة على كبر مساحة المملكة التي تتجاوز مليوني كيلومتر . يمثل الدرع العربي منها مساحة لا تقل عن 660 ألف كيلومتر مربع.
- محدودية البنية التحتية التي لا تفي باحتياجات جميع المكامن التي تقع في المناطق النائية والبعيدة.

طول الفترة ما بين عمليات الاستكشاف والإنتاج والتي قد تصل إلى مدة لا تقل عن 10 سنوات وخاصة الذهب والفضة والنحاس.

الخدمات اللوجستية وإمدادات المياه ربما تكون العقبة الأكبر وخاصة بالنسبة لبلد تغطيه الصحراء إلى حد كبير هي المياه، وهو أمر ضروري لاستخراج المعادن من المناجم المفتوحة أو تحت الأرض. الماء هو المفتاح.

جذب شركات التعدين العملاقة التي تتمتع بخبرة عالمية وموارد مالية كبيرة، والذين يتنافسون مع الشركات الأصغر في المزادات للحصول على حقوق التنقيب.

احتياطيات اليورانيوم في المملكة غير اقتصادي، حيث من المتوقع أن توجد رواسب خام النحاس التي توجد فيها الاحتياطيات فقط في مناطق صغيرة أو متوسطة الحجم، مما يجعلها أقل جاذبية لشركات التعدين العالمية الكبرى للتعدين من الشركات الأكبر حجمًا.

وجود الخامات المعدنية في مناطق نائية أدى الى أن تتحمل مشروعات تنميتها كل أو أغلب تكاليف عناصر البنية الأساسية مما يشكل عبئا كبيرا على هذه المشروعات ويؤثر في جدواها الاقتصادية من خلال ارتفاع كلفة انتاجها.

نقص الخبرات المدربة تدريبا عاليا على أعمال التنقيب والاستكشاف والمناجم واستخراج الخامات ومعالجتها والطرق المثلى لاستخلاص.

**نقص الخبرات والكوادر العالية في أعمال تصميم وتنفيذ مشروعات التعدين.**

- قلة مراكز التدريب المهني في مجال صناعات التعدين والثروة المعدنية.
- انخفاض عدد الشركات أو المؤسسات الصناعية المتخصصة في عمليات تركيز الخام وتجهيزه وجعله ملائما للصناعات المطلوب من أجلها لإمكانية الاستفادة من الخامات منخفضة الجودة.
- التخطيط او التنسيق تجاه تنمية الصادرات لمواجهة اسواق التصدير العالمية المفتوحة خاصة في مجال أحجار الزينة.

- ارتفاع تكلفة النقل من مكان الى آخر وتكلفة التأمين، بالإضافة الى اجور وتكاليف المناولة (التفريغ والتحميل) في المحطات او الموانئ وكذلك اجور التخزين.
- المعلومات الاساسية عن الاسواق الخارجية واحتياجاتها وحجم ومعدلات نمو هذه الاحتياجات بالنسبة للمنتجات المصدرة، وكذلك متطلبات هذه الاسواق من مواصفات العرض للمنتجات.
- المعلومات عن القنوات التسويقية والمستوردين الرئيسيين ومعلومات عن السلع المنافسة والاسعار وغيرها من المعلومات الاساسية لعمليات التصدير.
- اعتماد العديد من الصناعات الأساسية والتحويلية على استيراد العديد من الخامات التعدينية مثل الكاولين والجارنت والكوارتز النقي ودخولها في الصناعات المحلية.
- ارتفاع أسعار المواد الكيميائية وقطع الغيار المستخدمة في معالجة الخامات المعدنية.
- المناجم التعدينية الحالية لا تسد حاجة المصانع المحلية في حال توقف سلاسل الإمداد والذي بدوره يتطلب المزيد من أعمال الاستكشاف والتنقيب عن مواقع جديدة.
- الموارد المحلية من المعادن لا تفي باحتياجات العديد من المصانع في حال انقطاع أو تأثر سلاسل الإمداد.
- تواجه شركات التعدين في المملكة بعض المخاطر التي قد تؤثر على عملياتها وأدائها المالي ومنها التقلبات في الاقتصاد العالمي: قد يكون لتباطؤ أو ركود النشاط الاقتصادي العالمي تأثير على الطلب على المعادن والمعادن التي تنتجها شركة معادن حيث تعتمد صناعة التعدين على الحالة العامة للاقتصاد العالمي.

- تقلب أسعار السلع الأساسية: تتأثر إيرادات وأرباح شركات التعدين بأسعار السلع الأساسية, مما يعني أن التغيرات في الطلب والعرض العالمي لهذه المعادن يمكن أن تؤثر على إيراداتها وأرباحها.
- المخاطر التشغيلية: قد تؤثر النكسات التشغيلية مثل تعطل المعدات والحوادث المؤسفة والمشاكل البيئية على قدرة شركات التعدين على تصنيع وتسويق معادنها.
- المخاطر التنظيمية: قد تؤدي التغييرات في هذه اللوائح إلى زيادة صعوبة أو تكلفة التشغيل معادن أو قد تقلل الطلب على منتجاتها.
- مخاطر المنافسة: تواجه شركات التعدين منافسة من شركات التعدين الخارجية، ومن الممكن أن تؤدي هذه المنافسة إلى انخفاض أسعار منتجات هذه الشركات، مما قد يضر بأرباحها وإيراداتها.
- التدقيق الدولي فيما يتعلق بالتأثير البيئي والاجتماعي والحوكمة لصناعة التعدين قد يحد من شهية المستثمرين الدوليين لتوسيع الاستثمارات في القطاع والدخول في شراكات في الخارج.

## الحلـــــول :

لقد بدأت الجهات ذات العلاقة باستكشاف وصناعة التعدين بالتعاون مع وزارة الصناعة والثروة المعدنية لتسهيل وتذليل معظم العقبات والتحديات الوارد ذكرها ومنها على سبيل المثال لا الحصر (المجلة 2018م) :

عقد منتدى دولي سنوي للتعدين في مدينة الرياض ويُنظر إليه باعتباره قمة لمستقبل قطاع المعادن والتعدين في المنطقة الممتدة من أفريقيا إلى غرب ووسط آسيا، يستعرض ابرز تطورات وتحديات القطاع وإيجاد الحلول وتبادل

الفرص الاستثمارية وجذب الاستثمارات الدولية لتطوير سلاسل القيمة المعدنية في المنطقة.

- تطوير مجال البحث والتطوير R & D في كل ما يتعلق باستكشاف وتقنية التعدين.
- تسريع استكشاف المعادن المهمة لتحقيق أهداف تحول الطاقة على مدى الثلاثين عامًا القادمة.
- إدخال إصلاحات هيكلية في صناعة التعدين من خلال إطلاق المبادرات والشراكات ومراجعة أنظمة التراخيص والاستثمار والتمويل بما يتناسب وطبيعة هذه الصناعة.
- إيجاد البيئة الاستثمارية الملائمة لنمو هذا القطاع وتوسعة دوره، وذلك من خلال وضع أنظمة إدارية وسياسات تخطيطية تضمن التنافسية وتراكم رأس المال.
- استكمال مشروعات خطوط السكك الحديدية يربط بين مواقع المعادن في شمال المملكة ومواقع الإنتاج والتصدير، حيث يمثل ذلك خطوة رئيسية في سبيل ازدهار الحركة الصناعية التعدينية وتطوير الصناعات الإنتاجية والتحويلية والخدمات المصاحبة لها وإدخال صناعة جديدة تتكامل مع الصناعات القائمة.
- تنمية المناطق النائية من خلال إقامة الصناعات التعدينية بالقرب من مصادرها.
- استكمال إنشاء المدن الصناعية التعدينية المتخصصة على غرار «وعد الشمال»، والتي تعد في الأساس مدينة تعدينية متكاملة.

- تطوير قدرات الكوادر البشرية العاملة في هذا القطاع، من خلال تأسيس مراكز التميز لتدريب وتأهيل السعوديين في هذا المجال.
- تعزيز التكامل العربي الاقتصادي في قطاع التعدين، وذلك من خلال تنسيق الجهود وتبادل الخبرات.
- استكمال تنفيذ مبادرة «تطوير مدينة وعد الشمال المتجددة»، ومبادرة «المشروعات التعدينية في منطقة رأس الخير»، ومبادرة «بناء مراكز لإنتاج الذهب في المنطقتين الوسطى والشمالية»، التي تهدف لتقديم قيمة مضافة للاقتصاد المحلي.

# دور الاقتصـاد الدائـري في صناعـة التعديـن

**الاقتصاد الدائري** يمثل نموذج اقتصادي يستهدف تقليل الهدر من المواد والسلع والطاقة والاستفادة منها قدر الإمكان، بحيث يتم خفض الاستهلاك والنفايات والانبعاثات، وذلك عن طريق تبسيط العمليات وسلاسل الإمداد. يسهم الاقتصاد الدائري أيضاً في تعظيم الاستفادة من جميع المواد الخام والمعادن والطاقة والموارد بمختلف صورها، فضلاً على إطلاق عمليات إعادة التدوير والاستخدام وإعادة التصنيع والتطوير لإنشاء نظام حلقة مغلقة، بدلاً من نمط الهدر وإلقاء النفايات. الاقتصاد الدائري أكثر استدامة من النظام الاقتصادي الخطي الحالي، الذي يعتمد على فكرة استخراج المواد، وتصنيع منتج معين، ثم استخدامه، والتخلص منه في النهاية.

## أبعاد الاقتصاد الدائري الثلاثة

لا توجد اقتصادات دائرية بالكامل وخالية من النفايات، وحتى إعادة التدوير تتطلب طاقة. ولكن في جميع أنحاء العالم، يتم استخدام نهج التدوير بشكل متزايد من قبل الشركات وصانعي السياسات والمنظمات غير الحكومية لإعادة التفكير وإعادة تصميم كيفية استخدام الموارد. حاليا،

لا يزال الاقتصاد السعودي بعيدًا عن التدوير، نظرًا لاعتماده على الوقود الأحفوري غير المتجدد وبمعدل مرتفع في توليد النفايات. سيتطلب منه التحول إلى الدائرية اتخاذ إجراءات على المستوى الجزئي والمتوسط والكلي.

- **المستوى الجزئي** Mico level يصف التغيرات في سلوك المستهلكين الأفراد، أو الإنتاج وعمليات التصميم للشركات الفردية. على سبيل المثال، بعض شركات المنسوجات العالمية تبنت فلسفة تصميم المنتج «من المهد إلى المهد»،

حيث تكون المنتجات القابلة لإعادة التدوير أو فقط قابلة لإعادة التدوير. يتم استخدام المواد الكيميائية القابلة للتحلل الحيوي، بحيث يمكن إعادة تدوير المنتجات أو إعادة إدخالها المحيط الحيوي الطبيعي.

- يصف **المستوى المتوسط** Mezo level الإجراءات التعاونية المتخذة بين الكيانات، مثل الشركات في منطقة الحديقة الصناعية. يرغب صناع السياسات في تحويل المجمعات الصناعية إلى «صناعة بيئية». ويتمثل أحد الأساليب في تحديد مناطق «التكافل الصناعي»، حيث تنتج النفايات يتم إعادة استخدام إحدى الشركات أو تحويلها إلى مواد خام لشركة أخرى.
- يصف **المستوى الكلي** Macro level الإجراءات المتخذة على نطاق أوسع، كما هو الحال في مدينة ما، أو على المستوى الوطني أو المحتمل وحتى المستوى العالمي. على سبيل المثال، قامت منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية والمفوضية الأوروبية بتطوير السياسات مجموعات الأدوات والحوارات لتشجيع حكومات المدن والحكومات الإقليمية على التحرك نحو الدائرية.

## لماذا ينبغي على المملكة العربية السعودية أن تبني نموذج الاقتصاد الدائري؟

هناك ضرورتان أساسيتان للمملكة العربية السعودية لتبني الاقتصاد الدائري: بيئيا واقتصاديا. **على المستوى البيئي**، فإن التحضر السريع والتحديث والنمو السكاني أدى إلى خسائر فادحة، وكانت آثارها واضحة من تنوع بيولوجي وتراث ورفاهية مجتمعية. ومن شأن الاقتصاد الدائري أن يعيد تأكيد قيمة الموارد البيئية وتشجيع التفكير الجديد حول كيفية تقليل النفايات والتلوث والتدهور البيئي.

أن استغلال احتياطيات المملكة من الهيدروكربونات، والتوسع الحضري والتحديث المكثف الذي أعقب ذلك، أدت إلى تدهور كبير في الهواء والمناخ

والأرض والمياه ، وكانت التأثيرات بعيدة المدى خارج حدود المملكة. وهذا التدهور متقدم وغير مستدام، وهو ما يسلط الضوء على السبب الى ان هناك حاجة ماسة وملحة إلى التحول إلى الدائرية.

**على المستوى الاقتصادي**، يمكن للاقتصاد الدائري أن يساعد المملكة على ذلك وتنويع مواردها بما يتجاوز الاعتماد على مواردها النفطية الوفيرة ولكنها محدودة – والحد من ريادتها على مستوى العالم من مستويات النفايات البلاستيكية والغذائية، وتحويل ما تبقى منها إلى مورد اقتصادي بدلا من عائق اقتصادي.

اقترحت عدد من الدراسات أن الانتقال إلى الاقتصاد الدائري في المملكة يمكن أن يكون له تأثير إيجابي على النمو وخلق فرص العمل، حيث تستخدم الاقتصادات الموارد بشكل أكثر كفاءة وتستخرج المزيد من القيمة مما لديهم. ويمكن لنموذج الاقتصاد الدائري أيضًا أن يوفر أساسًا لأفكار جديدة ومبتكرة نماذج الأعمال التي لا تعتمد بالضرورة على الاستهلاك والرمي والشراء شيء جديد. من خلال اقتصاد المشاركة والتأجير، على سبيل المثال، الشركات الصغيرة وأصحاب المشاريع الصغيرة يمكن أن يصبحوا مقدمي خدمات، وذلك بفضل التكنولوجيا المنخفضة التكلفة والمفتوحة الوصول للمنصات، دون الحاجة إلى استثمار رأس المال في الإنتاج. يمكن للمستهلكين تقليل الأموال التي لديهم والإنفاق على المواد التي يمكن التخلص منها واستخدامها للحصول على المزيد من المنتجات والخدمات طويلة الأمد والمبتكرة. كما يقلل الاقتصاد الدائري من التهديدات التي يتعرض لها النمو المستقبلي والتي تأتي من الأنماط غير المستدامة من استخدام الموارد. ويأخذ في الاعتبار استنزاف وهدر الموارد الطبيعية كخسارة للموارد الطبيعية.

تعمل المملكة على تعزيز المنتجات الأكثر استدامة مع السعي إلى تقليل النفايات، وتشجيع إعادة تدويرها، إضافة إلى الحد من انبعاثات الكربون. ويتحقق ذلك بالانتقال نحو الاقتصاد الدائري من خلال وضع التشريعات، وإنشاء المراكز المتخصصة وتشجيع الاستثمار في هذا المجال، مثل: إنشاء مركز أبحاث تقنيات احتجاز وتخزين واستخدام الكربون، وكذلك تطوير أكبر مصنع لجمع وتنقية ثاني أكسيد الكربون في العالم، وتحويله إلى مواد تستخدم في عمليات صناعية عديدة، إلى جانب إنشاء المركز الوطني لإدارة النفايات في 2021م، وإطلاق الشركة السعودية الاستثمارية لإعادة التدوير. ستؤدي هذه الجهود إلى تقليل الضغط على البيئة، واستبعاد مرادم النفايات بنسبة 82 في المائة بحلول 2035م (الخريف 2022م).

سارعت المملكة للاستثمار في الاقتصاد الدائري، ووضعت رؤية 2030م من ضمن أهدافها تحويل 100 % من النفايات الصلبة المنزلية، و85 % من النفايات الصناعية من مكبات النفايات، ولتحقيق هذه الأهداف أطلقت المركز الوطني لإدارة النفايات «موان» لتنظيم أنشطة إدارة النفايات والإشراف عليها والعمل على تحفيز الاستثمار فيها والارتقاء بجودتها، ويستهدف «موان» إعادة تدوير 42 % من النفايات، وتحويل 35 % منها إلى سماد، و19 % لتوليد الطاقة عبر حرقها.

يقدم الاقتصاد الدائري نموذج اقتصاديا جديد يهتم بتغيير كل أساليب الإنتاج وأنماط الاستهلاك غير المستدامة بحيث يهدف إلى الاستغلال الأمثل للثروات المعدنية والتنمية المستدامة لصناعة التعدين وحفظ قيمة المنتجات والمواد والموارد في الاقتصاد لأطول فترة ممكنة من عمر الاستخدام وتقليل النفايات بشكل كبير ويساهم في تعزيز الكفاءة وخفض استهلاك الطاقة الكهربائية وانبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون.

إضافة إلى ذلك يساهم الاقتصاد الدائري في تحديث النظام الاقتصادي القائم وخلق فرص عمل مستدامة والمحافظة علي الموارد الطبيعية وحماية البيئة والمسئولية تجاه المكان الذي يستثمر فيه بتحقيق الاستدامة البيئية وتقليل استغلال موارد البيئة ومن تأثيرها علي ظاهرة التغير المناخي ويؤدي إلي النمو المستدام للاقتصاد الوطني (من حيث تنويع القاعدة الإنتاجية وتحقيق التكافل بين الصناعات وتوفير وحماية الموارد الطبيعية) وتصميم نموذجاً أكثر استدامة على المدى البعيد وخلق فرص وظيفية جديدة ( ناظر 2020م).

والتصميم الدائري لتطوير الصناعات من حيث تصميم المنتجات لتصبح قابلة لإعادة التدوير والوصول إلي صفر من المخلفات التعدينية والصناعية عامة والتلوث الناتج عنهما وتوطين التقنيات اللازمة وتحفيز البحث العلمي والابتكار والتخلص من المرادم (على المدي البعيد) وتعظيم الفائدة (الاستفادة للمستثمر والمستهلك) بدل تعظيم الربح كما يعزز قيم الاستدامة والشفافية عن طريق المزيد من الشراكات في سلاسل القيمة المضافة ( ناظر 2020م).

لذا فإن نموذج الاقتصاد الدائري هو اطار شامل، حيث يصمم المنتج او الخدمة وعملية الإنتاج وقناة التوزيع وكل جانب من جوانب أنشطة الشركة حول استخدام الحد الأدنى والأمثل من الموارد الجديدة وإعادة استخدام الموارد المتوفرة ويحاول النموذج الدائري محاكاة سلوك الطبيعة الام في كفاءتها وقدرتها علي التكيف مع الظروف البيئية الجديدة.

تم إطلاق شركة «سرك» بهدف تطوير وتمويل أي نشاط يقوم على إعادة التدوير وتحقيق الاقتصاد الدائري، تحرص الشركة على رفع نسبة تحويل النفايات عن المرادم إلى 94 % بحلول عام 2035م. وأيضاً تعمل المملكة على إعادة تدوير مخلفات الهدم والبناء خصوصاً أن المملكة تشهد حالياً مرحلة

تطوير وإعادة بناء الأحياء القديمة في مناطق متفرقة من الرياض وجدة وغيرهما، والتي ينتج عنها الكثير من مخلفات البناء والهدم التي يمكن إعادة استخدامها (المعجل 2023م).

أعلنت «سرك» إعادة تدوير أكثر من 16 مليون طن من مواد البناء والهدم خلال عام 2022م، وساهمت في مبادرة صناعة البلوك الإسمنتي الأخضر من خلال إعادة تدوير بقايا الخرسانة الجاهزة، كما وقعت «سرك» مع «نادك» مؤخراً اتفاقية لإعادة تدوير ما يزيد على 150 ألف طن من مخلفات الأبقار سنويًا، لإنتاج الأسمدة العضوية عالية الكفاءة، وهو أول مشروع نوعي في الشرق الأوسط.

يؤدي ثاني أكسيد الكربون ($CO_2$) وظيفة حساسة لاستدامة الحياة على الأرض، ولكن الزيادة الهائلة في الغازات الدفيئة منذ التصنيع أدت إلى انبعاث الكثير من ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي. ويُعَد اقتصاد الكربون الدائري مفهوما مهما لإدارة الانبعاثات المفرطة لثاني أكسيد الكربون في العالم.

ما هو اقتصاد الكربون الدائري؟ تتخلص معظم الاقتصادات من المواد الخام كنفايات بعد الاستخدام. يستخدم النظام الاقتصادي الدائري الموارد مرارًا وتكرارًا.

يعد اقتصاد الكربون الدائري إطارًا لإدارة الانبعاثات وخفضها. إنه نظام حلقة مغلقة يتضمن 4R: التخفيض، وإعادة الاستخدام، وإعادة التدوير، والإزالة.

اعتمدت المملكة وأرامكو إطار الاقتصاد الدائري للكربون كوسيلة لتقليل البصمة الكربونية لهما. إن الاقتصاد الدائري للكربون هو الإطار الأفضل لتحقيق أكبر الأثر في خفض الانبعاثات العالمية، مع ضمان النمو الاقتصادي المستمر. قامت ارامكو بمبادرة تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وتعزيز

كفاءة استهلاك الوقود، والحفاظ على المياه، وإنشاء مواد الجيل التالي التي تجعل المنتجات الاستهلاكية أكثر خضرة. تجربة أرامكو الرائدة في تدوير الكربون للحد من ثاني أكسيد الكربون وإعادة استخدامه، واستخلاص الكربون من مخلفات محطات الطاقة ثم احتجازه في باطن الأرض، وحقنه في مكامن النفط مما يساعد على حجز الغاز والمحافظة على مستوى الضغط ومضاعفة كمية النفط المستخرجة من البئر.

استخدمت شركة أرامكو الذكاء الاصطناعي والبيانات الضخمة لتقليل الانبعاثات من خلال مراقبة استهلاك الشركة للطاقة وتحسين العمليات، وتحسين المعالجة والتحليل الزلزالي، وتحسين طرق استخلاص النفط الخام، وتعزيز إنتاجية آبار النفط. تعتبر أعمالها الأولية بالفعل من بين أدنى المعدلات في الصناعة.

ذكرت الوكالة الدولية للطاقة أن الوصول إلى صفر انبعاثات كربونية بحلول عام 2040م سيتطلب زيادة في إنتاج المعادن بنحو ستة أضعاف بحلول ذلك العام، وقد تشهد بعض المعادن الأساسية مثل الليثيوم زيادة في الطلب بمعدلات تتجاوز أربعين ضعفاً، بينما قد يتزايد الطلب على النيكل والكوبالت بمعدلات تتجاوز 20 ضعفاً. ولا يمكن الاعتماد على التعدين كمصدر مستدام للحصول على هذه المعادن النادرة، يمكن أن يقلل الاقتصاد الدائري من الاعتماد على التعدين، ويضمن إعادة استخدام هذه المواد والعناصر النادرة مرة أخرى، في حالة تطبيق الاقتصاد الدائري على نطاق واسع. يمكن أن تساعد عملية إعادة التدوير في استعادة المعادن من نحو 60 مليون طن من الهواتف المحمولة، وأجهزة اللاب توب وغير ذلك من أجهزة إلكترونية. في الوقت الحالي يُعاد تدوير 1 % فقط من النيوديميوم، كما أن باقي المعادن الهامة الأخرى الموجودة في الأجهزة الإلكترونية، واللازمة للتحول نحو الطاقة المتجددة (مثل الليثيوم، التانتالوم، الكوبالت، والمنغنيز) تتم إعادة تدويرها بمعدلات ضئيلة للغاية.

وضعت نيوم التدوير كعنصر رئيسي في تطويرها. ويضع مشروع جيجا، الواقع في شمال غرب المملكة، الأساس لتحدي النموذج الخطي الحالي، وبدلاً من ذلك أعاد تصور الحفاظ على الموارد، والحد من النفايات، وأداء سلسلة التوريد. من الأسهل على نيوم أن تدمج حلولاً تخفف من النفايات لأنها تبني من الصفر، لذلك لديها الفرصة للقيام بذلك من البداية. إن الفصل بين النمو الاقتصادي واستخدام الموارد الطبيعية يوفر الفرصة للتوسع بشكل مستدام ومالي. إن تحويل النظام التقليدي لأخذ النفايات إلى اقتصاد دائري يقلل من الاعتماد الدائم على المواد الخام الأولية والتكاليف المرتبطة بها، مما يؤدي إلى زيادة الكفاءة والربحية للمستثمرين. إنها أيضًا فرصة للخدمات المبتكرة، والتي يمكن أن تساعد الاقتصاد الدائري على توليد 4.5 تريليون دولار أمريكي من الناتج الاقتصادي الإضافي بحلول عام 2030م.

ومن الأمثلة على ذلك استخدمت نيوم المحلول الملحي لإنشاء الجبس الذي يتم تحويله إلى الجبس والجبس بورد وهو مادة مضافة للأسمنت، وكل ذلك سيتم استخدامه في مدينة ذا لاين - مدينة نيوم العمودية. حيث يقلل الإنتاج المحلي من الحاجة إلى الواردات مما يقلل أيضًا من وسائل النقل المرتبطة بها. منتج آخر يتم استخلاصه من خلال عملية تحلية المياه هو البوتاسيوم، الذي يستخدم في إنتاج الأسمدة لكل من تنسيق الحدائق والزراعة. يعد الملح منتجًا رئيسيًا يمكن إنتاجه وبيعه وتحويله إلى البوتاس لصناعة الزجاج والكلور كلوريد البولي فينيل (PVC). ومن خلال إنتاج هذه العناصر بالطاقة المتجددة، يتم إنشاء صناعة كيميائية ومعدنية نظيفة ومستدامة.

وعموما فإن صناعات التعدين في المملكة لم تأخذ بتطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري كنموذج شمولي محفز للابتكار ومشجع على الإنتاج الصديق للبيئة والاستهلاك الرشيد وإعادة التدوير لكل أنواع النفايات البلدية والصناعية والطبية والزراعية وبما في ذلك الانبعاثات ثاني أكسيد الكربون (ناظر 2020م).

# عوائق تطبيق واستثمار الاقتصاد الدائري

## • النظـام الخطـي الحالـي

لقد تطور الاقتصاد السعودي خلال القرن الماضي على أساس الثروة غير المتوقعة من النفط والغاز - قطاع يعتمد على استخراج الموارد واستنزافها. ويدرك صناع السياسة السعوديون ذلك جيداً الحاجة إلى الحفاظ على بعض الثروة النفطية في البلاد وإعادة استخدامها، ولا سيما من خلال استثمارها رأس المال المستمد من النفط في البنية التحتية وتنمية رأس المال البشري. البلاد لذلك استخدمت بعض ثروتها النفطية لتطوير مجموعة واسعة من الصناعات والخدمات. على وجه الخصوص، لها وقد وفرت الميزة النسبية من حيث الطاقة الأساس للصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة مثل البتروكيماويات والبلاستيك والألومنيوم. ومع ذلك، تم توليد معظم الإيرادات الحكومية وقد تم استخدام النفط في الإنفاق الاجتماعي، ولم تطور المملكة العربية السعودية إلا مؤخرًا برنامجًا كبيرًا صندوق الثروة السيادية. هناك أيضًا مخاوف من أن الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة تعتمد على أنموذج خطي قوي لاستنزاف الموارد. وبينما تتطلع المملكة العربية السعودية إلى مستقبل ما بعد النفط في نهاية المطاف، فإنها تفعل ذلك مهتم بتطوير أنماط إنتاج أكثر استدامة، وتقليل النفايات، والنقل وحماية البيئة تتصدر جدول أعمال السياسات.

إن التحول نحو الدائرية سيمكن المملكة العربية السعودية من جني مكاسب بيئية كبيرة والمكافآت الاقتصادية من خلال زيادة إنتاجية وقيمة مواردها وتقليلها تسرب القيمة. وهذا يدفع بعض التفكير السياسي بشأن الاستدامة، ولكن العادات القديمة لا تموت بسهولة. تم تصميم الحوافز الحكومية لدعم الاقتصاد الخطي، ولم يتم تصميم المنتجات من أجله نماذج الأعمال الدائرية.

هناك أيضًا عدد من العوائق أمام ريادة الأعمال والقطاع الخاص الابتكار الذي قد يعيق البلاد عن تطوير نماذج أعمال جديدة للتعميم.

### ■ الحوافز والتسعيرات

وتشكل الحوافز، بما في ذلك التسعيرات، جزءا من مجموعة أدوات السياسات التي يمكن للحكومات استخدامها للتحول أنماط الاستهلاك، ولكن يجب أيضًا موازنتها مع التوقعات المجتمعية. لقد اعتاد المستهلكون والشركات منذ فترة طويلة على الطاقة والمياه منخفضة التكلفة. هذا قد تقليديا يقتصر الحوافز لهم على خفض الاستهلاك. بدأت بعض التغييرات: في وعلى وجه الخصوص، ارتفعت أسعار الطاقة بشكل ملحوظ منذ طرح رؤية 2030 وهناك كما تم بعض الزيادات في تعريفات المياه. وفي ديسمبر 2015م، أطلقت البلاد خطة مدتها خمس سنوات.

## ● برنامج إصلاح دعم الطاقة

### ■ بيئة العمل

تقر الاستراتيجية الوطنية لوزارة البيئة والمياه والزراعة لعام 2019 بذلك إن الأنظمة البيئية السعودية لا تلبي مشاركة القطاع الخاص. على سبيل المثال، إن الأطر التنظيمية لإدارة النفايات وإعادة تدويرها لا تزال ناشئة، ولا يوجد دور لها القطاع الخاص في مراقبة الالتزام باللوائح البيئية. وفي الوقت نفسه، هناك عدد قليل الحوافز، مثل القروض الميسرة، للشركات الناشئة في مجال الأعمال الخضراء، وبيئة الأعمال بشكل عام وهي موجهة نحو اللاعبين المحليين والدوليين الكبار أكثر من تسهيل الشركات الناشئة المبتكرة. تميل مبادرات القطاع الخاص التي تعزز الاستدامة إلى أن تأتي من جهات فاعلة دولية كبيرة.

## ■ الوعـــي العـــام

يرتبط نموذج الاقتصاد الدائري بأفكار الإدارة البيئية والإيكولوجية معرفة القراءة والكتابة. الوعي العام بالتحديات البيئية محدود. يجد الشباب صعوبة في تقدير المشاكل الناجمة عن ارتفاع درجات الحرارة العالمية . تاريخياً، نظرت الحكومة السعودية إلى فكرة تغير المناخ من صنع الإنسان على أنها فكرة تهديد محتمل للطلب على صادراتها الرئيسية، النفط. ونتيجة لذلك، قاومت السلطات تثقيف الجمهور حول هذه المشكلة لبعض الوقت.

## ■ البيانـــــات

هناك نقص في البيانات المتاحة للعامة حول التأثيرات البيئية في المملكة العربية السعودية، وهو ما يمكن أن يحدث تحفيز التحول إلى نهج أكثر دائرية. البيانات المتعلقة بالنفايات غير مكتملة، وتشير الدراسات المختلفة إلى ذلك أرقام مختلفة، مما يجعل من الصعب على الحكومة أو القطاع الخاص تقييم حجم المشكلة الحاجة أو الفرص للأعمال التجارية. بيانات عن التكلفة البيئية والإيكولوجية كما أن طرق الإنتاج والاستهلاك محدودة للغاية.

## • سلاسل قيم المعادن في المملكة Mineral Value Chains

أكد الخبراء أن المستقبل المستدام لسلسلة القيمة في صناعة التعدين يعتمد على نظام متكامل يتضمن الاتصال والتسريع والتكنولوجيا. أن الطريق الواضح نحو الطاقة الخضراء يتطلب موارد يمكن الوصول إليها لوجستياً بالإضافة إلى تكامل سلسلة التوريد وسلسلة القيمة. ولكي يصبح ذلك ممكنا، يجب على القطاع ضمان زيادة التنقل والوصول والسهولة اللوجستية لعملائه. وتهدف المملكة إلى أداء دورها كمركز لوجستي عالمي يربط القارة ويسمح لمقدمي الخدمات بأن يكونوا أقرب إلى العملاء.

تهتم المملكة أيضًا بأن تصبح مركزًا وممرًا للبيانات، وسيساعدها الوصول إلى المعادن في تأمين الموارد اللازمة لبناء وصيانة البنية التحتية اللازمة. وتسعى أيضًا إلى أن تكون جزءًا لا يتجزأ من رقمنة الاقتصاد العالمي من خلال أن تصبح جزءًا من سلسلة التوريد العالمية وتجارة المعادن. يسلط الممر الاقتصادي الذي تم الإعلان عنه مؤخرًا بين الهند والشرق الأوسط وأوروبا الضوء على الدور الذي تهدف المملكة إلى لعبه كمركز عالمي للطاقة والاتصال.

منذ بداية رؤية 2030 في عام 2016م، تم إنشاء نظام متكامل من خلال وجود برنامج يسمى NIDLP حيث تم دمج القطاعات الأربعة – التعدين والصناعة والخدمات اللوجستية والطاقة – معًا وجعلت جميع الموارد المعدنية في المملكة متاحة للاستخدام. رأس الخير تعد واحدة من أبرز المراكز اللوجستية ومواقع التعدين في المملكة واجتذبت بالفعل استثمارات بقيمة 46 مليار دولار.

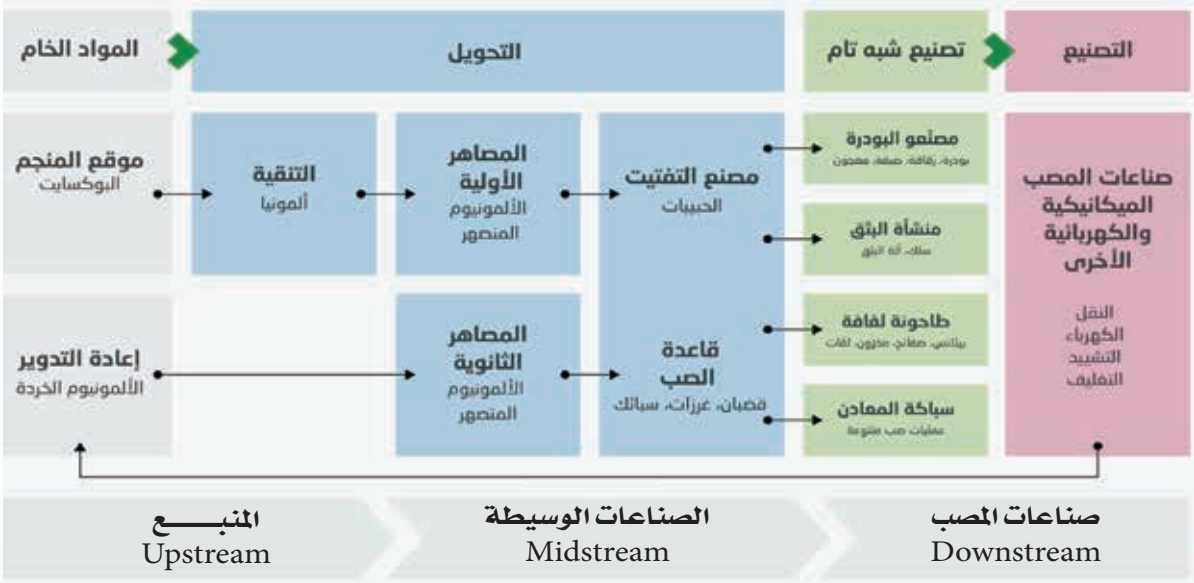
أعلنت NIDLP عن اتفاقية مع Newlab KSA تهدف إلى جذب رواد الأعمال والمؤسسين العالميين للعمل مع أرامكو ومعادن وسابك وبقية النظام البيئي لحل التحديات المستقبلية وتطوير الحلول التي من شأنها المساهمة في مستقبل الصناعة وسلسلة قيمتها. أن هذه الجهود المشتركة نحو تطوير سلاسل قيمة التوريد الشاملة متجذرة في العمل والجهود المستدامة. تساهم صناعة التعدين ومعالجة المعادن في المملكة العربية السعودية بحوالي 17 مليار دولار في الناتج المحلي الإجمالي للمملكة سنويًا وتمثل أنشطة التعدين 15 % من مساهمة القطاع بينما ترتبط نسبة 85 % المتبقية بالقيمة التي تخلقها العمليات المتوسطة والنهائية التي تتبع الاستخراج.

تحتل المملكة المرتبة الـ13 عالميًا من حيث وفرة وتنوع المعادن، كالفوسفات والذهب والنحاس والزنك وخام الحديد واليورانيوم والنيوبيوم والفضة والفلسبار

والبوكسيت والسيليكا والحجر الجيري وغيرها. وتنتج السعودية معادن مساهمة في تطوير سلاسل القيمة، سواء معادن فلزية، مثل: الحديد، والألمنيوم، والنحاس، والزنك، والذهب، أو معادن لافلزية، مثل: الأسمدة الفوسفاتية، والأسمنت، والزجاج، والسيراميك، وقد تم التعرف على 48 نوعًا من المعادن المنتشرة في أكثر من 5,300 موقع، تقدر قيمتها بـ5 تريليونات ريال. كما تنتج السعودية معدن البوكسايت سنويًا بنحو 4.9 ملايين طن، ويعالج بعد ذلك لينتج مليون طن من الألمنيوم سنويًا، وتعد السعودية من أكبر خمسة منتجين للأسمدة الفوسفاتية، حيث تنتج خام الفوسفات سنويًا بنحو 24.6 مليون طن، ويعالج بعد ذلك لينتج 5.26 ملايين طن من الأسمدة الفوسفاتية سنويًا، إضافةً إلى إنتاج 68 ألف طن سنويًا من مركزات النحاس والزنك، وتعد المناجم الموجودة في السعودية بمنطقة الدرع العربي غنية بالمعادن الأساس والنفيسة، حيث تنتج 409 آلاف أوقية ذهب سنويًا.

# المملكة العربية السعودية: نحو اقتصاد أخضر

يغطي قطاع الألومنيوم شبكة كبيرة ومعقدة من القطاعات والمنتجات التي تندرج ضمن ثلاث سلاسل توريد رئيسة. تشتمل سلسلة التوريد في المرحلة الأولى على تعدين البوكسايت المعدني وتكريره إلى ألومينا، ويتكامل هذان النشاطان ولكن في ظروف معينة كما في المملكة. يمكن أن تكون المصفاة مجاورة لعمليات الصهر إذا كانت تكاليف النفقات التشغيلية أكثر ملائمة، خاصة تلك المرتبطة بالخدمات اللوجستية. تتضمن سلسلة التوريد في المرحلة الوسطى صهر الألومنيوم الأولي والثانوي ثم صب الألومنيوم المصهور في وحدة صب متكاملة تنتج كتلاً أو ألواحاً أو وصلات أو جميعهم معا. يمكن لبعض المصاهر أن تزود الألومنيوم المصهور مباشرة إلى مصانع التجزئة التي تنتج المواد الخام الحبيبية اللازمة لمصنعي مسحوق الألمنيوم، وتذهب الاتجاهات الحديثة إلى المركبات المتخصصة التي تزود المسابك بالألمنيوم المصهور لتقليل تكاليف الطاقة المرتبطة بالحاجة إلى إعادة صهر السبائك الصلبة. يغطي قطاع المصب إنتاج منتجات الألومنيوم شبه المصنعة واستخدامها في عمليات التصنيع اللاحقة في السلسلة، مثل: قطاعات النقل والكهرباء والبناء والتعبئة.




مراحل سلاسل توريد الألمنيوم (المصدر: SIDF, 2020)

# خارطة الطريق لتحقيق رؤية المملكة 2030

في سبتمبر 2015م، وافقت الجمعية العامة للأمم المتحدة على وثيقة بعنوان «تحويل عالمنا: خطة التنمية المستدامة لعام 2030م» بهدف وضع خطة عمل للناس والكوكب والأجيال القادمة، تهدف إلى تعزيز السلام العالمي من خلال الشراكة العالمية. تعرض الأجندة 17 هدفًا من أهداف التنمية المستدامة (SDG) و 169 غاية. واستنادا إلى الأهداف التي حددتها الأهداف الإنمائية للألفية، تم إطلاق أهداف التنمية المستدامة، التي تحتوي على مبادئ توجيهية للعمل بشأن الإدماج الاجتماعي، والاستدامة البيئية، والتنمية الاقتصادية.

استهدفت رؤية المملكة 2030م النهوض بالقطاع التعديني الذي لا تزال مساهمته في الناتج المحلي الإجمالي دون المأمول، إذ لا تتجاوز وفقا لأعلى التقديرات 2.5 %، وأن المكتشف منها لا يتجاوز 50 % مما هو موجود في باطن الأرض. ولذا، في ضوء هذه المقومات، ثمة فرص مستقبلية واعدة لهذا القطاع الذي يمكنه أن يُسهم بصورة كبيرة في تنويع مصادر الدخل، وتعزيز الاقتصاد الوطني؛ فضلاً عن دعم الأهداف المتعلقة بتطوير الصناعة المحلية، من خلال تقديم المواد الخام المحلية الأساسية التي تشكل القاعدة لأي اقتصاد صناعي متقدم.

وعلى ضوء ذلك، سعت وزارة الصناعة والثروة المعدنية إلى العمل على تطوير هذا القطاع من خلال تنفيذ استراتيجية شاملة، محددة الأهداف والسياسات، تتضمن كثير من المبادرات الهادفة إلى إعادة هيكلة القطاع، والعمل على زيادة القيمة المضافة للمعادن، وتنمية المناطق الأقل نموًا، وذلك بهدف: «استثمار ثرواتها المعدنية وتطوير سلاسل القيمة المرتبطة بها لكي تصبح عنصرًا جوهريًا على خريطة التعدين والصناعات التعدينية العالمية»

بحلول عام 2030م، تطمح المملكة أن نرى شركات التعدين تراعي الخصائص الثقافية والاجتماعية والبيئية لموقع التعدين بقدر ما تراعي جوانبه الفنية والاقتصادية. وسيتطلب ذلك منظورًا كاملاً لدورة حياة المشروع يبدأ حتى قبل بداية الاستكشاف، ويعيد صياغة الغرض من مشروع التعدين من ربح المساهمين إلى التنمية المستدامة والمنافع المشتركة لجميع أصحاب المصلحة، بما في ذلك المجتمعات.

بدأت عملية التحول في مجال التعدين والمعادن مع إطلاق الرؤية السعودية 2030م وخصصت التعدين باعتباره الركيزة الثالثة للصناعة السعودية والمحرك الرئيسي للتنويع الاقتصادي في المملكة العربية السعودية. وزارة الصناعة والثروة المعدنية لشؤون التعدين تعمل على أكثر من 38 مبادرة لتحقيق أهداف الرؤية وتعزيز قطاع التعدين لخلق فرص عمل.

يهدف البرنامج الوطني لتطوير الصناعة والخدمات اللوجستية (NIDLP) إلى تحويل المملكة العربية السعودية إلى قوة صناعية رائدة ومركز لوجستي عالمي، من خلال تعظيم قيمة قطاعي التعدين والطاقة مع إطلاق الإمكانات الكاملة للمحتوى المحلي والثورة الصناعية الرابعة (4IR)

يعد برنامج صندوق الاستثمارات العامة (PIF) بمثابة خارطة طريق للنهوض برؤية 2030، حيث يسعى إلى تنمية ثروة المملكة من خلال المساهمة في نمو الناتج المحلي الإجمالي غير النفطي والاستثمار في الفرص عبر القطاعات المتنوعة. وستضمن هذه الاستراتيجية استمرار صندوق الاستثمارات العامة في إقامة شراكات اقتصادية قوية لتعميق تأثيره خارج حدود المملكة.

المملكة العربية السعودية غنية بالموارد المعدنية، بما في ذلك الذهب والنحاس والفوسفات والبوكسيت. تعمل الحكومة على تعزيز قطاع التعدين كجزء من خطة رؤية 2030 لتنويع الاقتصاد بعيدًا عن النفط. ومن المتوقع أن يساهم

قطاع التعدين بمبلغ 240 مليار دولار في الناتج المحلي الإجمالي بحلول عام 2030م. ويجري حاليًا تطوير مشاريع التعدين واسعة النطاق في مختلف مناطق المملكة، ومن المتوقع أن تؤدي هذه التطورات إلى زيادة كبيرة في قدرة المعادن في المملكة.

تهدف خطة الإصلاح الاقتصادي إلى تنويع الاقتصاد بعيدًا عن النفط. يعد قطاع التعدين ركيزة أساسية في خطة رؤية 2030. تعتزم المملكة تكثيف جهودها لجذب رأس مال إضافي بقيمة 176 مليار ريال سعودي إلى صناعة التعدين المربحة وتوسيع مساهمتها في الناتج المحلي الإجمالي إلى ما لا يقل عن 240 مليار ريال سعودي في عام 2030م وخلق أكثر من 219,000 فرصة عمل بحلول عام 2030م. وهذا يمثل فرصًا كبيرة لـ النمو في هذا القطاع.

تقبع المملكة على مساحة واسعة من الموارد المعدنية حيث يمكن أن تتجاوز الموارد الجيولوجية السعودية 1.3 تريليون دولار أمريكي وتم العثور على أكثر من 48 معدنًا، وتنعم المملكة باحتياطيات معدنية قوية لا تزال غير مستكشفة. ويجري الآن تطوير مشاريع التعدين واسعة النطاق في مختلف مناطق المملكة، بما في ذلك مشروع منطقة الذهب العربي الأوسط، وتوسيع منجم الذهب مهد الذهب، ومجمع الفوسفات 3 بالقرب من المدن الصناعية في وعد الشمال (WAS) و رأس الخير. ومن المتوقع أن ترتفع قدرة المعادن والفلزات بشكل كبير نتيجة لهذه التطورات.

وضعت المملكة عددًا من السياسات، بما في ذلك الإعفاءات الضريبية والإجراءات التنظيمية المبسطة، للمساعدة في نمو القطاع. كشفت المملكة مؤخراً عن ست فرص تعدينية جديدة:

- موقع الريدانية بالرياض: تبلغ مساحته أكثر من 78 كيلومترا مربعا، ويوجد به رواسب من خام الزنك والفضة.

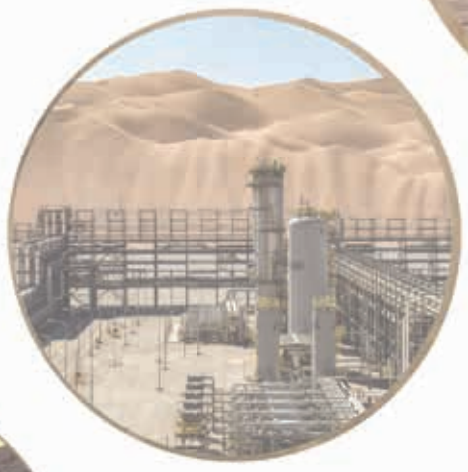
- موقع أم حديد بالرياض: يمتد على مساحة تزيد عن 246 كيلومتراً مربعاً، ويحتوي على رواسب الفضة والرصاص والزنك والنحاس.
- موقع جبل إدساس بالرياض: تبلغ مساحته 121 كيلومتراً مربعاً، ويحتوي على رواسب غنية بخام الحديد.
- بئر عمق بالمدينة المنورة: يمتد الموقع على مساحة 187 كيلومتراً مربعاً، وهو غني بالنحاس والزنك.
- جبل الصحابية في عسير: الموقع الذي تبلغ مساحته 283 كيلومتراً مربعاً يحتوي على رواسب الزنك والرصاص والنحاس والحديد.
- موقع المحداد في عسير: يمتد الموقع على مساحة 139 كيلومتراً مربعاً، ويحتوي على النحاس والزنك والذهب.

وكانت المملكة قد منحت رخصتي استكشاف رئيسيتين العام الماضي. وفي أكتوبر 2022م، حصل التحالف الكندي السعودي المكون من شركتي باريك ومعادن على رخصة استكشاف أم الدمار. وقبل ذلك، في سبتمبر 2022م، تم الإعلان عن فوز التحالف البريطاني السعودي المكون من شركة موكسيكو ريسورسز وشركة عجلان وإخوانه للتعدين التنقيب في الخنيقية.

إن إنشاء شركة منارة للمعادن في عام 2023م والاستثمار الكبير في شركة Vale Base Metals يوضح تصميم المملكة على الريادة في قطاع التعدين. ويتجلى النهج الشامل للحكومة في إطار رؤية 2030، الذي يسهل التركيز على المعادن وتطوير مشاريع المدن الذكية الجديدة مثل نيوم، التي تهدف إلى تحقيق صافي انبعاثات صفرية. وتشمل هذه الإستراتيجية توسيع إنتاج الألمنيوم، وفتح مناجم ذهب جديدة، وتعزيز تجارة الفوسفور. تريد المملكة تأمين الوصول إلى المعادن المهمة مثل النحاس والنيكل والليثيوم وخام الحديد، المستخدمة في المعدات من بطاريات السيارات الكهربائية إلى الألواح الشمسية. وستتم معالجتها بواسطة

مصافٍ ومصاهر جديدة لتغذية شبكة صناعية أوسع في جميع أنحاء المملكة. وفي حين تسيطر الصين على قسم كبير من سلسلة إمداد الطاقة النظيفة الموجودة حاليا، فإن ظهور المملكة من شأنه أن يزيد من صعوبة حصول الولايات المتحدة وأوروبا واليابان على معادن البطاريات التي تريدها. تعمل المملكة العربية السعودية على إقامة شراكات إقليمية تتعلق بالتعدين عبر سلسلة القيمة، من خلال الاستثمارات، والقدرة على المعالجة، والسلع التامة الصنع. وقعت مصر والمملكة اتفاقيتين للتعاون في القطاعات غير النفطية، بما في ذلك صناعة السيارات الكهربائية والتعدين. كذلك وقعت تركيا والمملكة مذكرة تفاهم للتعاون في مجال المعادن الحيوية، بما في ذلك نقل المعرفة والأبحاث حول المعادن الحيوية المستخدمة في الألواح الشمسية والمركبات الكهربائية.

(المصدر: EIU, 2021)



# الفصل السادس

## الطاقة المتجددة Renewable Energy

| | |
|---|---|
| الطاقـــة الشمسيـــة | طاقـــة الريـــاح |
| الطاقـــة الكهرومائيـــة | الطاقـــة الحرارية الأرضية |
| الطاقـــة الحيـويـــة | طاقـــة مـن البحـــار |
| طاقة الهيدروجين الأخضر | الطاقـــة النوويـــة |

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

# الطاقة المتجددة Renewable Energy

## مُقَدِّمَة

فيزيائيًا، الطاقة Energy هي خاصية كمية تنتقل إلى جسم أو إلى نظام فيزيائي، ويمكن التعرف عليها في أداء العمل وفي شكل حرارة وضوء. الطاقة هي كمية محفوظة. ينص قانون حفظ الطاقة على أن الطاقة يمكن أن تتحول في شكل، ولكن لا تستحدث أو تفنى. تقسم الطاقة الكلية إلى طاقة كامنة، أوطاقة حركية، أو مزيج من الاثنين بطرق مختلفة. يتم تحديد الطاقة الحركية من خلال حركة جسم ما أو الحركة المركبة لمكونات الجسم، وتعكس الطاقة الكامنة قدرة الجسم على الحركة، وهي بشكل عام دالة لموضع الجسم داخل مجال أو مجال. يمكن تخزينها في الحقل نفسه. في حين أن هاتين الفئتين كافيتين لوصف جميع أشكال الطاقة، فإنه غالبًا ما يكون من المناسب الإشارة إلى مجموعات معينة من الطاقة الكامنة والطاقة الحركية كشكل خاص بها. على سبيل المثال، يُشار إلى مجموع الطاقة الحركية الانتقالية والدورانية والطاقة الكامنة داخل النظام بالطاقة الميكانيكية، بينما تشير الطاقة النووية إلى الإمكانات المجمعة داخل النواة الذرية إما من القوة النووية أو القوة الضعيفة، من بين أمثلة أخرى.

الطاقة المتجددة Renewable Energy هي الطاقة المستمدة من الموارد المتجددة التي يتم تجديدها بشكل طبيعي على نطاق زمني بشري. تشمل الموارد المتجددة ضوء الشمس والرياح وحركة المياه والحرارة الأرضية. على الرغم من أن معظم مصادر الطاقة المتجددة مستدامة، إلا أن بعضها ليس كذلك. على سبيل المثال، تعتبر بعض مصادر الكتلة الحيوية غير مستدامة بمعدلات الاستغلال الحالية.

وغالباً ما تستخدم الطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء والتدفئة والتبريد. عادة ما تكون مشاريع الطاقة المتجددة واسعة النطاق، ولكنها مناسبة أيضًا للمناطق الريفية والنائية والبلدان النامية، حيث غالبًا ما تكون الطاقة حاسمة في التنمية البشرية.

ومن عام 2011م إلى عام 2021م، نمت الطاقة المتجددة من 20 % إلى 28 % من إمدادات الكهرباء العالمية. وانخفض استخدام الطاقة الأحفورية من 68 % إلى 62 %، والطاقة النووية من 12 % إلى 10 %. وانخفضت حصة الطاقة الكهرومائية من 16 % إلى 15 % بينما زادت حصة الطاقة من الشمس والرياح من 2 % إلى 10 %. وارتفعت الكتلة الحيوية والطاقة الحرارية الأرضية من 2 % إلى 3 %. وهناك 3146 جيجاوات مثبتة في 135 دولة، في حين أن 156 دولة لديها قوانين تنظم قطاع الطاقة المتجددة. وفي عام 2021م، شكلت الصين ما يقرب من نصف الزيادة العالمية في الكهرباء المتجددة.

على الصعيد العالمي، هناك أكثر من 10 ملايين وظيفة مرتبطة بصناعات الطاقة المتجددة، حيث تعد الطاقة الشمسية الكهروضوئية أكبر جهة توظيف متجددة. أصبحت أنظمة الطاقة المتجددة بسرعة أكثر كفاءة وأقل تكلفة، كما أن حصتها من إجمالي استهلاك الطاقة آخذة في التزايد، مع كون الغالبية العظمى من قدرات الكهرباء المثبتة حديثًا في جميع أنحاء العالم متجددة. في معظم البلدان، تعتبر الطاقة الشمسية الكهروضوئية أو طاقة الرياح البرية أرخص أنواع الكهرباء المبنية حديثا.

تمتلك العديد من الدول حول العالم بالفعل طاقة متجددة تساهم بأكثر من 20 % من إجمالي إمداداتها من الطاقة، ويولد بعضها أكثر من نصف احتياجاتها من الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة. تقوم بعض البلدان بتوليد كل احتياجاتها من الكهرباء باستخدام الطاقة المتجددة. من المتوقع أن تستمر أسواق الطاقة

المتجددة الوطنية في النمو بقوة في عشرينيات القرن الحالي وما بعده.

ووفقا لوكالة الطاقة الدولية، لتحقيق صافي انبعاثات صفرية بحلول عام 2050، يجب إنتاج 90 % من توليد الكهرباء العالمي من مصادر متجددة. وقد أظهرت بعض الدراسات أن التحول العالمي إلى الطاقة المتجددة بنسبة 100 % في جميع القطاعات الطاقة والحرارة والنقل والصناعة أمر ممكن ومجدي اقتصاديا. وتنتشر موارد الطاقة المتجددة في مناطق جغرافية واسعة، على عكس الوقود الأحفوري الذي يتركز في عدد محدود من الدول. ويؤدي نشر تكنولوجيات الطاقة المتجددة وكفاءة استخدام الطاقة إلى تحقيق قدر كبير من أمن الطاقة، والتخفيف من آثار تغير المناخ، وتحقيق فوائد اقتصادية.

ومع ذلك، يتم إعاقة مصادر الطاقة المتجددة بمئات المليارات من الدولارات من إعانات الوقود الأحفوري. في استطلاعات الرأي العام الدولية هناك دعم قوي لمصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. في عام 2022م، طلبت وكالة الطاقة الدولية من الدول حل العوائق السياسية والتنظيمية والسماحية والتمويلية التي تحول دون إضافة المزيد من مصادر الطاقة المتجددة، للحصول على فرصة أفضل للوصول إلى صافي انبعاثات الكربون إلى الصفر بحلول عام 2050م.

أولت المملكة أهمية بالغة بالطاقة المتجددة لقناعتها بالدور الأساسي الذي تلعبه في رفع مستوى الطموح المناخي والبيئي وأطلقت مبادرة السعودية الخضراء، كركيزة أساسية لتحقيق طموحات المملكة المناخية، ووسعت جهودها إقليمياً ودولياً، من خلال مبادرة الشرق الأوسط الأخضر، لتحقيق أهداف المناخ العالمية. قامت بمضاعفة قدرات الطاقة المتجددة الحالية بمقدار أربعة أضعاف من 700 ميجاواط إلى 2.8 غيغا واط، وتخطط لإنتاج 20 غيغا واط

إضافيـة بحلـول عـام 2024م».

تناقش الأربعة فصول القادمة جميع أشكال الطاقة المتجددة صديقة البيئة (طاقة الشمس وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية والطاقة الحرارية الأرضية والطاقة الحيوية وطاقة من البحار)، والطاقة الغير متجددة (طاقة النفط والفحم والصخر الزيتي)، بالإضافة إلى الطاقة النووية ومدى تأثير هذه المصادر على الطبيعة اقتصاديًا وبيئيًا والتحديات التي تواجه الاستثمار الأمثل لها. إضافةً لتوسعنا في الجانب الاقتصادي للطاقة من ناحية العرض والطلب والسياسات التي يجب على الحكومات القيام بها تجاه هذا المجال الحيوي. علاوة على ذلك تم تخصيص فصل مستقل عن جهود المملكة في تطوير الطاقة واستدامتها.

# الطاقة الشمسية

الشمس عبارة عن كرة كبيرة من البلازما تتكون أساساً من الهيدروجين (92 %) والهيليوم (8 %) وكميات صغيرة من الذرات أو العناصر الأخرى. البلازما هي المكان الذي يجري فيه فصل الإلكترونات عن النواة لأن درجة الحرارة عالية جدّاً (الطاقة الحركية للنواة والإلكترونات كبيرة). من خلال عملية الاندماج، تتحول البروتونات إلى نوى هيليوم بالإضافة إلى إصدار طاقة. الشمس هي نجم تسلسل رئيسي مستقر يبلغ عمره التقديري $4.5 \times 10^9$ سنوات وستستمر لمدة 4 إلى $5 \times 10^9$ سنوات أخرى قبل بدء المرحلة التالية من التطور، حرق الهيليوم. عند هذه النقطة، ستتوسع الشمس وتصير أكبر من مدار الأرض.

تتكون النوى من نيوكليونات، والتي تكون في شكلين: البروتونات (التي لها شحنة موجبة) والنيوترونات (بدون شحنة). يعتبر تفاعل الجاذبية جذّاباً، لذلك في مركز الشمس، تكون البروتونات قريبة بما يكفي من بعضها لحدوث التفاعل النووي، مع أن البروتونات تتنافر بسبب شحنتها. في حجم النوى ($10^{-15}$ متر)، يكون التفاعل النووي أقوى من تنافر التفاعل الكهرومغناطيسي (EM). تتحول البروتونات إلى نوى هيليوم، ولأن كتلة نواة الهليوم أقل من كتلة البروتونات الأربعة، فإن هذا الاختلاف في الكتلة (نحو $5 \times 10^9$ كغ / ثانية) يتحول إلى طاقة. ومن ثم تُنقل هذه الطاقة إلى سطح الشمس، حيث ينطلق الإشعاع الكهرومغناطيسي وبعض الجزيئات (الرياح الشمسية) إلى الفضاء. تشع هذه الكمية الهائلة من الطاقة في الفضاء من سطح الشمس بقوة $3.8 \times 10^{23}$ كيلو واط. تعترض الأرض جزءاً صغيراً فقط من طاقة الشمس؛ ومع ذلك، لا يزال هذا مقداراً كبيراً.

في الجـزء العلـوي مـن الغـلاف الجـوي، تبلـغ الطاقـة التـي اعترضتهـا الأرض $1.73 \times 10^{14}$ كيلـو واط، أي مـا يعـادل 1.35 كيلـو واط / متـر مربـع. تذكـر أن هـذا السـطح عمـودي (90 درجـة) علـى الشـمس. وإذا كان السـطح بزاويـة مـع الشـمس، فـإن القـدر نفسـه مـن الطاقـة ينتشـر علـى مسـاحة أكبـر. علـى سـطح الأرض في يـوم صـافٍ، يكـون هـذا التشـوه الشمسـي نحـو 1.0 إلـى 1.2 كيلـو واط / متـر مربـع علـى سـطحٍ متعامـد مـع الشـمس مـن 9 إلـى 15 سـاعة، اعتمـاداً علـى كميـة الضبـاب في الغـلاف الجـوي وعلـى الارتفـاع.

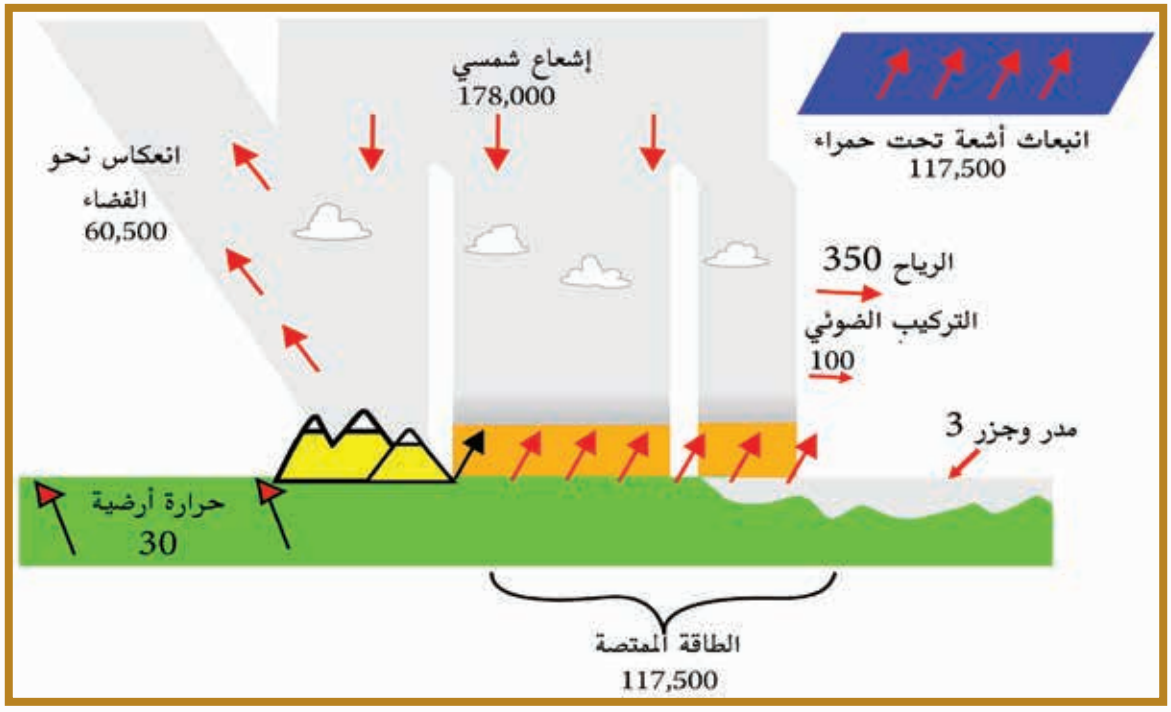
## • تـــوازن طاقـــة الأرض

إن تـوازن طاقـة الأرض هـو في الأسـاس صفـر، باسـتثناء الكميـة الصغيـرة مـن الطاقـة الحراريـة الأرضيـة الناتجـة عـن الاضمحـلال الإشـعاعي. تشـع الأرض كميـة الطاقـة نفسـها في الفضـاء مثـل كميـة الطاقـة الكهرومغناطيسـية المتصـة مـن الشـمس. إذا كانـت الطاقـة في مقابـل الطاقـة الخارجـة غيـر متوازنـة، فسـتزيد درجـة حـرارة الأرض وستشـع المزيـد مـن الطاقـة في الفضـاء لتتـوازن مـرة أخـرى.

تتفاعـل الطاقـة أو الطاقـة الشمسـية (تذكـر إذا كنـت تعـرف أحدهمـا، فأنـت تعـرف الآخـر في أي فتـرة زمنيـة) مـع الغـلاف الجـوي لـلأرض وسـطحه الـذي يشـكل المـاء المكـون الرئيسـي لـه. مـن الإشـعاع الـوارد (100 وحـدة أو 100 %)، تعكس السـحب (31 %) والسـطح (3 %)، والباقـي يمتصـه الغـلاف الجـوي (19 %) والسـطح (47 %). تكـون كميـة الإشـعاع الكهرومغناطيسـي المنبعثـة مـن الشـمس في المقـام الأول في النطـاق المرئـي، ويجـري امتصاصهـا ثـم تحويلهـا بشـكل أساسـي إلـى طاقـة حراريـة، التـي لهـا درجـة حـرارة منخفضـة، نحـو 17 مئويـة، تشـع عنـد أطـوال موجيـة أطـول (الـذروة عنـد $1 \times 10^{-5}$م). هـذه الطاقـة المتصـة تدفـع طقسـنا مـن ناحيـة التبخـر ونقـل الحـرارة مـن خـط الاسـتواء إلـى القطبيـن وتوفـر الطاقـة للريـاح

والأمواج والتيارات في المحيط؛ يجري امتصاص بعضها وتخزينها في النباتات من خلال عملية التمثيل الضوئي.

تنبعث بعض الأشعة تحت الحمراء إلى الفضاء (سماء صافية)، ويمتص الباقي في الغلاف الجوي. من الأشعة تحت الحمراء الممتصة في الغلاف الجوي، يُعاد إشعاع بعضها إلى الفضاء، ويعاد إشعاع الباقي إلى الأرض. الليالي الصافية أبرد من الليالي الملبدة بالغيوم بسبب إشعاع الليل في الفضاء الذي تبلغ درجة حرارته 3 كلفن.




انتقال وامتصاص الإشعاع الكهرومغناطيسي (مقدرة بوحدة الكيلوواط) ومصادر الطاقة الأخرى.

الشمس هي المصدر الأساسي للطاقة على الأرض، وهي مورد نظيف ومتوفر بكثرة في العديد من المناطق. في عام 2019م، وفرت الطاقة الشمسية حوالي 3 % من الكهرباء العالمية، معظمها من خلال الألواح الشمسية القائمة على

الخلايـا الكهروضوئيـة. ومـن المتوقـع أن تكـون الطاقـة الشمسـية الكهروضوئيـة مصـدر الكهربـاء بأكبـر قـدرة مثبتـة في جميـع أنحـاء العالـم بحلـول عـام 2027م.

يتـم تركيـب الألـواح فـوق المبانـي أو تركيبهـا في مجمعـات الطاقـة الشمسـية علـى نطـاق المرافـق. انخفضـت تكاليـف الخلايـا الكهروضوئيـة الشمسـية بسـرعة، ممـا أدى إلـى نمـو قـوي في القـدرة العالميـة. إن تكلفـة الكهربـاء المولـدة مـن مـزارع الطاقـة الشمسـية الجديـدة تنافسـية، أو في كثيـر مـن الأماكـن، أرخـص مـن الكهربـاء المولـدة مـن محطـات الفحـم الحاليـة. تحـدد التوقعـات المختلفـة لاسـتخدام الطاقـة في المسـتقبل الطاقـة الشمسـية الكهروضوئيـة كأحـد المصـادر الرئيسـية لتوليـد الطاقـة في مزيـج مسـتدام. يمكـن إعـادة تدويـر معظـم مكونـات الألـواح الشمسـية بسـهولة، لكـن هـذا لا يتـم دائمًـا في غيـاب التنظيـم. تحتـوي الألـواح عـادةً علـى معـادن ثقيلـة، لـذا فهـي تشـكل مخاطـر بيئيـة إذا تـم وضعهـا في مدافـن النفايـات. يسـتغرق الأمـر أقـل مـن عامـين حتـى تتمكـن الألـواح الشمسـية مـن إنتـاج نفـس القـدر مـن الطاقـة الـذي تـم اسـتخدامه لإنتاجهـا. هنـاك حاجـة إلـى طاقـة أقـل إذا تـم إعـادة تدويـر المـواد بـدلاً مـن اسـتخراجها.

في الطاقـة الشمسـية المركـزة، يتـم تركيـز الأشـعة الشمسـية بواسـطة مجـال مـن المرايـا، ممـا يـؤدي إلـى تسـخين السـائل. يتـم إنتـاج الكهربـاء مـن البخـار النـاتج باسـتخدام محـرك حـراري. يمكـن للطاقـة الشمسـية المركـزة أن تدعـم توليـد الطاقـة القابلـة للتوزيـع، حيـث يتـم عـادةً تخزيـن بعـض الحـرارة لتمكيـن توليـد الكهربـاء عنـد الحاجـة. بالإضافـة إلـى إنتـاج الكهربـاء، يتـم اسـتخدام الطاقـة الشمسـية بشـكل مباشـر أكثـر؛ تُسـتخدم أنظمـة التدفئـة الحراريـة الشمسـية لإنتـاج المـاء السـاخن وتدفئـة المبانـي والتجفيـف وتحليـة الميـاه.

## • التسخين بالطاقة الشمسية

يتكون ضوء الشمس الذي يصل إلى الأرض من حوالي 50 % من الضوء المرئي، و45 % من الأشعة تحت الحمراء، وكميات أقل من الأشعة فوق البنفسجية وغيرها من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي. ويمكن تحويل هذا الإشعاع إلى طاقة حرارية لتسخين الماء أو الهواء في المباني.

هناك نوعان من التسخين الشمسي: السلبي Passive والنشط Active. تعتمد التدفئة السلبية على التصميم المعماري لتدفئة المباني. يمكن الاستفادة من موقع المبنى وبنيته ومواده لتعظيم تأثير التدفئة (والإضاءة) الناتج عن ضوء الشمس الساقط عليه، وبالتالي خفض أو حتى إلغاء متطلباته من الوقود. على سبيل المثال، يمكن للمبنى المعزول جيدًا والذي يحتوي على نافذة زجاجية كبيرة تواجه الجنوب أن يحبس الحرارة بشكل فعال في الأيام المشمسة ويقلل الاعتماد على الغاز أو الزيت (للتدفئة) أو الكهرباء (للإضاءة). يؤدي دخول ضوء الشمس إلى تدفئة الهواء والأسطح الصلبة في تلك الغرف المعرضة لها، وينتقل هذا الدفء إلى غرف أخرى في المبنى عن طريق الحمل الحراري الطبيعي. غالبًا ما يتم دمج التشطيبات الداخلية مثل الطوب أو البلاط في المباني لامتصاص أشعة الشمس وإعادة إشعاع الحرارة ليلاً. في التدفئة النشطة، يتم استخدام الوسائل الميكانيكية لتخزين وجمع وتوزيع الطاقة الشمسية في المباني من أجل توفير الماء الساخن أو تدفئة الفضاء. يتم استخدام نوعين رئيسيين من الأجهزة لالتقاط الطاقة الشمسية وتحويلها إلى طاقة حرارية: المجمعات المسطحة والمجمعات المركزة.

ونظرًا لأن شدة الإشعاع الشمسي على سطح الأرض منخفضة جدًا، فيجب أن يكون كلا النوعين من المجمعات كبيرة المساحة. حتى في الأجزاء المشمسة

من المناطق المعتدلة في العالم، على سبيل المثال، يجب أن تكون مساحة سطح المجمع حوالي 40 مترًا مربعًا (430 قدمًا مربعًا) لجمع ما يكفي من الطاقة لتلبية احتياجات الطاقة لشخص واحد.

تتكون المجمعات ذات الألواح المسطحة الأكثر استخدامًا على نطاق واسع من لوحة معدنية سوداء، مغطاة بطبقة أو لوحتين من الزجاج، يتم تسخينها بواسطة ضوء الشمس الساقط عليها. يسمح الزجاج للضوء المرئي بالسقوط على اللوحة ولكنه يحبس الحرارة الناتجة، والتي يتم نقلها بعد ذلك إلى سائل حامل (عادةً سائل، وهواء أقل شيوعًا) يتدفق عبر الجزء الخلفي من اللوحة. ويمكن استخدام الحرارة مباشرة، أو يمكن نقلها إلى وسيلة أخرى للتخزين. عادةً ما تقوم المجمعات المسطحة بتسخين السوائل الحاملة إلى درجات حرارة تتراوح من 66 إلى 93 درجة مئوية. تتراوح كفاءة هذه المجمعات (أي نسبة الطاقة المتلقاة التي تحولها إلى طاقة قابلة للاستخدام) من 20 إلى 80 %، اعتمادًا على تصميم المجمع. تُستخدم المجمعات المسطحة بشكل شائع لتسخين الماء الساخن وتدفئة المنزل. عادة ما يتم تخزين الحرارة لاستخدامها في الليل أو في الأيام الملبدة بالغيوم باستخدام خزانات معزولة لتخزين المياه الساخنة خلال الفترات المشمسة. يمكن لمثل هذا النظام أن يزود المنزل بالمياه الساخنة المسحوبة من خزان التخزين، أو مع تدفق المياه الدافئة عبر الأنابيب الموجودة في الأرضيات والأسقف، يمكن أن يوفر التدفئة للمساحة. إذا كان السائل الحامل يحتوي على مادة مضادة للتجمد لمنعه من التجمد أثناء الطقس البارد، يتم استخدام مبادل حراري لنقل حرارة السائل الحامل إلى الماء الذي يمكن استخدامه للأغراض المنزلية.

عند الحاجة إلى درجات حرارة أعلى، يتم استخدام مجمع التركيز. تقوم هذه الأجهزة بتركيز ضوء الشمس الوارد من منطقة واسعة على جهاز استقبال

صغير أسود، وبالتالي زيادة شدة الضوء بشكل كبير من أجل إنتاج درجات حرارة عالية. يمكن لمصفوفات المرايا أو العدسات المحاذاة بعناية المستخدمة في هذه الأفران الشمسية المزعومة أن تركز ما يكفي من ضوء الشمس لتسخين الهدف إلى درجات حرارة تصل إلى 2000 درجة مئوية أو أكثر. يمكن استخدام هذه الحرارة لدراسة خواص المواد عند درجات حرارة عالية، أو يمكن استخدامها لتشغيل غلاية، والتي بدورها تولد البخار لمحطة توليد الكهرباء التي تعتمد على التوربينات البخارية. يمكن تحويل الإشعاع الشمسي مباشرة إلى كهرباء بواسطة الخلايا الشمسية (الخلايا الكهروضوئية). في مثل هذه الخلايا، يتم توليد جهد كهربائي صغير عندما يضرب الضوء الوصلة بين المعدن وشبه الموصل (مثل السيليكون) أو الوصلة بين اثنين من أشباه الموصلات المختلفة. وفي الحالة الأخيرة، عندما يصل ضوء الشمس خلية شمسية، يتحرر إلكترون بواسطة التأثير الكهروضوئي. يمتلك شبه الموصلين المختلفين اختلافًا طبيعيًا في الجهد الكهربائي (الجهد)، مما يتسبب في تدفق الإلكترونات عبر الدائرة الخارجية، مما يوفر الطاقة للحمل. ينشأ تدفق الكهرباء من خصائص أشباه الموصلات ويتم تغذيته بالكامل بواسطة الضوء الذي يضرب الخلية.

إنه بالرغم من أن الطاقة الشمسية ذاتها مجانية، فإن التكلفة المرتفعة لجمعها وتحويلها وتخزينها لا تزال تحد من استغلالها. تبلغ كفاءة استخدام الطاقة في معظم الخلايا الكهروضوئية الحالية حوالي 15 إلى 20 % فقط، وبما أن شدة الإشعاع الشمسي منخفضة في البداية، فإن تجميعات الخلايا الضخمة والمكلفة مثل المصفوفات الموجودة في أوليديلا مطلوبة لإنتاج الطاقة الكهربائية على نطاق البلدية. وبالتالي، فإن الخلايا الكهروضوئية التي تعمل على ضوء الشمس أو الضوء الاصطناعي لم تجد حتى الآن استخدامًا تجاريًا كبيرًا إلا

في التطبيقات منخفضة الطاقة كمصادر الطاقة للآلات الحاسبة والساعات، على سبيل المثال. وقد تم استخدام وحدات أكبر لتوفير الطاقة لمضخات المياه وأنظمة الاتصالات في المناطق النائية ولأقمار الطقس والاتصالات.

ومع ذلك، فإن إمكانات الطاقة الشمسية هائلة، حيث تستقبل الأرض حوالي 200 ألف ضعف إجمالي قدرة توليد الكهرباء اليومية في العالم على شكل طاقة شمسية. وفي حين أن إجمالي إنتاج الطاقة الكهروضوئية ضئيل، فمن المرجح أن يزداد مع تقلص موارد الوقود الأحفوري. وفي الواقع، يمكن توفير استهلاك العالم الحالي من الطاقة من خلال تغطية أقل من 1 % من سطح الأرض بالألواح الشمسية. ستكون المتطلبات المادية هائلة ولكنها ممكنة، حيث أن السيليكون هو ثاني أكثر العناصر وفرة في القشرة الأرضية. وقد دفعت هذه العوامل أنصار الطاقة الشمسية إلى تصور «اقتصاد شمسي» Solar Economy في المستقبل، حيث يتم تلبية كافة احتياجات البشرية من الطاقة تقريباً بالاستعانة بأشعة الشمس الرخيصة والنظيفة والمتجددة.

## • الخلايـا والألـواح الشمسيـة

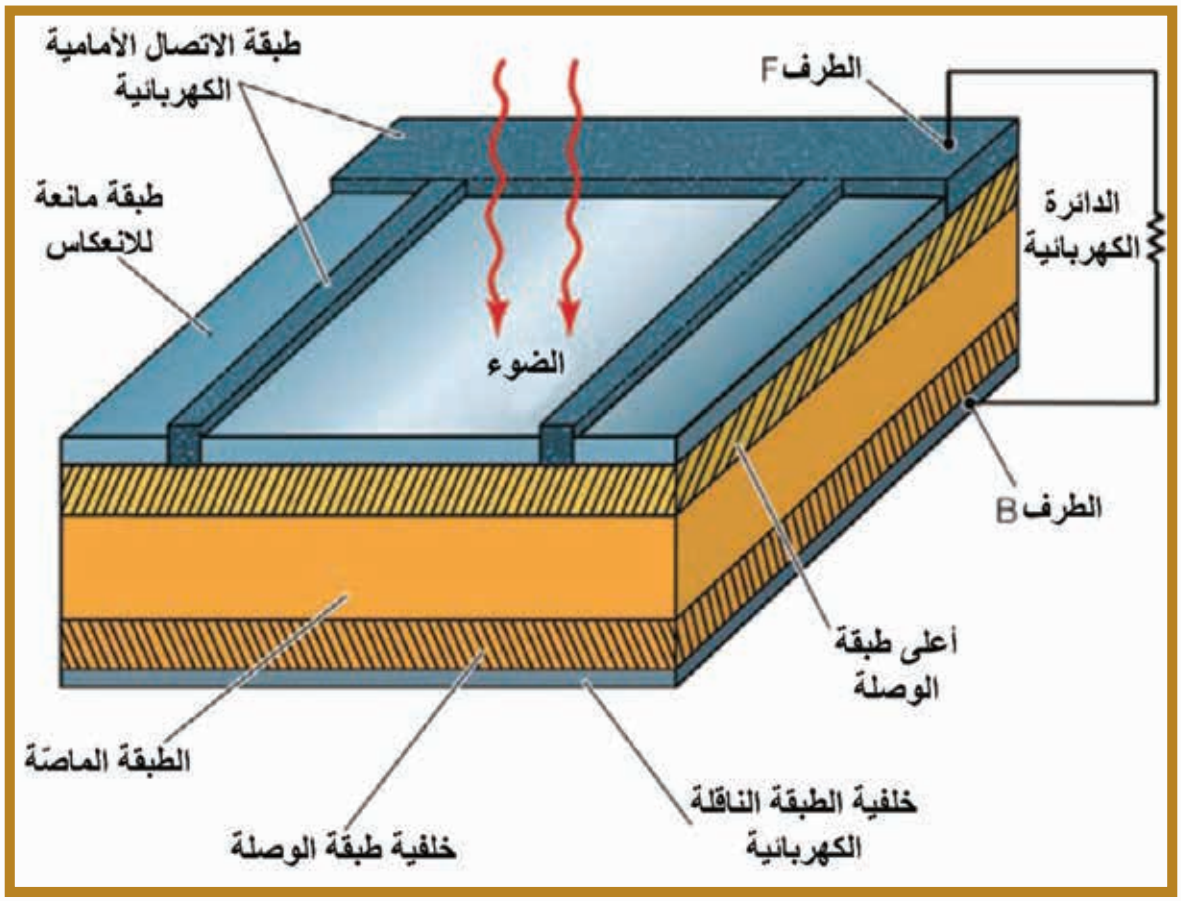
من الناحية الفنية، الخلية الشمسية، أو الخلية الكهروضوئية، هي أي جهاز يقوم بتحويل الطاقة الضوئية مباشرة إلى طاقة كهربائية من خلال التأثير الكهروضوئي. يتم تصنيع الغالبية العظمى من الخلايا الشمسية من السيليكون – مع زيادة الكفاءة وخفض التكلفة حيث تتراوح المواد من السيليكون غير المتبلور (غير البلوري) إلى السيليكون متعدد البلورات إلى السيليكون البلوري (أحادي البلورة). على عكس البطاريات أو خلايا الوقود، لا تستخدم الخلايا الشمسية التفاعلات الكيميائية أو تتطلب الوقود لإنتاج الطاقة الكهربائية. على عكس المولدات الكهربائية، فهي لا تحتوي على أي أجزاء متحركة. عادة ما

تكون الطاقة المولدة بواسطة خلية كهروضوئية واحدة حوالي 2 واط فقط. ومع ذلك، يمكن ترتيب الخلايا الشمسية في مجموعات كبيرة تسمى المصفوفات. يمكن لهذه المصفوفات، المكونة من عدة آلاف من الخلايا الفردية، أن تعمل كمحطات طاقة كهربائية مركزية، حيث تحول ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية لتوزيعها على المستخدمين الصناعيين والتجاريين والسكنيين. ومن خلال ربط أعداد كبيرة من الخلايا الفردية معًا في ألواح شمسية، يمكن توليد مئات الآلاف، أو حتى ملايين، من الطاقة الكهربائية في محطة توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية. تركب الخلايا الشمسية في تكوينات أصغر بكثير، والتي يشار إليها عادة باسم ألواح الخلايا الشمسية أو ببساطة الألواح الشمسية، من قبل أصحاب المنازل على أسطح منازلهم لتحل محل أو زيادة إمداداتهم الكهربائية التقليدية. تُستخدم ألواح الخلايا الشمسية أيضًا لتوفير الطاقة الكهربائية في العديد من المواقع الأرضية النائية حيث تكون مصادر الطاقة الكهربائية التقليدية إما غير متوفرة أو تركيبها باهظ التكلفة.

نظرًا لعدم احتوائها على أجزاء متحركة قد تحتاج إلى صيانة أو وقود قد يتطلب تجديدًا، توفر الخلايا الشمسية الطاقة لمعظم المنشآت الفضائية، بدءًا من أقمار الاتصالات والأحوال الجوية إلى المحطات الفضائية. طبعًا الطاقة الشمسية غير كافية للمسابير الفضائية المرسلة إلى الكواكب الخارجية للنظام الشمسي أو إلى الفضاء بين النجوم، وذلك بسبب انتشار الطاقة الإشعاعية مع المسافة من الشمس. وهناك تطبيق آخر للخلايا الشمسية في المنتجات الاستهلاكية، مثل: الألعاب الإلكترونية، والآلات الحاسبة المحمولة، وأجهزة الراديو المحمولة. قد تستخدم الخلايا الشمسية المستخدمة في الأجهزة من هذا النوع الضوء الاصطناعي (على سبيل المثال، من المصابيح المتوهجة ومصابيح الفلورسنت) وكذلك ضوء الشمس.

## • بنيـــة الخليـــة الشمســـية

سواء تم استخدامها في محطة طاقة مركزية، أو قمر صناعي، أو آلة حاسبة، فإن الخلايا الشمسية لها نفس البنية الأساسية. يدخل الضوء إلى الجهاز من خلال طبقة بصرية، أو طبقة مضادة للانعكاس، تقلل من فقدان الضوء عن طريق الانعكاس، وتحبس الضوء الذي يسقط على الخلية الشمسية بشكل فعال من خلال تعزيز انتقاله إلى طبقات تحويل الطاقة أدناه.




**بنية الخلايا الشمسية شائعة الاستخدام. في العديد من هذه الخلايا، تكون الطبقة الماصة وطبقة الوصلة الخلفية مصنوعتين من المادة نفسها** (Curley, 2012)

طبقات تحويل الطاقة الثلاث الموجودة أسفل الطبقة المضادة للانعكاس هي طبقة الوصلة العليا؛ الطبقة الماصة التي تشكل قلب الجهاز؛ وطبقة الوصلة الخلفية. هناك حاجة إلى طبقتين إضافيتين من طبقات الاتصال الكهربائية لنقل التيار الكهربائي إلى حمل خارجي وإعادته إلى الخلية، وبالتالي إكمال الدائرة الكهربائية. توجد طبقة الاتصال الكهربائية الموجودة على وجه الخلية التي يدخل إليها الضوء بشكل عام في بعض أنماط الشبكة وتتكون من موصل جيد مثل المعدن. وبما أن الكتل المعدنية خفيفة، فإن خطوط الشبكة تكون رفيعة ومتباعدة على نطاق واسع قدر الإمكان دون الإضرار بجمع التيار الذي تنتجه الخلية. لا تحتوي طبقة التلامس الكهربائية الخلفية على مثل هذه القيود المتعارضة تمامًا. إنه يحتاج ببساطة إلى العمل كجهة اتصال كهربائية وبالتالي يغطي السطح الخلفي بأكمله لبنية الخلية. نظرًا لأن الطبقة الخلفية أيضًا يجب أن تكون موصلة للكهرباء بشكل جيد جدًا، فهي دائمًا مصنوعة من المعدن.

وبما أن معظم الطاقة الموجودة في ضوء الشمس والضوء الاصطناعي تقع في النطاق المرئي للإشعاع الكهرومغناطيسي، فيجب أن يكون ممتص الخلايا الشمسية فعالاً في امتصاص الإشعاع عند تلك الأطوال الموجية. تنتمي المواد التي تمتص الإشعاع المرئي بقوة إلى فئة من المواد تعرف باسم أشباه الموصلات؛ تلك التي يبلغ سمكها حوالي مائة من السنتيمتر أو أقل يمكنها امتصاص كل الضوء المرئي الساقط. وبما أن طبقات تشكيل الوصلات والاتصال أرق بكثير، فإن سمك الخلية الشمسية هو في الأساس سمك المادة الماصة. تشمل أمثلة المواد شبه الموصلة المستخدمة في الخلايا الشمسية السيليكون وزرنيخيد الغاليوم وفوسفيد الإنديوم وسيلينيد الإنديوم النحاسي.

عندما يسقط الضوء على خلية شمسية، يتم إثارة الإلكترونات الموجودة في الطبقة الماصة من «الحالة الأرضية» Ground State ذات الطاقة المنخفضة، حيث ترتبط بذرات محددة في المادة الصلبة، إلى «حالة مثارة» Excited State أعلى، حيث يمكنها التحرك من خلال الصلبة. في ظل غياب الطبقات المكونة للوصلات، تكون هذه الإلكترونات «الحرة» في حركة عشوائية، وبالتالي لا يمكن أن يكون هناك تيار مباشر موجه. ومع ذلك، فإن إضافة طبقات تشكيل الوصلات يؤدي إلى توليد مجال كهربائي مدمج ينتج التأثير الكهروضوئي. في الواقع، يعطي المجال الكهربائي حركة جماعية للإلكترونات التي تتدفق عبر طبقات الاتصال الكهربائية إلى دائرة خارجية حيث يمكنها القيام بعمل مفيد.

يجب أن تكون المواد المستخدمة في طبقتي تشكيل الوصلات مختلفة عن مادة الامتصاص من أجل إنتاج المجال الكهربائي المدمج وحمل التيار الكهربائي. وبالتالي، قد تكون هذه أشباه موصلات مختلفة (أو نفس أشباه الموصلات مع أنواع مختلفة من التوصيل)، أو قد تكون فلزًا وأشباه موصلات. المواد المستخدمة لبناء الطبقات المختلفة للخلايا الشمسية هي في الأساس نفس المواد المستخدمة لإنتاج الثنائيات والترانزستورات للإلكترونيات الصلبة والإلكترونيات الدقيقة. تشترك الخلايا الشمسية والأجهزة الإلكترونية الدقيقة في نفس التكنولوجيا الأساسية. ومع ذلك، في تصنيع الخلايا الشمسية، يسعى المرء إلى بناء جهاز واسع المساحة لأن الطاقة المنتجة تتناسب مع المساحة المضيئة. الهدف في الإلكترونيات الدقيقة، بالطبع، هو بناء مكونات إلكترونية ذات أبعاد أصغر من أي وقت مضى من أجل زيادة كثافتها وسرعة تشغيلها داخل رقائق أشباه الموصلات، أو الدوائر المتكاملة.

وبما أنه من الواضح أن الخلايا الشمسية لا تستطيع إنتاج الطاقة الكهربائية في الظلام، فإن جزءًا من الطاقة التي تنتجها تحت الضوء يتم تخزينها، في

العديد من التطبيقات، لاستخدامها عندما لا يكون الضوء متاحًا. إحدى الوسائل الشائعة لتخزين هذه الطاقة الكهربائية هي شحن بطاريات التخزين الكهروكيميائية. هذا التسلسل لتحويل الطاقة في الضوء إلى طاقة الإلكترونات المثارة ومن ثم إلى طاقة كيميائية مخزنة يشبه بشكل لافت للنظر عملية التمثيل الضوئي، وهي العملية التي يتم من خلالها تحويل الطاقة في الضوء إلى طاقة كيميائية في النباتات.

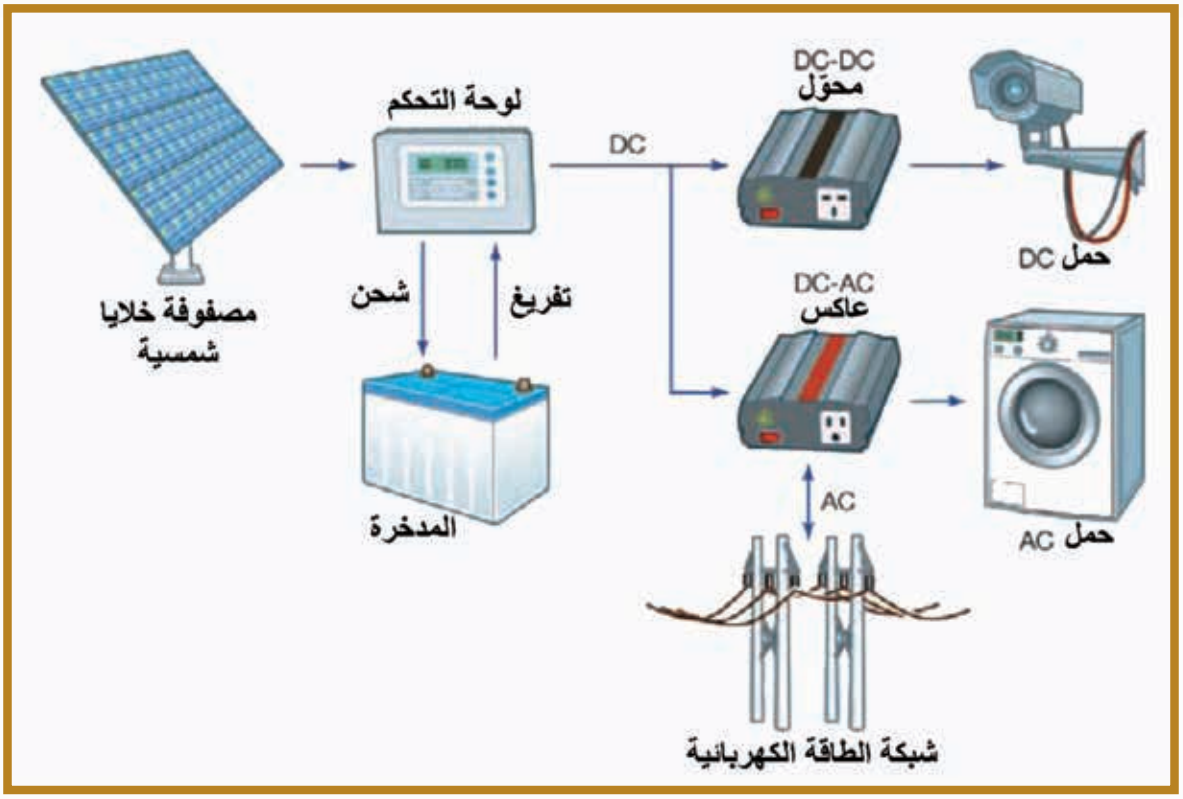
## • تصميم الألواح الشمسية

تبلغ مساحة معظم الخلايا الشمسية بضعة سنتيمترات مربعة، وهي محمية من البيئة بطبقة رقيقة من الزجاج أو البلاستيك الشفاف. نظرًا لأن الخلية الشمسية النموذجية مقاس 10 سم × 10 سم تولد حوالي 2 واط فقط من الطاقة الكهربائية (15 إلى 20 % من طاقة الضوء الساقط على سطحها)، يتم دمج الخلايا عادةً في سلسلة لتعزيز الطاقة الكهربائية. الجهد أو بالتوازي لزيادة التيار. تتكون وحدة الطاقة الشمسية أو الخلايا الكهروضوئية عمومًا من 36 خلية مترابطة مغلفة بالزجاج داخل إطار من الألومنيوم. وفي المقابل، قد يتم توصيل واحدة أو أكثر من هذه الوحدات وتأطيرها معًا لتكوين لوحة شمسية. تعتبر الألواح الشمسية أقل كفاءة قليلاً في تحويل الطاقة لكل مساحة سطحية من الخلايا الفردية بسبب المناطق غير النشطة الحتمية في التجميع والاختلافات في الأداء من خلية إلى أخرى. تم تجهيز الجزء الخلفي من كل لوحة شمسية بمقابس موحدة بحيث يمكن دمج مخرجاتها مع الألواح الشمسية الأخرى لتشكيل مجموعة شمسية.

قد يتكون النظام الكهروضوئي الكامل من العديد من الألواح الشمسية، ونظام طاقة لاستيعاب الأحمال الكهربائية المختلفة، ودائرة خارجية، وبطاريات

تخزيـن. يمكـن تصنيـف الأنظمـة الكهروضوئيـة علـى نطـاق واسـع إمـا كأنظمـة مسـتقلة أو متصلـة بالشـبكة. تحتـوي الأنظمـة المسـتقلة علـى مصفوفـة شمسـية وبنـك مـن البطاريـات يتـم توصيلهـا مباشـرة بدائـرة تطبيـق أو تحميـل. يعـد نظـام البطاريـة ضروريًـا للتعويـض عـن غيـاب أي خـرج كهربائـي مـن الخلايـا ليـلاً أو في الظـروف الملبـدة بالغيـوم، ممـا يزيـد بشـكل كبيـر مـن التكلفـة الإجماليـة. تقـوم كل بطاريـة بتخزيـن كهربـاء التيـار المباشـر (DC) بجهـد ثابـت تحـدده مواصفـات اللوحـة، علـى الرغـم مـن أن متطلبـات الحمـل قـد تختلـف. تُسـتخدم محـولات Converters التيـار المسـتمر إلـى التيـار المسـتمر لتوفيـر مسـتويات الجهـد التـي تتطلبهـا أحمـال التيـار المسـتمر، كمـا توفـر عاكسـات Inverters التيـار المسـتمر إلـى التيـار المتـردد (AC) الطاقـة لأحمـال التيـار المتـردد. تعتبـر الأنظمـة المسـتقلة مناسـبة بشـكل مثالـي للتركيبـات عـن بعـد حيـث يكـون الاتصـال بمحطـة طاقـة مركزيـة باهـظ التكلفـة. وتشـمل الأمثلـة ضـخ الميـاه كمـواد خـام وتوفيـر الطاقـة الكهربائيـة للمنـارات ومحطـات إعـادة الإرسـال للاتصـالات السـلكية واللاسـلكية والنـزل الجبليـة.

تقـوم الأنظمـة المتصلـة بالشـبكة بدمـج المصفوفـات الشمسـية مـع شـبكات كهربـاء المرافـق العامـة بطريقتيـن. تسـتخدم المرافـق أنظمـة أحاديـة الاتجـاه لتكملـة شـبكات الطاقـة أثنـاء ذروة اسـتخدام منتصـف النهـار. يتـم اسـتخدام الأنظمـة ثنائيـة الاتجـاه مـن قبـل الشـركات والأفـراد لتوفيـر بعـض أو كل احتياجاتهـم مـن الطاقـة، مـع إعـادة أي طاقـة زائـدة إلـى شـبكة كهربـاء المرافـق. الميـزة الرئيسـية للأنظمـة المتصلـة بالشـبكة هـي عـدم الحاجـة إلـى بطاريـات تخزيـن. ومـع ذلـك، فـإن التخفيـض المقابـل في تكاليـف رأس المـال والصيانـة يقابلـه التعقيـد المتزايـد للنظـام. هنـاك حاجـة إلـى محـولات ومعـدات حمايـة إضافيـة لربـط مخرجـات التيـار المسـتمر ذات الجهـد المنخفـض مـن المجموعـة الشمسـية بشـبكة طاقـة تيـار متـردد عاليـة الجهـد.




**نظام الخلايا الشمسية المتصل بالشبكة** (Curley, 2012)

بالإضافة إلى ذلك، تعد هياكل الأسعار للقياس العكسي ضرورية عندما تقوم أنظمة الطاقة الشمسية السكنية والصناعية بتغذية الطاقة مرة أخرى إلى شبكة المرافق. إن أبسط عملية نشر للألواح الشمسية تكون على إطار دعم مائل أو حامل يُعرف باسم الحامل الثابت. لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة، يجب أن يكون التركيب الثابت متجهًا نحو الجنوب في نصف الكرة الشمالي أو الشمال في نصف الكرة الجنوبي، ويجب أن تكون زاوية ميله من الأفقي أقل بحوالي 15 درجة من خط العرض المحلي في الصيف و25 درجة أكثر من خط العرض المحلي في شتاء.

تتضمن عمليات النشر الأكثر تعقيدًا أنظمة تتبع تعمل بمحركات تعمل على إعادة توجيه الألواح باستمرار لمتابعة الحركات اليومية والموسمية للشمس. مثل هذه الأنظمة لا يمكن تبريرها إلا لتوليد المرافق على نطاق واسع باستخدام الخلايا الشمسية المركزة عالية الكفاءة ذات العدسات أو المرايا المكافئة التي يمكنها تكثيف الإشعاع الشمسي مائة ضعف أو أكثر.على الرغم من أن ضوء الشمس مجاني، إلا أنه يجب مراعاة تكلفة المواد والمساحة المتاحة عند تصميم النظام الشمسي. وتعني الألواح الشمسية الأقل كفاءة المزيد من الألواح، التي تشغل مساحة أكبر، من أجل إنتاج نفس الكمية من الكهرباء.

إن التنازلات بين تكلفة المواد والكفاءة واضحة بشكل خاص بالنسبة للأنظمة الشمسية الفضائية. يجب أن تكون الألواح المستخدمة في الأقمار الصناعية شديدة القوة، وموثوقة، ومقاومة للأضرار الإشعاعية التي تحدث في الغلاف الجوي العلوي للأرض. وبالإضافة إلى ذلك، فإن تقليل وزن هذه الألواح عند الإقلاع يعد أكثر أهمية من تكاليف التصنيع. هناك عامل آخر في تصميم الألواح الشمسية وهو القدرة على تصنيع الخلايا في شكل «أغشية رقيقة» Thin-film على مجموعة متنوعة من الركائز، مثل الزجاج والسيراميك والبلاستيك، من أجل نشر أكثر مرونة. السيليكون غير المتبلور جذاب للغاية من وجهة النظر هذه.

## • تطوير الخلايا الشمسية

ينبع تطور تكنولوجيا الخلايا الشمسية من أعمال الفيزيائي الفرنسي أنطوان سيزار بيكريل في عام 1839م. اكتشف بيكريل التأثير الكهروضوئي أثناء تجربته مع قطب كهربائي صلب في محلول إلكتروليت. ولاحظ أن الجهد يتطور عندما يسقط الضوء على القطب. وبعد حوالي 50 عامًا، قام تشارلز فريتس

ببناء أول خلايا شمسية حقيقية باستخدام وصلات تم تشكيلها عن طريق طلاء السيلينيوم شبه الموصل بطبقة رقيقة جدًا وشفافة تقريبًا من الذهب. كانت أجهزة فريتس عبارة عن محولات غير فعالة للطاقة، إذ كانت تحول أقل من 1 % من الطاقة الضوئية الممتصة إلى طاقة كهربائية. وعلى الرغم من عدم كفاءتها وفقًا لمعايير اليوم، فقد عززت هذه الخلايا الشمسية المبكرة لدى البعض رؤية الطاقة الوفيرة والنظيفة.

وبحلول عام 1927م، تم اكتشاف خلية شمسية أخرى مصنوعة من أشباه الموصلات المعدنية، وهي في هذه الحالة مصنوعة من النحاس وأكسيد النحاس شبه الموصل. بحلول ثلاثينيات القرن العشرين، تم استخدام كل من خلية السيلينيوم وخلية أكسيد النحاس في الأجهزة الحساسة للضوء، مثل أجهزة قياس الضوء، لاستخدامها في التصوير الفوتوغرافي. ومع ذلك، ظلت هذه الخلايا الشمسية المبكرة تتمتع بكفاءة تحويل الطاقة أقل من 1 %. تم التغلب أخيرًا على هذا المأزق من خلال تطوير خلية السيليكون الشمسية بواسطة راسل أول في عام 1941م.

وبحلول أواخر الثمانينات، تم تصنيع خلايا السيليكون، وكذلك الخلايا المصنوعة من زرنيخيد الغاليوم، بكفاءة تزيد عن 20 %. في عام 1989م، حققت الخلية الشمسية المركزة، التي يتم فيها تركيز ضوء الشمس على سطح الخلية عن طريق العدسات، كفاءة بنسبة 37 % بسبب زيادة كثافة الطاقة المجمعة. ومن خلال ربط خلايا من أشباه الموصلات المختلفة بصريًا وكهربائيًا على التوالي، يمكن تحقيق كفاءات أعلى، ولكن بتكلفة متزايدة وتعقيد إضافي. وبشكل عام، أصبحت الخلايا الشمسية ذات الكفاءة والتكلفة المتفاوتة على نطاق واسع متاحة حاليًا (Curley, 2012).

## • الطاقة الحرارية الشمسية

في محطات الطاقة الحرارية الشمسية، يتم استخدام الإشعاع الشمسي لتوليد الكهرباء فيما يعتبر بخلاف ذلك عملية محطة طاقة تقليدية. تقوم المرايا بتركيز ضوء الشمس على مجمع الإشعاع وتسخين وسط حامل للحرارة، وهو الزيت الحراري عمومًا. ويقوم التوربين بتحويل هذه الطاقة إلى كهرباء. في المناطق الجافة والساخنة التي تحتوي على نسبة عالية من ضوء الشمس المباشر، تعد محطات الطاقة الحرارية الشمسية وسيلة فعالة لتحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء.

وفي الوقت الحاضر، لا تزال تكلفة الكهرباء المولدة من محطات الطاقة الحرارية الشمسية ثلاثة أو أربعة أضعاف تكلفة الكهرباء المولدة من محطات توليد الطاقة بالوقود الأحفوري. مع استمرار السوق في التطور (وفورات الحجم) وإجراء المزيد من أعمال البحث والتطوير الفعالة، قد يكون من الممكن (وفقًا لدراسة أجرتها EASAC في نوفمبر 2011م) تقليل تكاليف توليد الكهرباء بنسبة 50-60 % في الأعوام العشرة المقبلة 15 سنة.

تشمل محطات الطاقة الحرارية الشمسية محطة توليد الطاقة الشمسية بقدرة 354 ميجاوات في الولايات المتحدة الأمريكية، ومحطة سولنوفا للطاقة الشمسية (إسبانيا، 150 ميجاوات)، ومحطة أنداسول للطاقة الشمسية (إسبانيا، 100 ميجاوات)، ومحطة نيفادا سولار وان (الولايات المتحدة الأمريكية، 64 ميجاوات)، وبرج الطاقة الشمسية PS20 (إسبانيا، 20 ميجاوات)، وبرج الطاقة الشمسية PS10 (إسبانيا، 11 ميجاوات).

# تقييم الأثر البيئي للطاقة الشمسية

تعتبر الشمس مصدرًا ضخمًا للطاقة، ولم يتم استغلالها إلا مؤخرًا. فهو يوفر موارد هائلة يمكنها توليد كهرباء نظيفة وغير ملوثة ومستدامة، وبالتالي لا يؤدي إلى انبعاثات الاحتباس الحراري. في السنوات الأخيرة، تم اكتشاف أنه يمكن جمع الطاقة الشمسية وتخزينها لاستخدامها على نطاق عالمي بهدف استبدال مصادر الطاقة التقليدية في نهاية المطاف. مع تحول العالم تركيزه إلى الطاقة النظيفة، شهدت الطاقة الشمسية ارتفاعًا كبيرًا في أهميتها.

وتوفر أنظمة الطاقة الشمسية فوائد بيئية كبيرة مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية، وبالتالي فهي تساهم بشكل كبير في التنمية المستدامة للأنشطة البشرية. ومع ذلك، في بعض الأحيان، يجب أن يواجه النشر الواسع النطاق لهذه الأنظمة آثارًا بيئية سلبية محتملة. قد تكون هذه المشاكل المحتملة عائقًا قويًا أمام مزيد من التقدم لهذه الأنظمة لدى بعض المستهلكين.

يمكن تصنيف التأثيرات البيئية المحتملة المرتبطة بالطاقة الشمسية وفقًا لفئات عديدة، بعضها تأثيرات استخدام الأراضي، وتأثيرات بيئية، وتأثيرات على الماء والهواء والتربة، وتأثيرات أخرى مثل التأثيرات الاجتماعية والاقتصادية، ويمكن أن تختلف بشكل كبير اعتمادًا على البيئة. التكنولوجيا، والتي تشمل فئتين عريضتين: الألواح الشمسية الكهروضوئية (PV) أو محطات الطاقة الشمسية الحرارية المركزة (CSP).

## ♦ استخدام الأراضي والآثار البيئية

فيما يتعلق بتوليد الكهرباء على نطاق المرافق، تتطلب مرافق الطاقة الشمسية مساحات كبيرة لجمع الطاقة. ونتيجة لذلك، قد تتداخل المرافق مع استخدامات الأراضي الحالية ويمكن أن تؤثر على استخدام مناطق مثل المناطق

البرية أو مناطق الإدارة الترفيهية. وبما أن أنظمة الطاقة قد تؤثر على الأرض من خلال استكشاف المواد واستخراجها وتصنيعها والتخلص منها، فإن آثار الطاقة يمكن أن تصبح مرتفعة بشكل متزايد. وبالتالي، يمكن استخدام بعض الأراضي للحصول على الطاقة بطريقة تجعل العودة إلى حالة ما قبل الاضطراب تتطلب مدخلات طاقة كبيرة أو وقتًا كبيرًا، أو كليهما، في حين أن الاستخدامات الأخرى تكون مثيرة للغاية بحيث لا يمكن عكس التغييرات المحدثة.

## ♦ التأثيرات على موارد التربة والمياه والهواء

إن إنشاء منشآت الطاقة الشمسية على مساحات شاسعة من الأراضي يفرض تطهيرًا وتسوية، مما يؤدي إلى ضغط التربة وتغيير قنوات الصرف وزيادة التآكل. تتطلب أنظمة الأبراج المركزية استهلاك المياه للتبريد، وهو ما يشكل مصدر قلق في المناطق القاحلة، حيث أن زيادة الطلب على المياه قد تؤدي إلى إجهاد موارد المياه المتاحة بالإضافة إلى الانسكابات الكيميائية من المرافق التي قد تؤدي إلى تلوث المياه الجوفية أو سطح الأرض. كما هو الحال مع تطوير أي منشأة صناعية واسعة النطاق، فإن بناء محطات الطاقة الشمسية يمكن أن يشكل مخاطر على جودة الهواء. وتشمل هذه التهديدات إطلاق مسببات الأمراض التي تحملها التربة وتؤدي إلى زيادة في جسيمات الهواء التي لها تأثير على تلويث خزانات المياه.

## ♦ المعـــادن الثقيلـــة

ويرى البعض أن أحدث التقنيات التي تم طرحها في السوق، وهي الألواح ذات الأغشية الرقيقة، يتم تصنيعها باستخدام معادن ثقيلة خطيرة، مثل كاديوم تيلورايد. وفي حين أنه من الصحيح أن صناعة الألواح الشمسية تستخدم هذه

المواد الخطرة، إلا أن الفحم والنفط يحتويان أيضًا على نفس المواد، التي تنطلق مع الاحتراق. علاوة على ذلك، تطلق محطات توليد الطاقة بالفحم كميات أكبر بكثير من هذه المواد السامة، مما يؤدي إلى تلويث ما يصل إلى 300 مرة أكثر من الشركات المصنعة للألواح الشمسية.

## ♦ تأثيرات أخرى

إلى جانب التأثيرات البيئية المذكورة أعلاه، قد يكون لمرافق الطاقة الشمسية أيضًا تأثيرات أخرى، مثل التأثير على الحالة الاجتماعية والاقتصادية للمنطقة. إن بناء وتشغيل مرافق الطاقة الشمسية على نطاق المرافق في منطقة ما من شأنه أن يؤدي إلى آثار اقتصادية مباشرة وغير مباشرة.

- ستحدث التأثيرات المباشرة نتيجة للنفقات على الأجور والرواتب وكذلك الحصول على السلع والخدمات اللازمة لبناء المشروع وتشغيله.
- وستحدث التأثيرات غير المباشرة في شكل نفقات شراء أجور المشروعات والرواتب، مما يخلق فرص عمل إضافية ودخلًا وإيرادات ضريبية. وسيتطلب إنشاء المرافق وتشغيلها هجرة العمال، مما يؤثر على الإسكان والخدمات العامة والتوظيف في الحكومة المحلية.

# طاقـــة الريـــــاح

لقد كانت الرياح محركًا مهمًا للتنمية على مدى آلاف السنين، حيث توفر الطاقة الميكانيكية للعمليات الصناعية ومضخات المياه والسفن الشراعية. تُستخدم توربينات الرياح الحديثة لتوليد الكهرباء، ووفرت ما يقرب من 6 % من الكهرباء العالمية في عام 2019م. غالبًا ما تكون الكهرباء المولدة من مزارع الرياح البرية أرخص من محطات الفحم الموجودة، كما أنها قادرة على المنافسة مع الغاز الطبيعي والطاقة النووية. يمكن أيضًا وضع توربينات الرياح بعيدًا عن الشاطئ، حيث تكون الرياح أكثر ثباتًا وأقوى من تلك الموجودة على الأرض، ولكن تكاليف البناء والصيانة أعلى.

إن مزارع الرياح البرية، والتي غالبًا ما يتم بناؤها في المناطق البرية أو الريفية، لها تأثير بصري على المناظر الطبيعية. في حين أن الاصطدامات بتوربينات الرياح تقتل كلا من الخفافيش والطيور بدرجة أقل، فإن هذه التأثيرات أقل من تلك الناجمة عن البنية التحتية الأخرى مثل النوافذ وخطوط النقل. يمكن أن تسبب الضوضاء والضوء الخافت الناتج عن التوربينات إزعاجًا وتقييد أعمال البناء بالقرب من المناطق المكتظة بالسكان. وعلى النقيض من محطات الوقود النووي والأحفوري، فإن طاقة الرياح لا تستهلك الماء. هناك حاجة إلى القليل من الطاقة لبناء توربينات الرياح مقارنة بالطاقة التي تنتجها محطة طاقة الرياح نفسها. شفرات التوربينات ليست قابلة لإعادة التدوير بالكامل، ولا تزال الأبحاث جارية حول طرق تصنيع شفرات أسهل في إعادة التدوير.

## • قوة الرياح

يتم حساب موارد الرياح على أساس متوسط سرعة الرياح وتوزيع قيم سرعة الرياح التي تحدث داخل منطقة معينة. يتم تجميع المناطق في فئات طاقة الرياح التي تتراوح من 1 إلى 7. فئة طاقة الرياح 3 أو أعلى (أي ما يعادل كثافة طاقة الرياح 150–200 واط لكل متر مربع، أو متوسط رياح 5.1–5.6 متر في الثانية) مناسبة لتوليد طاقة الرياح على نطاق المرافق، على الرغم من أنه يمكن العثور على بعض المواقع المناسبة أيضًا في مناطق الفئتين 1 و2.

ففي الفترة من 2004م إلى 2007م، على سبيل المثال، زاد إجمالي طاقة الرياح من 59 إلى 95 جيجاوات في جميع أنحاء العالم. خلال تلك الفترة الزمنية، امتلكت ألمانيا أكبر قدرة مثبتة على طاقة الرياح (16.6 جيجاوات)، وولدت الدنمارك النسبة الأكبر من احتياجاتها من الكهرباء من الرياح (ما يقرب من 20 %). وتشير تقديرات صناعة طاقة الرياح إلى أن العالم قادر عملياً على توليد 12 % من إجمالي احتياجاته من الكهرباء من طاقة الرياح بحلول عام 2020م. وتشير تقديرات مختلفة إلى أن تكلفة طاقة الرياح تتراوح بين 3 إلى 12 سنتاً لكل كيلووات/ساعة، اعتماداً على الموقع. وهذا مشابه لتكلفة الطاقة الأحفورية. (وتقدر تكلفة الكهرباء المولدة بالفحم بنحو 4 إلى 8 سنتات لكل كيلووات/ساعة).

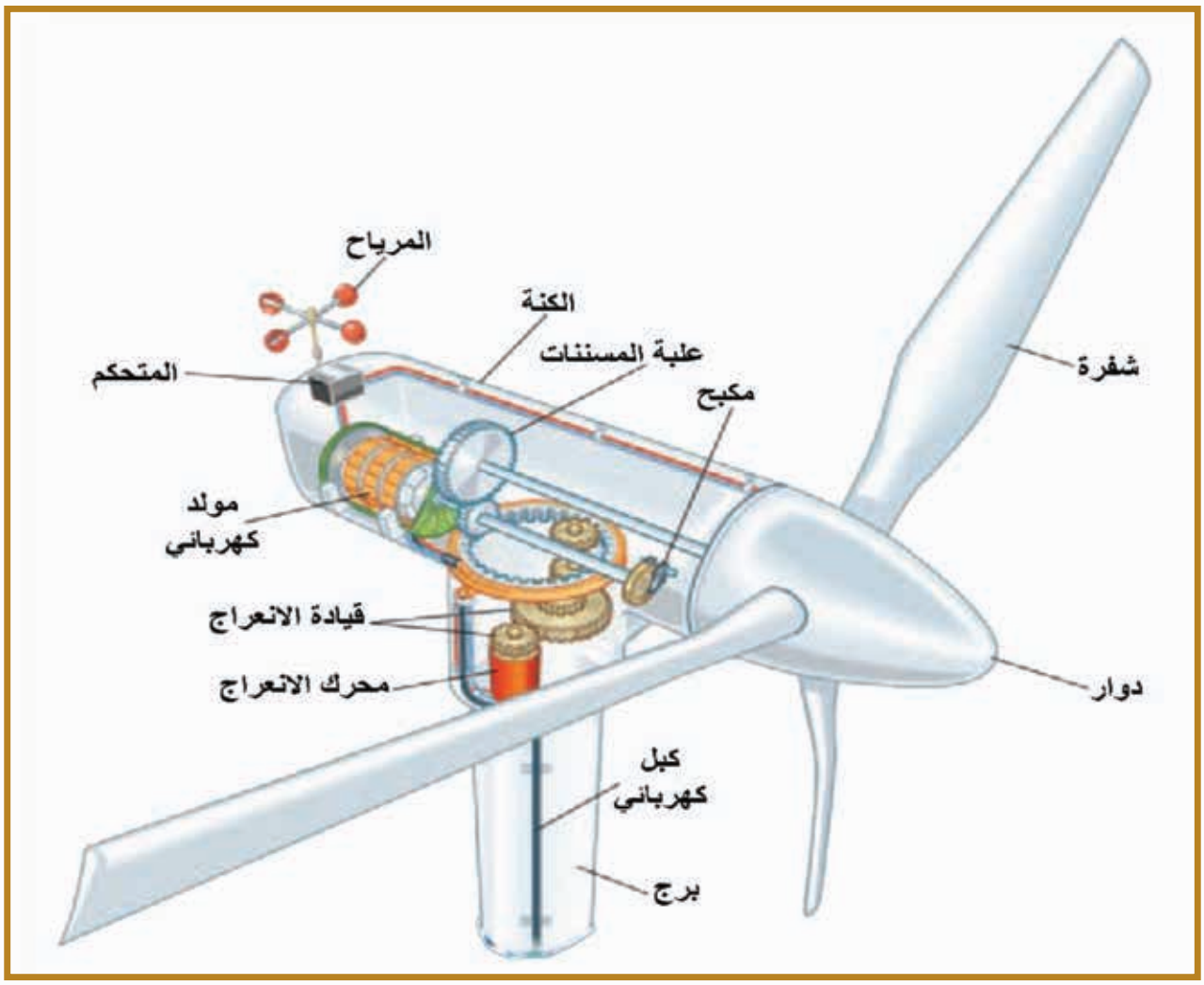
تشمل التحديات التي تواجه تنفيذ طاقة الرياح على نطاق واسع متطلبات تحديد المواقع مثل توافر الرياح، والمخاوف الجمالية والبيئية، وتوافر الأراضي. تعتبر مزارع الرياح أكثر فعالية من حيث التكلفة في المناطق ذات الرياح القوية المستمرة. ومع ذلك، فإن هذه المناطق ليست بالضرورة قريبة من المراكز السكانية الكبيرة. وبالتالي، يجب أن تتمتع خطوط الكهرباء والمكونات الأخرى

لأنظمـة التوزيـع الكهربائيـة بالقـدرة علـى نقـل هـذه الكهربـاء إلـى المسـتهلكين. إضافـة إلـى ذلـك، نظـرًا لأن الريـاح مصـدر طاقـة متقطـع وغيـر متناسـق، فقـد يكـون تخزيـن الطاقـة ضروريًـا.

أثـارت مجموعـات المناصـرة العامـة مخـاوف بشـأن الاضطرابـات المحتملـة التـي قـد تحدثهـا مـزارع الريـاح علـى الحيـاة البريـة والجماليـات بشـكل عـام. علـى سـبيل المثـال، أول مزرعـة ريـاح بحريـة مقترحـة في الولايـات المتحـدة، مشـروع كيـب ويـند الـذي يقـع قبالـة سـاحل كيـب كـود في ماساتشوسـتس، لقـي معارضـة مـن السـكان المهتمـين بالمناظـر الطبيعيـة لمـدة تسـع سـنوات قبـل أن توافـق عليـه الحكومـة الفيدراليـة أخيـرًا في عـام 2010م.بالإضافـة إلـى ذلـك، تم إلقـاء اللـوم علـى مولـدات الريـاح في إصابـة الطيـور وقتلهـا. ومـع ذلـك، فقـد أظهـر الخبـراء أن التوربينـات الحديثـة لهـا تأثيـر ضئيـل علـى أعـداد الطيـور.

## • توربينـــات الريـــاح

تسـتخرج توربينـات الريـاح الحديثـة الطاقـة مـن الريـاح، غالبًـا لتوليـد الكهربـاء، عـن طريـق تدويـر مجموعـة مـن الشـفرات تشـبه المروحـة والتـي تحـرك المولـد عبـر الأعمـدة والتـروس المناسـبة. لا يـزال مصطلـح طاحونـة الهـواء الأقـدم يسـتخدم في كثيـر مـن الأحيـان لوصـف هـذا النـوع مـن الأجهـزة، علـى الرغـم مـن أن توليـد الطاقـة الكهربائيـة بـدلاً مـن الطحـن أصبـح التطبيـق الأساسـي. علـى الرغـم مـن اسـتمرار اسـتخدامها لضـخ الميـاه في المناطـق الريفيـة، إلا أن توربينـات الريـاح اختفـت عمليـا في القـرن العشـرين حيـث وفـر محـرك الاحتـراق الداخلـي والكهربـاء طاقـة أكثـر موثوقيـة وأقـل تكلفـة عـادة.




**مكونات توربينات الرياح** (Curley, 2012)

تجـدد الاهتمـام بتوربينـات الريـاح لتوليـد الكهربـاء بسـبب أزمـة النفـط في منتصـف السـبعينيات. وفي العقـود اللاحقـة، كانـت المخاوف بشـأن البيئة والاحتباس الحـراري هـي التـي أدت إلـى تجـدد الوعـي بتوربينـات الريـاح كمصـدر محتمـل للطاقـة.

## • طواحـــين الهـــواء

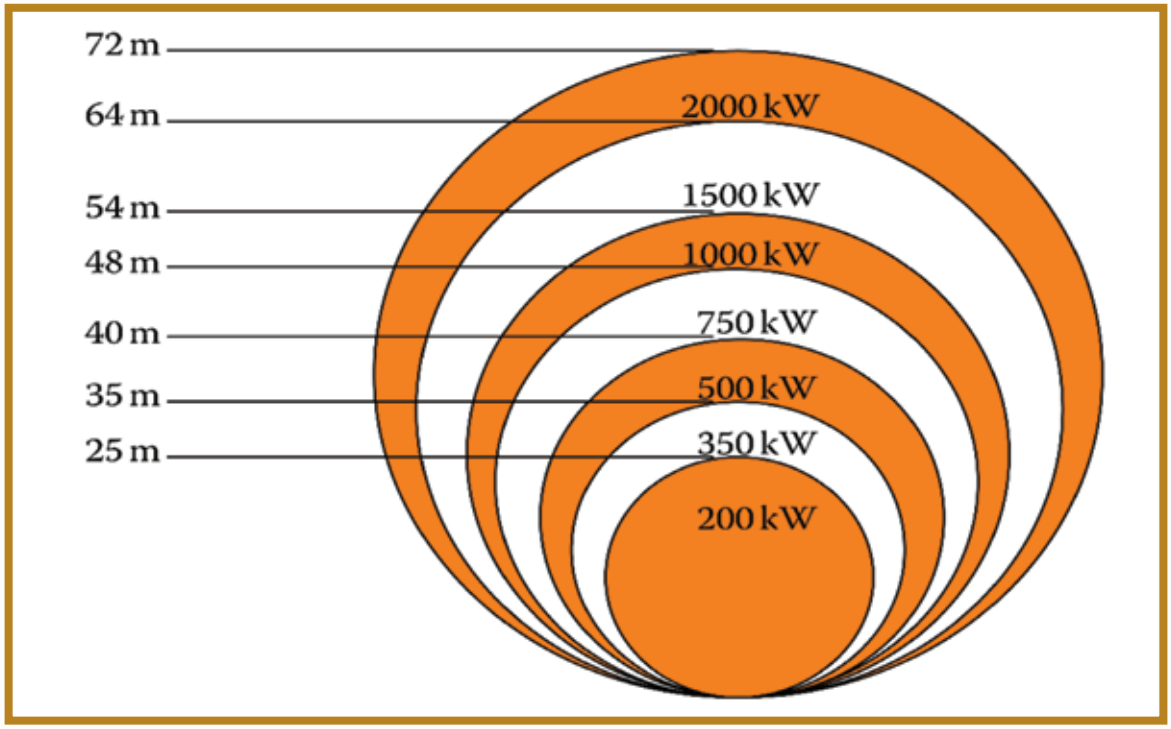
أشـهر الآلات ذات المحـاور الأفقيـة هـي مـا يسـمى طواحـين الهـواء الزراعيـة الأمريكيـة التـي دخلـت حيـز الاسـتخدام علـى نطـاق واسـع خـلال تسـعينيات القـرن التاسـع عشـر. تتكـون هـذه الأجهـزة مـن دوار، والـذي قـد يحتـوي علـى مـا يصـل إلـى 20 شـفرة مسـطحة مـن الصفائـح المعدنيـة وريشـة ذيـل تحافـظ علـى مواجهـة الـدوار للريـاح عـن طريـق تدويـر مجموعـة الـدوار بأكملهـا. يتـم التحكـم تلقائيًـا ويتـم تجنـب السـرعة الزائـدة عـن طريـق تحويـل العجلـة بعيـدًا عـن اتجـاه الريـح، وبالتالـي تقليـل مسـاحة الشـراع الفعالـة مـع الحفـاظ علـى السـرعة ثابتـة.

يمكـن للمضخـة النموذجيـة توصيـل حوالـي 38 لتـرًا في الدقيقـة إلـى ارتفـاع 30 متـرًا بسـرعة ريـاح تبلـغ 6.7 متـرًا في الثانيـة. تحتـوي توربينـات الريـاح الحديثـة المسـتخدمة في توليـد الكهربـاء علـى شـفرات معدنيـة واحـدة إلـى أربـع شـفرات تعمـل بسـرعات أعلـى بكثيـر مـن طواحـين الهـواء. وهـي مكونـة مـن شـفرة أو دوار وحاويـة تسـمى الكنـة Nacelle التـي تحتـوي علـى قطـار قيـادة فـوق بـرج طويـل. يقـوم كل منهمـا بتدويـر مجموعـة الـدوار بالكامـل. يتـم التحكـم تلقائيًـا ويتـم تجنـب السـرعة الزائـدة عـن طريـق تحويـل العجلـة بعيـدًا عـن اتجـاه الريـح، وبالتالـي تقليـل مسـاحة الشـراع الفعالـة مـع الحفـاظ علـى السـرعة ثابتـة. يمكـن للمضخـة النموذجيـة توصيـل حوالـي 38 لتـرًا في الدقيقـة إلـى ارتفـاع 30 متـرًا بسـرعة ريـاح تبلـغ 6.7 متـرًا في الثانيـة.

تحتـوي توربينـات الريـاح الحديثـة المسـتخدمة في توليـد الكهربـاء علـى شـفرات معدنيـة واحـدة إلـى أربـع شـفرات تعمـل بسـرعات أعلـى بكثيـر مـن طواحـين الهـواء. وهـي مكونـة مـن شـفرة أو دوار وحاويـة تسـمى الكنـة التـي تحتـوي علـى قطـار قيـادة فـوق بـرج طويـل. كل شـفرة ملتويـة مثـل مروحـة الطائـرة. يقـوم الحاكـم الأوتوماتيكي

بتدوير الشفرات حول محور الدعم الخاص بها للحفاظ على سرعة ثابتة للمولد. يمكن لطاحونة جاكوبس الهوائية ثلاثية الشفرات، والتي تم استخدامها على نطاق واسع بين عامي 1930م و1960م، أن تنتج حوالي كيلووات واحد من الطاقة بسرعة رياح تبلغ 6.25 متر في الثانية، وهو متوسط سرعة رياح نموذجية في الولايات المتحدة على ارتفاع حوالي 18 مترًا فوق سطح الأرض.

اليوم، يمكن لتوربينات الرياح التجارية الكبيرة النموذجية، التي تنتج ما يصل إلى 2 ميجاوات من الطاقة، أن يصل طول نصلها إلى أكثر من 40 مترًا، ويمكن وضعها على أبراج يبلغ ارتفاعها 80 مترًا. يمكن استخدام توربينات أصغر حجمًا لتوفير الطاقة للمنازل الفردية.




**طاقة انتاج توربينات الرياح من أجل أقطار مختلفة** (Khaligh & Onar, 2010)

## • توربينـــات الريـــاح المحمولـــة جـــوًا

توربينـات الرياح المحمولة جواً Airborne Wind Turbine هـي مفهوم تصميمي لتوربينـات الرياح ذات الدوار المدعم في الهواء بدون برج، وبالتالي الاستفادة من السرعة العالية واستمرارية الرياح على ارتفاعات عالية، مع تجنب تكلفة بناء البرج، أو الحاجة إلى الانزلاق حلقات أو آلية الانعراج. قد يكون المولد الكهربائي على الأرض أو محمولا جوا. وتشمل التحديات تعليق التوربينات وصيانتها بأمان على ارتفاع مئات الأمتار عن الأرض أثناء الرياح العاتية والعواصف، ونقل الطاقة المحصودة و/أو المولدة إلى الأرض، والتدخل في الطيران.

قد تعمل توربينات الرياح المحمولة جواً على ارتفاعات منخفضة أو عالية؛ إنها جزء من فئة أوسع من أنظمة طاقة الرياح المحمولة جواً (AWES) والتي يتم تناولها بواسطة طاقة الرياح على ارتفاعات عالية وطاقة الرياح المتقاطعة. عندما يكون المولد على الأرض، فإن الطائرة المربوطة لا تحتاج إلى حمل كتلة المولد أو أن يكون لها حبل موصل. عندما يكون المولد عاليًا، سيتم استخدام حبل موصل لنقل الطاقة إلى الأرض أو استخدامه عاليًا أو إرساله إلى أجهزة الاستقبال باستخدام الموجات الدقيقة أو الليزر.

تنزل الطائرات الورقية والمروحيات عندما لا تكون هناك رياح كافية؛ الكيتونات والمناطيد قد تحل الأمر بعيوب أخرى. كما أن سوء الأحوال الجوية، مثل البرق أو العواصف الرعدية، قد يؤدي إلى تعليق استخدام الآلات مؤقتًا، وربما يتطلب ذلك إعادتها إلى الأرض وتغطيتها. تتطلب بعض المخططات كابل طاقة طويلًا، وإذا كان التوربين مرتفعًا بدرجة كافية، فيجب منطقة المجال الجوي المحظورة. اعتبارًا من عام 2022م، عدد قليل من توربينات الرياح التجارية المحمولة جواً تعمل بشكل منتظم.

في إحدى الأنواع، يكون المولد عاليًا؛ هيكل ديناميكي هوائي يشبه الطائرة الورقية، مربوط بالأرض، يستخرج طاقة الرياح من خلال دعم توربينات الرياح. في فئة أخرى من الأجهزة، مثل قوة الرياح المتقاطعة للطائرات الورقية، توجد مولدات على الأرض؛ تمارس واحدة أو أكثر من الجنيحات أو الطائرات الورقية قوة على الحبل، والذي يتحول إلى طاقة كهربائية. تتطلب التوربينات المحمولة جواً موصلات في الحبل أو في بعض الأجهزة الأخرى لنقل الطاقة إلى الأرض. يمكن للأنظمة التي تعتمد على الرافعة أن تضع وزن المولد على مستوى الأرض، ولا تحتاج الحبال إلى توصيل الكهرباء (Elliot, 2014).

# تقييـــم الأثـــر البيئي لطاقـــة الريـــاح

تعد توربينات الرياح مصدرًا سريع النمو للطاقة المتجددة التي لديها القدرة على تقليل اعتمادنا على الوقود الأحفوري والمساعدة في التخفيف من تغير المناخ. ومع ذلك، كما هو الحال مع أي مشروع تطوير، فإن تركيب وتشغيل توربينات الرياح يمكن أن يكون له آثار إيجابية وسلبية على البيئة. ومن أجل تقييم هذه التأثيرات وإدارتها، يتم عادةً إجراء تقييم الأثر البيئي (EIA) قبل إنشاء مزرعة الرياح. تقييم الأثر البيئي هو دراسة شاملة تقيم الآثار البيئية المحتملة للمشروع وتحدد طرق تخفيف أو تقليل أي آثار سلبية. تتضمن عملية تقييم الأثر البيئي لتوربينات الرياح جمع المعلومات عن الموقع، وتحليل التأثيرات المحتملة، والتشاور مع أصحاب المصلحة، ووضع تدابير التخفيف. من خلال إجراء تقييم الأثر البيئي، يمكن للمطورين التأكد من تركيب توربينات الرياح وتشغيلها بطريقة مستدامة بيئيا ومسؤولة اجتماعيا. عند النظر في تطبيق التخطيط، ستنظر سلطة التخطيط المحلية في كيفية تأثير المشروع على البيئة المحيطة في المنطقة. وسوف تأخذ في الاعتبار أيضًا وجود أي أنواع أو موائل بارزة في الموقع. وبشكل عام، عادةً ما يكون تقييم الأثر البيئي مطلوبًا عندما يكون لمشروع توربينات الرياح المقترح إمكانية إحداث تأثيرات بيئية أو اجتماعية أو اقتصادية كبيرة. قد تتضمن المعايير المحددة التي تؤدي إلى تقييم الأثر البيئي مجموعة من العوامل. ويشمل ذلك حجم مزرعة الرياح، وموقع وحساسية الموقع، وإمكانية التأثير على الحياة البرية أو الموائل، واحتمال التأثير على المجتمعات المحلية.

يعتمد قرار طلب تقييم الأثر البيئي على اللوائح والمبادئ التوجيهية المحددة للمنطقة، بالإضافة إلى الخصائص المحددة لمشروع توربينات الرياح المقترح. غالبًا ما يكون تقييم الأثر البيئي مطلوبًا بموجب القانون كجزء من عملية الموافقة

على التخطيط وتطوير طاقة الرياح لمشاريع طاقة الرياح. ويجب على المطورين الالتزام بهذه المتطلبات القانونية للحصول على التصاريح والموافقات اللازمة لمشاريعهم. ويسمح تقييم الأثر البيئي للمطورين بتحديد وتقييم الآثار البيئية المحتملة لمشاريع طاقة الرياح الخاصة بهم. ويشمل ذلك التأثيرات على الحياة البرية والموائل والموارد المائية وجودة الهواء والضوضاء وعوامل أخرى. ومن خلال فهم هذه التأثيرات المحتملة، يمكن للمطورين تصميم مشاريعهم بطريقة تقلل من الضرر الذي يلحق بالبيئة وتضمن حصولهم على إذن التخطيط. ومن خلال عملية تقييم الأثر البيئي، يمكن للمطورين الحصول على فهم أفضل للسياق البيئي الذي سيقع فيه مشروع طاقة الرياح الخاص بهم. يمكن لهذا الفهم أن يفيد تخطيط المشروع وقرارات التصميم بشكل أفضل والتي تأخذ في الاعتبار الاعتبارات البيئية لموقع المشروع. بالنسبة لمشاريع طاقة الرياح البرية في إنجلترا وويلز واسكتلندا، تكون هيئة التخطيط المحلية مسؤولة عادةً عن طلب عملية التقييم البيئي والإشراف عليها. يجب على المطور تقديم تقرير تقييم الأثر البيئي (EIA) كجزء من عملية تقديم طلب التخطيط. ويتم بعد ذلك مراجعة ذلك من قبل هيئة التخطيط والهيئات الأخرى ذات الصلة. بالنسبة لتطوير طاقة الرياح البحرية، تتولى وزارة الأعمال والطاقة والاستراتيجية الصناعية (BEIS) التابعة لحكومة المملكة المتحدة مسؤولية الإشراف على عملية التقييم البيئي.

يجب على المطور تقديم بيان بيئي (ES) كجزء من عملية التقديم للحصول على أمر الموافقة على التطوير (DCO). وهذا مطلوب لجميع مزارع الرياح البحرية في المملكة المتحدة. تتم بعد ذلك مراجعة النظام البيئي من قبل BEIS والهيئات الأخرى ذات الصلة، مثل منظمة الإدارة البحرية واللجنة المشتركة للحفاظ على الطبيعة. وفي جميع الأحوال، فإن الغرض من تقييم الأثر البيئي هو تقييم الآثار البيئية المحتملة لمشروع طاقة الرياح وتحديد التدابير اللازمة للتخفيف أو التقليل من هذه الآثار.

# الطاقـــة الكهرومائيـــة

تقوم محطات الطاقة الكهرومائية بتحويل الطاقة الناتجة عن تحريك المياه إلى كهرباء. في عام 2020م، وفّرت الطاقة الكهرومائية 17 % من الكهرباء في العالم، بانخفاض عن مستوى مرتفع بلغ حوالي 20 % في منتصف وأواخر القرن العشرين. في الطاقة الكهرومائية التقليدية، يتم إنشاء خزان خلف السد. توفر محطات الطاقة الكهرومائية التقليدية إمدادات كهرباء عالية المرونة وقابلة للتوزيع. ويمكن دمجها مع طاقة الرياح والطاقة الشمسية لتلبية فترات الذروة في الطلب والتعويض عندما تكون الرياح والشمس أقل توافرا.

## • توليـــد الطاقـــة الكهرومائيـــة

لتوليد الطاقة الكهرومائية، يتم جمع المياه أو تخزينها على ارتفاع أعلى وتوجيهها إلى الأسفل من خلال أنابيب أو أنفاق كبيرة (Penstocks) إلى ارتفاع أقل؛ ويعرف الفرق في هذين الارتفاعين بالرأس. وفي نهاية مرورها أسفل الأنابيب، يتسبب الماء المتساقط في دوران التوربينات. وتقوم التوربينات بدورها بتشغيل المولدات التي تحول الطاقة الميكانيكية للتوربينات إلى كهرباء. تقوم التوربينات بدورها بتشغيل المولدات التي تحول الطاقة الميكانيكية للتوربينات إلى كهرباء. يتم بعد ذلك استخدام المحولات لتحويل الجهد المتردد المناسب للمولدات إلى جهد أعلى مناسب للنقل لمسافات طويلة. يُطلق على الهيكل الذي يضم التوربينات والمولدات، والذي تتغذى منه الأنابيب أو الأعمدة، اسم محطة الطاقة Powerhouse.

عادة ما تقع محطات الطاقة الكهرومائية في السدود التي تحتجز الأنهار، مما يؤدي إلى رفع مستوى المياه خلف السد وخلق أعلى مستوى ممكن. تتناسب الطاقة المحتملة التي يمكن استخلاصها من حجم من الماء بشكل مباشر مع

رأس العمل، بحيث تتطلب التركيبات ذات الرأس المرتفع حجمًا أصغر من الماء من التركيبات ذات الرأس المنخفض لإنتاج كمية مساوية من الطاقة.

في بعض السدود، يتم إنشاء محطة توليد الطاقة على أحد جوانب السد، ويستخدم جزء من السد كمصرف لتصريف المياه الزائدة في أوقات الفيضان. عندما يتدفق النهر في ممر ضيق شديد الانحدار، قد تكون محطة الطاقة موجودة داخل السد نفسه. في معظم المجتمعات، يختلف الطلب على الطاقة الكهربائية بشكل كبير في أوقات مختلفة من اليوم. ومن أجل تخفيف الحمل على المولدات، يتم أحيانًا بناء محطات توليد الطاقة الكهرومائية للتخزين والضخ. خلال فترات خارج الذروة، يتم توفير بعض الطاقة الإضافية المتاحة للمولد الذي يعمل كمحرك، مما يدفع التوربين لضخ المياه إلى خزان مرتفع. وبعد ذلك، خلال فترات ذروة الطلب، يُسمح للمياه بالتدفق مرة أخرى عبر التوربين لتوليد الطاقة الكهربائية. تتميز أنظمة التخزين التي يتم ضخها بالكفاءة وتوفر طريقة اقتصادية لتلبية أحمال الذروة. تعتبر المياه المتساقطة أحد المصادر التقليدية الثلاثة الرئيسية للطاقة المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية، والمصدران الآخران هما الوقود الأحفوري والوقود النووي. تتمتع الطاقة الكهرومائية بمزايا معينة مقارنة بهذه المصادر الأخرى: فهي متجددة باستمرار بسبب الطبيعة المتكررة للدورة الهيدرولوجية ولا تنتج أي تلوث جوي أو حراري. تعد الطاقة الكهرومائية مصدرًا مفضلاً للطاقة في المناطق ذات الأمطار الغزيرة والمناطق الجبلية أو الجبلية التي تقع على مقربة معقولة من مراكز التحميل الرئيسية. قد تكون بعض المواقع المائية الكبيرة البعيدة عن مراكز التحميل جذابة بدرجة كافية لتبرير خطوط النقل الطويلة ذات الجهد العالي. قد تكون المواقع المائية المحلية الصغيرة أيضًا اقتصادية، خاصة إذا كانت تجمع بين تخزين المياه أثناء الأحمال الخفيفة وإنتاج الكهرباء خلال فترات الذروة.

## • النواعير المائية

كانت النواعير المائية Waterwheels من أقدم الآلات التي سخّرت قوة الماء. تم استخدامها لأول مرة لطحن الحبوب، ثم تم اعتمادها لاحقًا لتشغيل المناشر والمضخات، ولتوفير عمل المنفاخ للأفران والمصايد، ولقيادة المطارق المائلة أو مطارق التعثر لتزوير الحديد، ولتوفير الطاقة الميكانيكية المباشرة لمصانع النسيج. حتى تطور الطاقة البخارية خلال الثورة الصناعية في نهاية القرن الثامن عشر، كانت النواعير المائية هي الوسيلة الأساسية لإنتاج الطاقة الميكانيكية، ولا تنافسها طواحين الهواء إلا في بعض الأحيان. وهكذا، نشأت العديد من المدن الصناعية، وخاصة في أوائل أمريكا، في مواقع يمكن ضمان تدفق المياه فيها طوال العام. تعود أقدم إشارة إلى طاحونة مائية إلى حوالي 85 قبل الميلاد، حيث ظهرت في قصيدة كتبها كاتب يوناني مبكر يحتفل بتحرير الشابات اللاواتي كن يشغلن المحاجر (الطواحين اليدوية البدائية) لطحن الذرة من الكدح. وفقًا للجغرافي اليوناني سترابو، استخدم الملك ميثرادتس السادس ملك بونتوس في آسيا آلة هيدروليكية، يُفترض أنها طاحونة مائية، بحلول عام 65 قبل الميلاد تقريبًا. قامت طواحين المياه ذات العمود الرأسي المبكرة بقيادة المحاجر حيث يمكن إنزال العجلة، التي تحتوي على دوارات أو مجاذيف شعاعية وتدور في مستوى أفقي، في التيار. تم توصيل العمود الرأسي من خلال ثقب في حجر الرحى الثابت بالحجر العلوي أو الدوار. انتشر الجهاز بسرعة من اليونان إلى أجزاء أخرى من العالم، لأنه كان سهل البناء والصيانة ويمكن أن يعمل في أي تيار سريع التدفق.

أقدم إشارة مسجلة لطواحين المد والجزر موجودة عند العرب تعود للقرن التاسع للميلاد، حيث كان أهل العراق يستفيدون من نقطة التقاء نهري الفرات ودجلة عند شط العرب منها. كما عُثر على أقدم إشارة مسجلة لطواحين

المد والجزر عند الأوربيين في كتاب يوم القيامة (عام 1086م)، والذي يسجل أيضًا أكثر من 5000 طاحونة مياه في إنجلترا جنوب نهري سيفيرن وترينت. كما تم بناء طواحين المد والجزر على طول ساحل المحيط الأطلسي في أوروبا وبعد قرون على الساحل الشرقي للولايات المتحدة وفي غيانا، حيث تم تشغيل طواحين قصب السكر. نُشر أول تحليل لأداء النواعير في عام 1759 على يد جون سميتون، وهو مهندس إنجليزي. بنى سميتون جهاز اختبار بعجلة صغيرة (كان قطرها 0.61 متر فقط) لقياس تأثيرات سرعة الماء، بالإضافة إلى سرعة الرأس والعجلة. ووجد أن أقصى قدر من الكفاءة (الشغل الناتج مقسومًا على الطاقة الكامنة في الماء) الذي يمكنه الحصول عليه كان 22 % للعجلة السفلية و63 % للعجلة الزائدة (أي العجلة التي يدخل فيها الماء إلى العجلة فوق مركزها).

في أوائل القرن التاسع عشر، صمم جان فيكتور بونسيليه، عالم الرياضيات والمهندس الفرنسي، مجاذيف منحنية للعجلات السفلية للسماح بدخول الماء بسلاسة. اعتمد تصميمه على فكرة أن الماء سوف يتدفق على سطح الدوارات المنحنية، ويستقر عند القطر الداخلي، ثم يتساقط بدون سرعة تقريبًا. أدى هذا التصميم إلى زيادة كفاءة العجلات السفلية إلى 65 %. في نفس الوقت تقريبًا، أظهر ويليام فيربيرن، وهو مهندس أسكتلندي، أن العجلات الصدرية (أي تلك التي يدخل فيها الماء عند موضع الساعة العاشرة أو الثانية) كانت أكثر كفاءة من العجلات الزائدة وأقل عرضة للأضرار الناجمة عن الفيضانات. استخدم الدلاء المنحنية ووفر جدارًا حجريًا ملائمًا لمنع تدفق المياه إلى الخارج. في عام 1828، قدمت فيربيرن دلاء مهواة حيث تسمح الفجوات الموجودة في أسفل كل دلو للهواء المحبوس بالهروب. وشملت التحسينات الأخرى حاكمًا للتحكم في بوابات السد وتحفيز عملية إقلاع الطاقة.

خـلال القـرن التاسـع عشـر، حلـت التوربينـات المائيـة محـل النواعيـر ببـطء. وكانـت التوربينـات المائيـة أكثـر كفـاءة؛ أتاحـت تحسـينات التصميـم في النهايـة تنظيم سـرعة التوربينـات وتشـغيلها بسـرعة كافيـة لتشـغيل المولـدات الكهربائيـة. علـى الرغـم مـن هـذه الحقيقـة، تراجعـت النواعيـر ببـطء، ولـم تصبـح متقادمـة إلـى حـد كبيـر إلا في أوائـل القـرن العشـرين. ومـع ذلـك، حتـى اليـوم لا تـزال بعـض النواعيـر حيـة. مـن المؤكـد أن هـذه النواعيـر المائيـة الحديثـة، المجهـزة بمحامـل مغمـورة، أكثـر تطـوراً مـن سـابقاتها، علـى الرغـم مـن أنهـا تشـبهها بشـكل ملحـوظ.

## • التوربينـــات المائيـــة

التوربينـات المائيـة Water Turbine هـي الخلفـاء الحديثـون للنواعيـر المائيـة البسـيطة. تسـتخدم التوربينـات المائيـة الطاقـة الكامنـة الناتجـة عـن الفـرق في الارتفـاع بـين خـزان الميـاه عنـد المنبـع ومسـتوى المـاء عنـد مخـرج التوربـين (المجـرى الخلفـي) لتحويـل هـذا مـا يسـمى بالـرأس إلـى عمـل. اليـوم، يتـم اسـتخدام معظـم توربينـات الميـاه لتوليـد الكهربـاء في المنشـآت الكهرومائيـة. تنقسـم توربينـات الميـاه بشـكل عـام إلـى فئتـين: (1) توربينـات نبضيـة تسـتخدم لـرؤوس الميـاه العاليـة ومعـدلات التدفـق المنخفضـة و (2) توربينـات التفاعـل المسـتخدمة عـادة للـرؤوس التـي يقـل ارتفاعهـا عـن 450 متـرًا تقريبًـا ومعـدلات تدفـق معتدلـة أو عاليـة.

تشـتمل هاتـان الفئتـان علـى الأنـواع الرئيسـية شـائعة الاسـتخدام، وهـي توربينـات بيلتـون الدافعـة وتوربينـات التفاعـل مـن مجموعـة فرانسـيس والمروحـة وكابـلان وديـراز. يمكـن ترتيـب التوربينـات إمـا بأعمـدة أفقيـة أو رأسـية، وهـي الأكثـر شـيوعًا. مـن الممكـن وجـود اختلافـات واسـعة في التصميـم داخـل كل نـوع لتلبيـة الظـروف الهيدروليكيـة المحليـة المحـددة.

## • اختيار التوربينات على أساس السرعة المحددة

يعتمد الاختيار الأولي للتوربين عادةً على نسبة متغيرات التصميم المعروفة باسم السرعة المحددة للطاقة. في ممارسة التصميم في الولايات المتحدة يتم تقديم ذلك بواسطة الصيغة الرياضياتية:

$$N = \frac{np^{1/2}}{H^{5/4}}$$

حيث n هو عدد الدورات في الدقيقة، P هو الناتج بالحصان، و H هو رأس الماء بالقدم. يمكن تصنيف أنواع التوربينات حسب سرعتها المحددة، N، والتي تنطبق دائمًا عند نقطة الكفاءة القصوى.

إذا كان N يتراوح من 1 إلى 20، وهو ما يتوافق مع الرؤوس العالية وسرعات الدوران المنخفضة، فإن التوربينات الدافعة تكون مناسبة. بالنسبة لـ N بين 10 و90، يجب اختيار مجاري من نوع فرانسيس، مع وحدات بطيئة التشغيل وقريبة من الشعاع لقيم N المنخفضة ومجاري تدفق مختلط تدور بسرعة أكبر للحصول على قيم N أعلى. بالنسبة لـ N حتى 110، قد تكون توربينات Deriaz مناسبة. إذا كان N يتراوح من 70 إلى الحد الأقصى 260، فسيتم استدعاء توربينات المروحة أو كابلان.

باستخدام صيغة السرعة المحددة، فإن التوربين المصمم لتوصيل (74.6 ميجاوات) برأس (12.2 مترًا) يعمل بسرعة 72 دورة في الدقيقة سيكون له سرعة محددة تبلغ 226، مما يشير إلى وجود مروحة أو توربين كابلان. كما يمكن إثبات أن معدل التدفق يجب أن يكون حوالي (694 متر مكعب في الثانية) بكفاءة توربينية تبلغ 90 %. سيكون قطر العداء حوالي (10 متر).

يوضـح هـذا الأحجـام الكبيـرة المطلوبـة للتركيبـات عاليـة الطاقـة ومنخفضـة الـرأس وسـرعة الـدوران المنخفضـة التـي يجـب أن تعمـل بهـا هـذه التوربينـات للبقـاء ضمـن نطـاق السـرعة المحـدد المسـموح بـه.

## • اختبار نموذج التوربينات

قبـل بنـاء المنشـآت واسـعة النطـاق، يجـب فحـص التصميـم مـن خـلال اختبـارات نماذج التوربينات، باسـتخدام نماذج متشـابهة هندسـيًا ذات حجم صغير ومتوسـط، وجميعهـا تعمـل بنفـس السـرعة المحـددة. يجـب مراعـاة تأثيـرات الاحتـكاك، التـي يحددهـا رقـم رينولـدز (الكثافـة × سـرعة الـدوران × مربـع قطـر العداء/اللزوجـة) وللتغيـرات المحتملـة في أبعـاد الخشـونة والخلـوص. تعتبـر تأثيـرات الاحتـكاك أقـل أهميـة بالنسـبة للوحـدات الكبيـرة، والتـي تميـل إلـى أن تكـون أكثـر كفـاءة مـن الوحـدات الصغيـرة. (Curley, 2012)

# تقييم الأثر البيئي للطاقة الكهرومائية

لقد أحدثت مشاريع الطاقة الكهرومائية موجات كبيرة في قطاع الطاقة، حيث قدمت بديلاً مستدامًا وصديقًا للبيئة لمصادر الطاقة التقليدية. هذا هو السبب وراء قوة الطاقة الكهرومائية:

- الطاقة المتجددة: تعتمد الطاقة الكهرومائية على دورة المياه الدائمة، حيث يستمر تدفق المياه في الأنهار والجداول وحتى في المحيطات. مع وفرة المياه على كوكبنا، لدينا مصدر ثابت ومتجدد للطاقة في متناول أيدينا.
- انبعاثات منخفضة: تولد الطاقة الكهرومائية الكهرباء دون حرق الوقود الأحفوري، مما يعني أن لها بصمة كربونية أقل بكثير مقارنة بالمحطات التي تعمل بالفحم أو الغاز الطبيعي. إن الانبعاثات الأقل تعني كوكبًا أكثر سعادة.
- تخزين الطاقة: يمكن لمحطات الطاقة الكهرومائية أن تعمل كأنظمة تخزين للطاقة من خلال تنظيم تدفق المياه. خلال أوقات الذروة، يمكن استخدام الكهرباء الزائدة لضخ المياه إلى ارتفاعات أعلى، وتكون جاهزة للصرف خلال فترات ذروة الطلب. تحدث عن الإدارة الذكية للطاقة!
- السيطرة على الفيضانات: توفر السدود الكهرومائية حلاً عمليًا للسيطرة على الفيضانات، ومنع الكوارث المحتملة وحماية المجتمعات من الآثار المدمرة للفيضانات.

## ◆ الاعتبارات البيئية في تطورات مشاريع الطاقة الكهرومائية

في حين أن مشاريع الطاقة الكهرومائية توفر العديد من المزايا، فمن المهم التعامل بحذر عندما يتعلق الأمر بتأثيراتها البيئية.

### ■ النظم البيئية المائية وحماية الحياة البرية للأسماك

يمكن لمشاريع الطاقة الكهرومائية أن تعطل النظم البيئية المائية وتعطل طرق هجرة الأسماك بسبب بناء السدود. ومع ذلك، فإن أنظمة مرور الأسماك المبتكرة مثل سلالم الأسماك أو مصاعد الأسماك تهدف إلى تقليل هذه التأثيرات، مما يضمن استدامة أعداد الأسماك.

### ■ النشاط الزلزالي الناجم عن الخزان

يمكن أن يؤدي إنشاء خزانات كبيرة إلى حدوث نشاط زلزالي بسبب الوزن الإضافي وضغط الماء. يساعد دمج أنظمة مراقبة الزلازل المتقدمة مع التحليل في الوقت الفعلي في اكتشاف أي تحركات أرضية غير طبيعية وتقليل المخاطر المرتبطة بالزلزال الناجم عن الخزان.

### ■ فقدان الموائل واستخدام الأراضي

يمكن أن يؤدي بناء السدود إلى فقدان الموائل الأرضية وتهجير الحياة البرية المحلية. ومع ذلك، فإن جهود التخطيط والترميم الدقيقة يمكن أن تخفف من هذه الآثار، مما يسمح للبيئة بالتعافي والازدهار.

### ■ توافر المياه وتأثيراتها على المصب

تعتمد الطاقة الكهرومائية على إمدادات مياه ثابتة، مما قد يؤدي في بعض الأحيان إلى انخفاض توافر المياه في اتجاه مجرى النهر. يمكن لاستراتيجيات إدارة المياه التعاونية التي تعطي الأولوية لاحتياجات كل من توليد الطاقة والنظم الإيكولوجية المائية أن تحقق التوازن وتضمن الإدارة المستدامة للمياه.

## ◆ أهمية تقييم الأثر البيئي في مشاريع الطاقة الكهرومائية

ومع ذلك، قبل الشروع في هذه المشاريع، من الضروري التأكد من تأثيرها البيئي. يلعب تقييم الأثر البيئي (EIA) دورًا محوريًا في تقييم العواقب البيئية لمشاريع الطاقة الكهرومائية. ومن خلال تقييم المخاطر البيئية المحتملة، يضمن تقييم الأثر البيئي أن يتم تطوير هذه المبادرات بطريقة مستدامة، مما يقلل من تأثيرها الضار على النظم البيئية والتنوع البيولوجي. دعونا نستكشف سبب أهمية تقييم الأثر البيئي في تطوير وتشغيل مشاريع الطاقة الكهرومائية:

### ❖ تحديد المخاطر البيئية المحتملة

يساعد تقييم الأثر البيئي في تحديد وتقييم المخاطر المحتملة المرتبطة بمشاريع الطاقة الكهرومائية. ويقيم التأثير على الموائل المائية، بما في ذلك الأنهار والجداول، وكذلك النباتات والحيوانات المحلية. من خلال توفير فهم شامل للمخاطر المحتملة، يتيح تقييم الأثر البيئي لمطوري المشاريع اعتماد تدابير التخفيف وتقليل التأثير السلبي على البيئة.

### ❖ حماية التنوع البيولوجي والتوازن البيئي

أحد الأهداف الرئيسية لتقييم الأثر البيئي هو حماية التنوع البيولوجي والحفاظ على التوازن البيئي في منطقة المشروع. فهو يضمن أن تصميم المشروع وإنشائه وتشغيله لا يؤدي إلى فقدان النظم البيئية القيمة أو الأنواع النادرة أو الموائل الحرجة. ويحمي هذا النهج الاستباقي التنوع البيولوجي، مما يسمح للأجيال القادمة بالاستمتاع بجمال الطبيعة وفوائدها.

### ❖ تعزيز القبول الاجتماعي وإشراك أصحاب المصلحة

يتبنى تقييم الأثر البيئي مفهوم اتخاذ القرار الشامل من خلال إشراك المجتمعات المحلية والخبراء وأصحاب المصلحة في عملية التقييم. ويعزز هذا

التضمين الشفافية، ويعالج المخاوف، ويعزز القبول الاجتماعي لمشاريع الطاقة الكهرومائية. وبالإضافة إلى ذلك، فإنه يشجع التعاون ويفتح سبل التوظيف المحلي والنمو الاجتماعي والاقتصادي.

### ❖ ضمان الإدارة المستدامة للمياه

يؤكد تقييم الأثر البيئي على أهمية الإدارة المستدامة للمياه في مشاريع الطاقة الكهرومائية. يحدد التقييم الشامل التأثير المحتمل على جودة المياه وتدفقات الأنهار والنظام الهيدرولوجي العام. ومن خلال مراقبة وإدارة موارد المياه بشكل فعال، يضمن تقييم الأثر البيئي الاستدامة طويلة المدى لهذه المشاريع، وهو أمر بالغ الأهمية لكل من البيئة وتوليد الطاقة في المستقبل.

### ❖ تخفيف التأثيرات الضارة على جودة الهواء والتربة

غالبًا ما تتطلب مشاريع الطاقة الكهرومائية أعمال البناء والحفر، مما قد يؤثر على جودة الهواء والتربة. يقوم تقييم الأثر البيئي بتقييم هذه التأثيرات المحتملة ويقترح تدابير لتقليل التلوث والحفاظ على خصوبة التربة. ويضمن هذا التقييم أن المشاريع لا تساهم في الانبعاثات المحمولة جواً أو تؤدي إلى تدهور جودة التربة المحيطة، مما يحافظ على صحة الإنسان والبيئة.

عندما يتعلق الأمر بمشاريع الطاقة الكهرومائية، تلعب تقييمات الأثر البيئي دورًا محوريًا في حماية النظام البيئي المائي والنباتات والحيوانات والنسيج الاجتماعي للمجتمعات المحلية. توفر هذه التقييمات رؤى قيمة حول التأثيرات المحتملة للمشروع على أعداد الأسماك، ونوعية المياه، ومستويات الترسيب، والتغيرات في النظام البيئي للنهر أو البحيرة. بالإضافة إلى ذلك، تأخذ تقييمات الأثر البيئي أيضًا في الاعتبار التأثير على المجتمعات المقيمة بالقرب من المشروع، بما في ذلك النزوح المحتمل، والتغيرات في سبل العيش، والتأثيرات على التراث الثقافي.

### ◆ تخفيف الأضرار البيئية

تساعد تقييمات الأثر البيئي في تحديد التأثيرات السلبية المحتملة على الحياة المائية والأنظمة البيئية. ومن خلال فهم هذه التأثيرات مسبقًا، يمكن للمطورين تنفيذ تدابير التخفيف مثل سلالم الأسماك، ومصائد الرواسب، وبرامج استعادة الموائل لحماية الأنواع المحلية والحفاظ على التوازن البيئي.

### ◆ حماية جودة المياه

قد تغير مشاريع الطاقة الكهرومائية تدفق ونوعية المياه في اتجاه مجرى النهر، مما يؤثر على جودة مياه الشرب والري والموائل المائية. ومن خلال تقييمات الأثر البيئي، يمكن دمج التدابير اللازمة للحفاظ على جودة المياه، مثل أنظمة الترشيح المتقدمة وآليات مكافحة التلوث، في تصميم المشروع.

### ◆ الحد من الاضطراب الاجتماعي

تسلط تقييمات الأثر البيئي الضوء على المخاطر الاجتماعية المحتملة المرتبطة بمشاريع الطاقة الكهرومائية. تسمح مشاورة أصحاب المصلحة وإشراك المجتمع أثناء عملية التقييم بالاستماع إلى اهتمامات المجتمعات المحلية ومعالجتها. ويساعد هذا النهج الشامل على تقليل الاضطرابات الاجتماعية الناجمة عن المشروع، مما يضمن تعاونًا وقبولًا أفضل.

# الطاقـــة الحرارية الأرضية

الطاقة الحرارية الأرضية Geothermal هي مصدر لا ينضب من الطاقة الحرارية والكهربائية على نطاق الزمن البشري. استخدامه صديق للبيئة ويوفر طاقة الحمل الأساسي. لا يعتمد مصدر الطاقة هذا على الطقس، ويوفر الطاقة على مدار 24 ساعة في اليوم و7 أيام في الأسبوع. يؤدي استخدام الطاقة الحرارية الأرضية إلى زيادة الناتج الصافي الإقليمي والمحلي، ويخفف الاعتماد على الوقود الأحفوري ويساعد في الحفاظ على الموارد الكيميائية القيمة للمستقبل. توفر موارد الطاقة الحرارية الأرضية العميقة طاقة حرارية وكهربائية (حرارية محولة) ومن ثم توفير طاقة موثوقة للمستقبل.

يؤدي استخدام الموارد الحرارية الأرضية العميقة إلى استخراج السوائل الساخنة من الخزانات الحرارية. يجري إعادة هذه المياه الساخنة إلى الخزانات، ومن ثم الحفاظ على التوازن الطبيعي والسماح بإدارة مستدامة ومقتصدة للموارد. تتميز منشآت الطاقة الحرارية الأرضية ومحطات الطاقة بالاستخدام الصغير للأراضي. ومن ثم فإنّ التأثير البصري على المناظر الطبيعية ضئيل (جانب مُهمٌّ بشكل خاصٍّ في المناطق المكتظة بالسكان).

يمكن أن توفر الطاقة الكهربائية التي تنتج من موارد الطاقة الحرارية الأرضية مساهمة مُهمَّة في إمدادات الطاقة الكهربائية للحمل الأساسي وقد تحل محل محطات الطاقة الكبيرة الحجم التي تعمل بالوقود الأحفوري. حقق استخدام الطاقة الحرارية الأرضية من الموارد الضحلة لإنتاج الطاقة عند درجات حرارة منخفضة لتطبيقات التدفئة والتبريد تقدماً هائلاً في العقد الماضي.

يمكن أن تسهم الطاقة الحرارية الأرضية من المصادر والخزانات العميقة في توفير طاقة حمل أساسية كبيرة. يمكن تركيب التكنولوجيا اللازمة للأنظمة الحرارية الأرضية المحسنة Enhanced Geothermal Systems (EGS) في كل مكان تقريباً. ومع ذلك، فإن هذه التقنية تحتاج إلى مزيد من التحسينات والبحث. من شأن المشروعات الناجحة أن تساعد في زيادة تعميمها. يمكن أن يؤدي الجمع الذكي لأنظمة الطاقة الحرارية الأرضية مع مصادر أخرى للطاقة المتجددة إلى تحقيق فوائد مستدامة. بالنسبة للمنازل السكنية، على سبيل المثال، أثبت أن الجمع بين أنظمة المضخات الحرارية الأرضية والأنظمة الحرارية الشمسية ذات فعالية عالية في استخدام الطاقة. يمكن دمج الطاقة الحرارية الأرضية من نظام حراري مائي عميق مع تركيب غاز طبيعي لتحسين كفاءة الطاقة.

سنتعرف في هذا الفصل على تاريخ تطور استخدام الطاقة الحرارية الأرضية ومصادرها وكيفية استخراجها واستخداماتها وأنواع محطات الطاقة الحرارية الأرضية، وعيوبها وآثارها في البيئة والمجتمع مع تسليط الضوء على بعض التجارب التي نفذتها بعض الدول في العالم.

# المجـــال الحـــراري الأرضـــي

يعتقـد العلمـاء أن الاسـتفادة مـن الطاقـة الحراريـة الأرضيـة سـيكون حـلّاً مسـتداماً لتقليـل آثـار الاحتبـاس الحـراري والاعتمـاد علـى الوقـود الأحفـوري. تختـزن الأرض في جوفها كميـات هائلـة مـن الطاقـة الحراريـة ومـن المتعـارف عليـه أن درجـة حـرارة الكـرة الأرضيـة ترتفـع كل مـا انتقلنـا إلـى الأسـفل حيـث تتـراوح درجـة الحـرارة في أعمـاق القشـرة الأرضيـة مابـين 500 – 1000 % وتصـل إلـى 2500 % في درجـة الوشـاح أمـا طبقـة اللـب الخارجـي تبلـغ درجـة حرارتهـا حوالـي 3900 % يليهـا طبقـة اللـب الداخلـي والتـي تصـل حرارتهـا إلـى 6000 % وفيمـا يلي نوضح البنية الداخلية للأرض والخصائص الحرارية للصخور.

**تتكوّن البنية الداخلية للأرض من ثلاثة أجزاء رئيسية، وهي:**

- القشـرة الأرضيـة (Crust) وتمثّل الطبقـة التـي نعيش عليهـا وتحتوي على الغلاف الصخـري لـلأرض. وتنقسـم القشـرة إلـى قشـرة قاريـة تتكون مـن صخـور فلسـية (Felsic Rocks) ويتـراوح سـمكها مـن 5 - 70 كـم، وقشـرة محيطيـة تتكـوّن مـن صخـور مافيـة (Mafic Rocks) ويتـراوح سـمكها من 5 - 6 كم.

- الوشاح (Mantle): يقع أسفل القشرة الأرضية ويعد الجزء الأكثر سماكة من الأرض حيث يصل سمكه إلى 2900 كم ويشكّل ما يقارب 85 % من حجم الأرض. ويتميز الجزء الخارجي منه بأنه لزج بينما يكون الجزء الداخلي صلبا.

- اللّـب (Core): يقـع اللّـب تحـت الوشـاح ويتكـوّن مـن طبقتـين؛ طبقـة خارجيـة سـائلة (النـواة الخارجيـة) مـن الحديـد والنيـكل تحيـط باللّـب الداخلـي الصلـب لـلأرض (النـواة الداخليـة). وتصـل درجـة الحـرارة في لـبّ الأرض إلـى 6000 درجـة مئويـة، والضغـط إلـى مـا يقـارب 360000 ميغـا بـار.

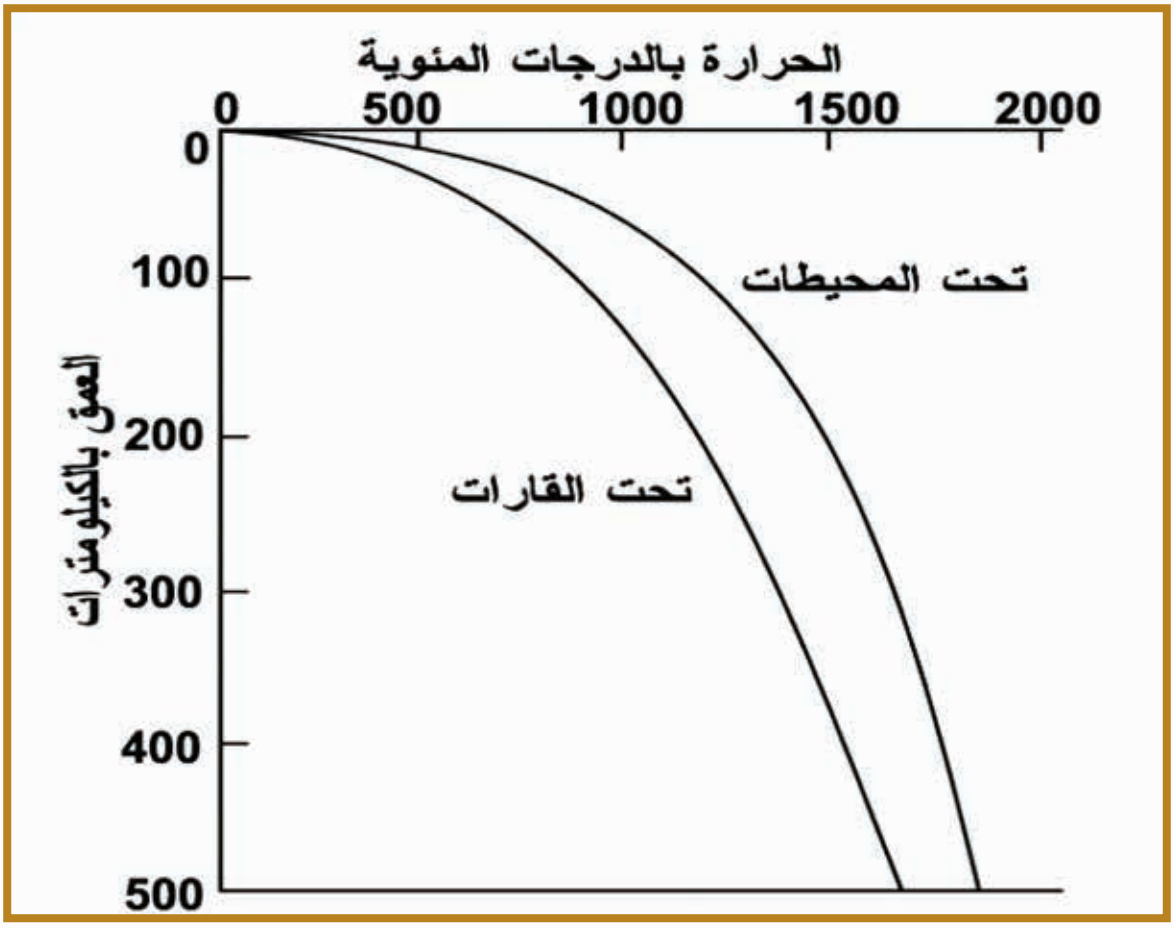
وتدل العديد من الظواهر الطبيعية على وجود درجات حرارة مرتفعة في باطن الأرض؛ ومن تلك الظواهر البراكين التي يصاحبها اندفاع الحمم المنصهرة ذات الحرارة العالية، وينابيع المياه الحارة والفوّارات. كما يمكن أن يستشعر هذه الحرارة العاملون في المناجم، وتلاحظ كذلك في عمليات حفر الآبار العميقة لأغراض التنقيب عن النفط.

وتقدّر كمية الحرارة المختزنة في جوف الأرض بما يقارب $12.6 \times 10^{24}$ ميجا جول، وهذه الكمية الهائلة تجعل من الطاقة الحرارية الأرضية مصدرا من مصادر الطاقة المتجددة. وترتبط حرارة جوف الأرض بعدة مصادر لها؛ فقد اكتسبت الأرض هذه الحرارة أثناء نشأتها ضمن النظام الشمسي وتشكّل ما نسبته 30 % من حرارة الأرض المختزنة. ويضاف إلى ذلك، الحرارة المكتسبة من اضمحلال العناصر المشعة طبيعيا كاليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم والتي تنتشر في تركيب القشرة الأرضية وفي الجزء العلوي من الوشاح. وتشكّل هذه الحرارة ما يقارب 70 % من الحرارة الكلية المختزنة في جوف الأرض.

## كمية الحرارة الناتجة من اضمحلال العناصر المشعة طبيعيا

| النظير | الحرارة الناتجة (واط/كيلوجرام للنظير) | عمر النصف (سنوات) | معدّل التركيز في الوشاح (كجم نظائر/كيلوجرام من الوشاح) | الحرارة الناتجة (واط/كيلوجرام من الوشاح) |
|---|---|---|---|---|
| $U^{238}$ | $9.46 \times 10^{-5}$ | $4.47 \times 10^{9}$ | $30.8 \times 10^{-9}$ | $2.91 \times 10^{-12}$ |
| $U^{235}$ | $5.69 \times 10^{-4}$ | $7.04 \times 10^{8}$ | $0.22 \times 10^{-9}$ | $1.25 \times 10^{-13}$ |
| $Th^{232}$ | $2.64 \times 10^{-5}$ | $1.40 \times 10^{10}$ | $124 \times 10^{-9}$ | $3.27 \times 10^{-12}$ |
| $K^{40}$ | $2.92 \times 10^{-5}$ | $1.25 \times 10^{9}$ | $36.9 \times 10^{-9}$ | $1.08 \times 10^{-12}$ |

بيّنت الدراسات الجيولوجية أن درجة الحرارة للقشرة الأرضية تزداد كلما انتقلنا نحو الأسفل وبمعدل يبلغ ثلاث درجات مئوية لكل مائة متر تقريباً، حسب قياسات كثيرة أجريت في عدد من المناطق على سطح الأرض. إلا أنه في المناطق الزلزالية والبركانية فإن ازدياد معدلات درجات الحرارة في القشرة الأرضية يكون بدرجة أكبر. أما أسباب ارتفاع درجة الحرارة لطبقات الأرض، فيعزى إلى عدة أسباب، فلب الأرض منصهر يحتوي على كثير من الطاقة الحرارية التي تتدفق نحو الطبقات الأعلى. كما أن قوى الجاذبية واحتكاك طبقات الأرض ببعضها بعضاً ينتج عنه ارتفاع كبير في درجة حرارة تلك الصخور والمياه الموجودة فيها. كذلك فإن تحلل المواد المشعة الموجودة في باطن الأرض يتسبب في ارتفاع درجة حرارة جوف الأرض، كانحلال الراديوم واليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم وغيرها من العناصر ذات النشاط الإشعاعي. وهذا ما يجعل جانباً كبيراً من الطاقة الحرارية للأرض يتجدد بفعل النشاط الإشعاعي الطبيعي وقوة الجاذبية والاحتكاك. عموما ترتفع درجة حرارة القشرة مع العمق بسبب تدفق الحرارة من الوشاح الأكثر سخونة؛ بعيدًا عن حدود الصفائح التكتونية، ترتفع درجة الحرارة بحوالي 25 - 30 % / كم من العمق بالقرب من السطح في معظم أنحاء العالم وهذا ما يعرف بالتدرج الحراري الأرضي (Geothermal Gradient). التدرج الحراري تحت اليابسة وتحت المحيطات. ومع ذلك، في بعض الحالات ، قد تنخفض درجة الحرارة مع زيادة العمق، خاصة بالقرب من السطح، وهي ظاهرة تُعرف بالتدرج الحراري الأرضي العكسي أو السلبي.




التدرج الحراري في باطن الأرض

يؤدي ازدياد درجة حرارة باطن الأرض مع العمق إلى وصول الصخور إلى درجة الانصهار عند أعماق قليلة نسبياً، وتصبح درجات حرارتها عند أعماق أكبر أعلى بكثير من درجات انصهارها. إلا إن خضوعها لضغط كبير جدا يحافظ على هذه الصخور في حالة صلبة. وتبدأ الصخور بالانصهار الجزئي عند انخفاض الضغط عليها؛ مثلا عند اقترابها من سطح الأرض أو عند حدوث صدوع عميقة.

ونتيجة لوجود فرق في درجة الحرارة بين المناطق العميقة للأرض، ذات الحرارة المرتفعة، والمناطق الأقل عمقا، ذات الحرارة الأقل، تنشأ تيارات حرارية تنتقل من مركز الأرض باتجاه قشرتها؛ وهو ما يعرف بالتدفق الحراري (Heat Flow). وتنتقل الحرارة الأرضية من منطقة إلى أخرى في باطن الأرض بطريقتين رئيسيتين:

- التوصيل الحراري بواسطة الصخور.
- النقل بواسطة حركة الموائع مثل المياه الجوفية والغازات (Advection).

تم تقدير التدفق الكلي للحرارة من الأرض (التوصيل، الحمل الحراري والإشعاع) إلى الغلاف الجوي ب $42 \times 10^{12}$ واط، يأتي من القشرة $8 \times 10^{12}$ وات، والتي تمثل 2 % من حجم الارض. يأتي $32.3 \times 10^{12}$ واط من الوشاح، والتي تمثل 82% من إجمالي حجم الأرض و $1.7 \times 10^{12}$ وات تأتي من النواة والتي تمثل 16% من حجم الأرض. أما معدل تبريد الأرض تقريبا هو $10.3 \times 10^{12}$ واط.

يمكن حساب التدفق الحراري، q، بطريقة التوصيل باستخدام قانون فوريير؛ وينص القانون على تناسب التدفق الحراري (واط لكل وحدة مساحة) خطيا مع التدرج الحراري، $\Delta T$، بين مناطق مختلفة من النظام الجيولوجي، مع ثابت تناسب تمثله الموصلية الحرارية للصخر، $\lambda$ (جول / ثانية. متر. كلفن).

$$q = -\lambda \Delta T$$

وتعبّر الموصلية الحرارية، $\lambda$، عن قدرة الصخور على توصيل الحرارة، وتتفاوت قيمها بمقدار كبير بين أنواع الصخور المختلفة. فالموصلية الحرارية لصخور القاعدة المتبلورة مثل صخور الجرانيت والنايس تزيد بمقدار 2-3 مرات على الموصلية الحرارية للرسوبيات غير المتماسكة مثل الرمل والحصى. كما تتفاوت الموصلية الحرارية للصخر الواحد نتيجة التغيّر في تركيب الصخر واختلاف درجات تماسك حبيباته وتباين خواصه (Anisotropy).

يعتبر الغلاف الصخري للقشرة الأرضية موصلا حراريا، حيث تتفاوت موصليته الحرارية نتيجة وجود غلاف صخري قاري وآخر محيطي للقشرة. وتنشأ القشرة المحيطية عند مراكز توسع حيد منتصف المحيط (Mid-Ocean Ridge) بفعل اندفاع صخور الوشاح المنصهرة. ثم تبرد القشرة المحيطية بعد ذلك وتصبح أكثر كثافة وتعود للوشاح. وعلى خلاف ذلك، فإن القشرة القارية لا تعود للوشاح نظرا لانخفاض كثافة مكوناتها حتى بعد أن تبرد.

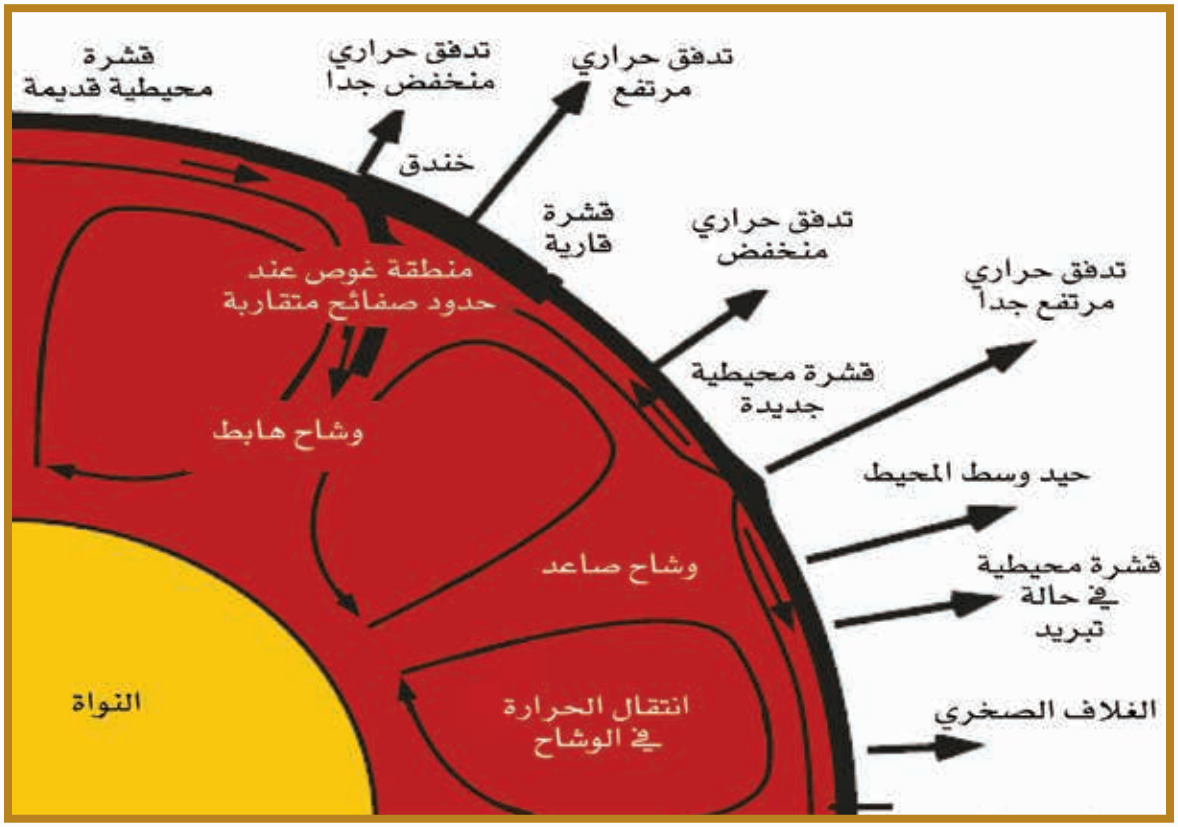
ويستنتج مما تقدّم أن التوزيع المكاني للحرارة السطحية للأرض ناتج بشكل أساسي عن عمليات الحمل الحراري التي تتم في الوشاح، والعمليات المرتبطة بتكتونية الصفائح. ويبلغ متوسط التدفق الحراري في المناطق القارية 65 ملي واط/م$^2$، في حين تصل قيمتها في المناطق المحيطية إلى 101 واط/م$^2$ وبمعدل 87 واط/م$^2$. كما تسجّل قيما محلية للتدفق الحراري تصل إلى مئات أو آلاف الملي واط للمتر المربع (مثل منطقة لارداريللو في إيطاليا).

## • جيولوجيـــة الخـــزان الجـوفي

تنقسم القشرة الأرضية إلى حوالي عشرين صفيحة تكتونية تطفو فوق الصهارة في منطقة الوشاح، وفقا لنظرية الصفائح التكتونية. ويرتبط توزيع مناطق الطاقة الحرارية الأرضية حول العالم ارتباطا وثيقا بالصفائح التكتونية؛ حيث تتواجد مصادر الطاقة الحرارية الأرضية ذات درجات الحرارة العالية عند أطراف هذه الصفائح ومن أشهرها المنطقة التي تعرف بـ «حلقة النار أو الحزام الناري».

ويتسبب تكسر الصفائح التكتونية بحدوث انفتاح في القشرة الأرضية تصعد منه الصهارة من الوشاح مقتربة من السطح (مثال ذلك الانفتاح الحاصل في البحر الأحمر). أما في حالات التصادم بين الصفائح التكتونية، فتتشكل أقواس الجزر مثل الأرخبيل الياباني في حالة تصادم صفائح محيطية، بينما تتكوّن

الجبال في حالة وجود صفيحة محيطية وأخرى قارية مثل جبال الأنديز. كذلك تتكوّن سلاسل جبلية مثل جبال الألب وجبال الهيمالايا إذا كانت الصفائح المتصادمة قارية.



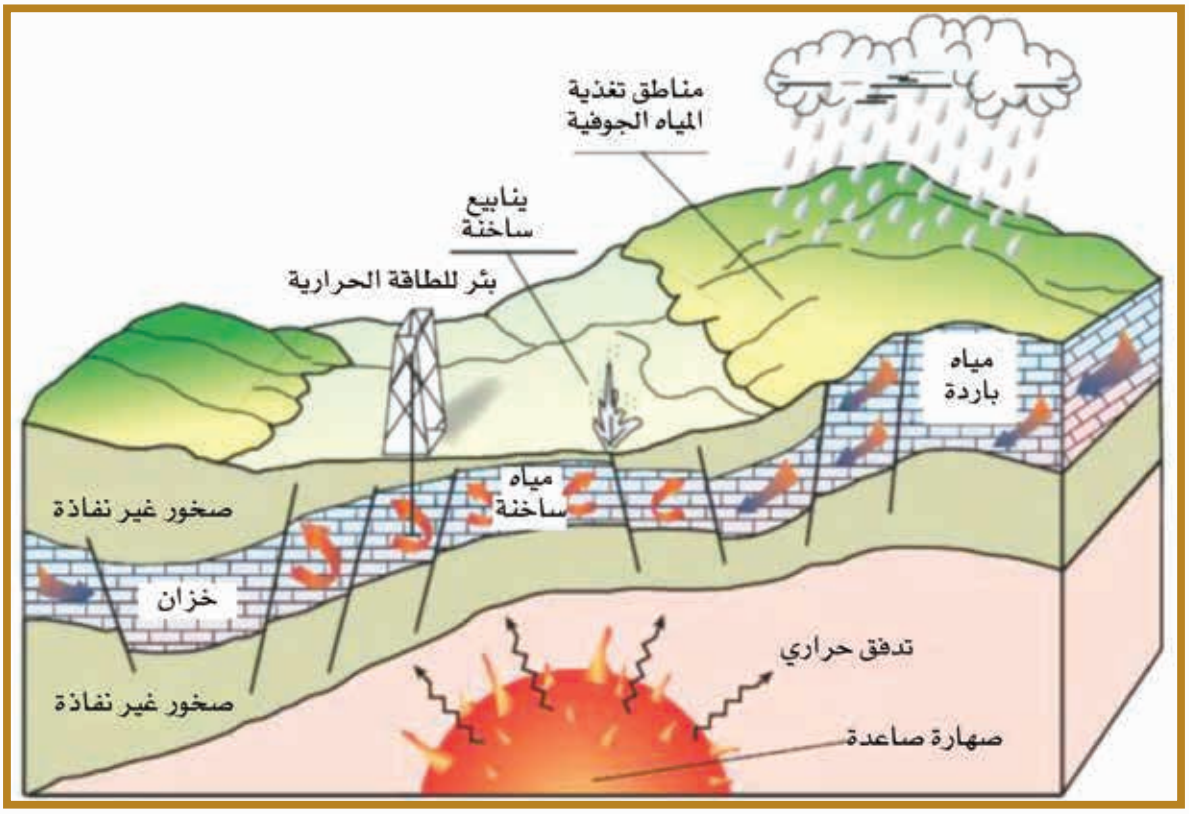

تعمل تيارات الحمل الحراري في طبقة الوشاح اللزجة على تحريك الصفائح التكتونية وتتحكّم بتوزيع التدفق الحراري الأرضي

### يتكوّن نظام تخزين الحرارة الجوفية الأرضية من ثلاثة مكونات رئيسية:

- مصدر حراري: قد يكون مصدر الحرارة صهارة (ماغما) صاعدة ذات درجة حرارة تزيد على 600 درجة مئوية تصل لعمق قريب نسبيا (من 5 - 10 كم). كما يمكن أن يكون المصدر الحراري حرارة الأرض القريبة من السطح وهي منخفضة نسبيا.

- صخور ساخنة ذات نفاذية عالية تسمح للمياه بالحركة عبرها لنقل الحرارة. وتكون صخور الخزّان مغلفة بصخور غير نفّاذة ومتصلة بمناطق سطحية تعمل على إعادة شحن الخزان بالمياه بطريقة طبيعية لتعويض الفاقد منها.

- سائل لنقل الحرارة: تمثّل المياه في معظم الحالات السائل الحراري في خزّان المياه الجوفية وتكون في الحالة السائلة أو الغازية، وفقا لدرجة حرارتها ومقدار الضغط الخاضعة له. وقد يصاحب حركة المياه الناقلة للحرارة انتقال مواد كيميائية وغازات مثل ثاني أكسيد الكربون ($CO_2$) وكبريتيد الهيدروجين ($H_2S$) وغيرها.




مكونات نظام خزّان الحرارة الجوفية الأرضية.

## • أنـــواع خزانـــات الحـــرارة الجوفيـــة

تصنّـف خزانـات الحـرارة الجوفيـة الأرضيـة مـن حيـث درجـة حرارتهـا إلـى ثلاثـة أصنـاف: (1) ذات الحـرارة المنخفضـة والتـي تقـل درجـة الحـرارة لهـا عـن 100 درجـة مئويـة، و (2) ذات الحـرارة المتوسـطة مـن 100 - 150 درجـة مئـوي، و (3) ذات الحـرارة المرتفعـة والتـي تزيـد حرارتهـا عـن 150 درجـة مئويـة. كمـا تصنّـف حسـب حالـة المـاء (سـائل أم بخـار) فيهـا إلـى ثلاثـة أنـواع، وهـي: خزانـات الميـاه الدافئـة التـي تقـل حرارتهـا عـن 100 درجـة مئويـة؛ خزانـات الميـاه الحـارة التـي تكـون فيهـا الميـاه في الحالـة السـائلة ودرجـة حرارتهـا تتـراوح بـين 100 - 250 %؛ وخزانـات البخـار التـي يكـون فيهـا المـاء في الحالـة الغازيـة.

**وتصنّف الخزانات الحرارية إلى ثلاثة أنواع وفقا لنوع المصدر الحراري فيها؛ وهي:**

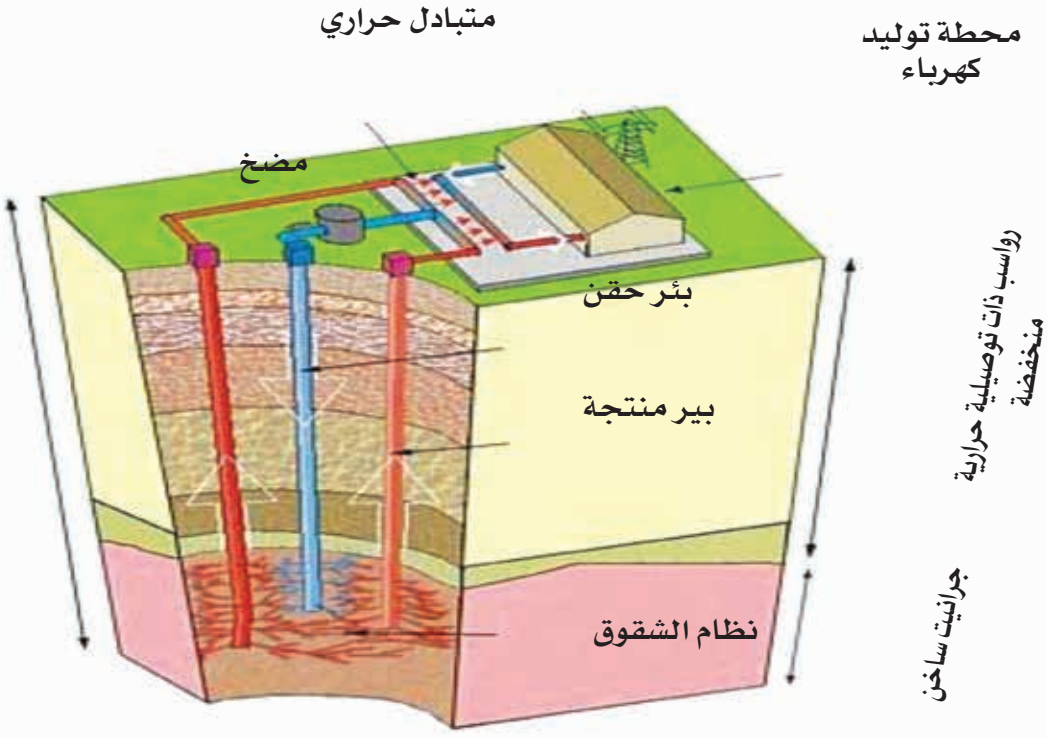
- الخـزّان الحرمائـي (Hydrothermal): يحتـوي الخـزان الحرمائـي علـى ميـاه و/أو بخـار داخـل صخـور مسـامية أو متشـققة يعلوهـا طبقـة صخريـة غيـر نفّـاذة. يمكـن اسـتغلال الطاقـة الحراريـة لهـذا الخـزان في اسـتخدامات مباشـرة مثـل أغـراض تدفئـة المبانـي والبيـوت الزجاجيـة، كمـا يمكـن اسـتخدامها لإنتـاج الطاقـة الكهربائيـة ويشـترط لذلـك أن تزيـد درجـة حـرارة الميـاه عـن 130 %.

- الخـزّان المضغـوط: يتكـون مـن طبقـة صخريـة نفـاذة حاملـة لميـاه مالحـة وتقـع تحـت ضغـط كبيـر، وتكـون درجـة حرارتـه متوسـطة. كمـا يحتـوي علـى تركيـزات كبيـرة مـن المعـادن الذائبـة وغـاز الميثـان. ويمكـن اسـتغلال هـذه المعـادن اقتصاديـا في عمليـة مصاحبـة لاسـتغلال الطاقـة الحـرارة الكامنـة فيـه.

- خـزّان الصخـور السـاخنة الجافـة: يتكـون مـن صخـور سـاخنة وجافـة غيـر نفـاذة ويتواجـد علـى أعمـاق يمكـن الوصـول إليهـا (أقـل مـن 3 كـم). وللتمكـن مـن اسـتغلال الطاقـة الحراريـة التـي تمتلكهـا هـذه الصخـور، يجـب أن تكـون

الصخور الساخنة مكسرة، وأن يتوفر مصدر مياه دوراني للضخ في الخزان. ويتم تسخين المياه بالتوصيل عند مرورها في شقوق الصخر لتصبح سوائل حرمائية. وتعرف هذه التقنية التي تستغل الطاقة الحرارية للصخور الساخنة الجافة بنظام الطاقة الحرارية الأرضية المحسّن (Enhanced Geothermal System; EGS).

- الماغما: صخور مصهورة جزئيا وهي المصدر الأكبر للحرارة الأرضية وتوجد على أعماق تتراوح بين 3 - 10 كم. ونظرا للعمق الكبير الذي تتواجد فيه الماغما ودرجة حرارتها المرتفعة جدا، والتي تتراوح بين 700 – 1200 درجة حرارة مئوية، فإنه يصعب استغلالها.




نظام الطاقة الحرارية الأرضية المحسّن (EGS) لإنتاج الطاقة الكهربائية من خزّان الصخور الساخنة الجافة.

# طرق استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية

تعد الطرق الجيوفيزيائية أحد التخصصات الثلاثة الرئيسية المطبقة على سطح الأرض لاستكشاف موارد الطاقة الحرارية الأرضية، بما في ذلك أيضاً الجيولوجيا وكيمياء الموائع الحرارية. تهدف أكثر الطرق نجاحاً إلى الخواص (البارامترات) التي تتأثر بشكل مباشر بالنشاط الحراري الأرضي، مثل طرق المقاومة والطرق الحرارية، وعادة ما يشار إليها بالطرق المباشرة. كما تستكشف الطرق الأخرى المعالم الفيزيائية للصخور المضيفة، بما في ذلك الخصائص المغناطيسية والكثافة والسرعة الزلزالية، وعادة ما يشار إليها بالطرق غير المباشرة أو الهيكلية. سنقدم فيما يأتي وصفاً موجزاً لأهم هذه الطرق ونناقش قوتها وحدودها وأمثلة على استخدامها.

## • الطـــرق الحراريـــة

تشمل الطرق الحرارية القياسات المباشرة لدرجة الحرارة و / أو الحرارة، ومن ثم فهي ترتبط بشكل أفضل بخصائص نظام الطاقة الحرارية الأرضية أكثر من الطرق الأخرى. ومع ذلك، كطريقة (قريبة) من السطح، فإنها تقتصر على المستويات الضحلة. إن قياس درجات الحرارة بالقُرْب من السطح، في أول متر أو نحو ذلك، أمر بسيط إلى حد ما. تعتمد المعرفة حول الحالة في المستويات الأعمق على وجود الآبار، التي عادة ما تكون آبار متدرجة ضحلة (على سبيل المثال 30–100 متر عمق)، والتي يمكن من خلالها حساب التدرج الحراري وربما العمق إلى مورد الطاقة الحرارية الأرضية القابل للاستغلال.

مع أن الحفر عادة ما يكون مكلفًا إلى حد ما، ويضع حدودًا عملية لاستخدام الطريقة. علاوة على ذلك، فإن الآبار الضحلة ليست دائماً كافية للحصول على قيم موثوقة على التدرج الحراري.

تعتبر آلية التبادل الحراري في الأرض مُهمَّة لتفسير الطرق الحرارية. ويجري التمييز بين:

- ✓ التوصيل الذي يعتمد على الاهتزازات الذرية، وهو مُهمٌّ لنقل الحرارة في القشرة الأرضية.
- ✓ والحمل الحراري الذي ينقل الحرارة بحركة الكتلة، على سبيل المثال الدورة الطبيعية للماء الساخن.
- ✓ والإشعاع الذي لا يؤثر في أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية.

## • الطرق الكهربائيـــــة

تعتبر الطرق الكهربائية أو طرق المقاومة من أهم الطرق الجيوفيزيائية في الاستكشاف السطحي لمناطق الطاقة الحرارية الأرضية، وعلى هذا النحو الطرق الرئيسية المستخدمة في تحديد موارد الطاقة الحرارية الأرضية ومجالات الإنتاج. المعلم الأكثر الأهمية هي المقاومة الكهربائية للصخور التي ترتبط بكل من درجة الحرارة وتغيير الصخور التي تعد معالم رئيسية لفهم أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية.

المبدأ الرئيسي هو أن التيار الكهربائي يجري تحريضه في الأرض الذي يولد إشارة كهرومغناطيسية تراقب على السطح. يدعى مقلوب المقاومة هو الموصلية أو (الناقلية Conductivity)، ومن ثم من الممكن أيضاً التحدث عن قياسات الموصلية. ومع ذلك، في الطاقة الحرارية الأرضية، فإن التقليد هو الإشارة إلى القياسات الكهربائية أو المقاومة. وتتضمن الطرق الكهربائية أنواعاً مختلفة من القياسات وإعدادات مختلفة للأنواع المختلفة. أهم الأنواع هي:

- طريقة التيار المستمر، حيث يُولّد التيار ويحقن في الأرض من خلال أقطاب كهربائية على السطح. الإشارة المقاسة هي الحقل الكهربائي المتولد على السطح.
- طريقة TEM، حيث يجري تحفيز التيار بوساطة مجال مغناطيسي متغير بمرور الوقت من مصدر متحكم فيه. الإشارة المراقبة هي الحقل المغناطيسي المتحلل على السطح من الحقل المغناطيسي الثانوي.
- طريقة MT، حيث يحفز التيار من خلال التغيرات الزمنية في المجال المغناطيسي للأرض. الإشارة المقاسة هي الحقل الكهرومغناطيسي على السطح.

## قياســـات مقاومة الصخور الكهربائية

المقاومة الكهربائية للصخور في محيط منطقة الطاقة الحرارية الأرضية معلم يعكس خصائص نظام الطاقة الحرارية الأرضية أو تاريخها. ومن ثم، فإن المعرفة الجيدة بالمقاومة ذات قيمة كبيرة لفهم نظام الطاقة الحرارية الأرضية.

يتعلق هذا بحقيقة أن مقاومة الصخور يتم التحكم فيها بشكل أساسي بواسطة معايير مرتبطة بالنشاط الحراري الأرضي، مثل:

- ✓ المسامية وهيكل المسام، حيث يجري التمييز بين:
- ✓ المسامية بين الحبيبات مثل الصخور الرسوبية.
- ✓ مسامية الكسر، المتعلقة بالتوتر أو التكسير أو تبريد الصخور النارية.
- ✓ المسامية المتعرجة التي تتعلق بإذابة المواد (الحجر الجيري) أو محتوى الغاز (في الصهارة البركانية).

- ✓ تغيير الصخور، تبطن جدران المسام، غالباً ما يرتبط بالتفاعل بين الماء والصخور.
- ✓ ملوحة السائل في المسام.
- ✓ درجة الحرارة.
- ✓ كمية الماء، أي محتوى التشبع أو البخار.
- ✓ الضغط.

تعتبر العناصر الأربعة المدرجة أولاً، وهي الصدع (الثانوي) المسامية، والتغيير، وملوحة السائل، ودرجة الحرارة، أهم العوامل، والمعايير الأساسية لنظام الطاقة الحرارية الأرضية. وهذا يفسر سبب أهمية معامل مقاومة الصخور في استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية، وبخاصة في المناطق البركانية المحيطة، ومن ثم الدور المهم لسبر المقاومة.

## ■ قياسات التيار المستمر

قياسات التيار المستمر هي أقدم طرق المقاومة، على الأقل كطرق مستخدمة لاستكشاف الطاقة الحرارية الأرضية، وكانت الطرق الروتينية في الخمسينيات والثمانينيات من القرن الماضي، لكن تطبيقها ليس شائعاً في الوقت الحاضر.

تعتمد معظم التكوينات على زوجين من الأقطاب الكهربائية: أحدهما لنقل التيار، والآخر لقياس فرق الجهد. التوزيع الجغرافي يحدد النوع. يتم التمييز بين السبر والتنميط. السبر، وهو أكثر شيوعاً للاستخدام، له مركز ثابت ويتم استخدام تباعد الإلكترود المتنوع لرسم خرائط تغيرات المقاومة مع العمق، بينما في التنميط، تكون مسافات القطب ثابتة، وتتحرك المصفوفة بكاملها على طول خط الملف الخاص لرسم خرائط التغيرات الجانبية.

## ■ قياســـات TEM

في أواخر الثمانينيات، بدأت طريقة جديدة في إحداث تأثيرها في استكشاف الطاقة الحرارية الجوفية واستبدلت تدريجيّاً سبر شلمبرغير كطريقة روتينية في استكشاف الطاقة الحرارية الجوفية لأول مسافة 1–1.5 كم من الأرض.

طريقة TEM أو (الطرية الكهرومغناطيسية العابرة Transient Electro-Magnetic Method)، هي طريقة كهرومغناطيسية تستخدم مصدراً خاضعاً للتحكم لإنشاء الإشارة المراد قياسها. في طريقة السبر TEM ذات الحلقة المركزية، والمشار إليها باسم TEM من الآن فصاعداً، يُنشأ حقل مغناطيسي ثابت عن طريق إرسال التيار الكهربائي عبر حلقة كبيرة (ثنائي القطب المؤرض). ثم يجري إيقاف التيار فجأة. ومن ثم إحداث حقل ثانوي، يضمحل بمرور الوقت. يراقب معدل الاضمحلال هذا عن طريق قياس الجهد المستحث في ملف استقبال في مركز الحلقة الموجودة على السطح. يعتمد معدل التوزيع والاضمحلال الحالي المُسجل كدالة للوقت على بنية المقاومة أسفل موقع القياس، ويمكن تفسيره على هذا النحو. يمكن أن تستند الإشارة أيضاً إلى ثنائي القطب المؤرض لإنشاء المجال المغناطيسي الأساسي.

يتم تقديم بيانات TEM على مقياس ثنائي اللوغاريتمي كبيانات DC، ولكن هنا ترسم المقاومة الظاهرية كدالة للوقت بعد إيقاف التيار. معدات TEM متطورة ومكلفة نسبيّاً، على الأقل مقارنة بمعدات التيار المستمر. إلى جانب جهاز الاستقبال الذي يشتمل على جهاز تسجيل البيانات، يلزم توصيل جهاز إرسال بمولد كهربائي جيد قادر على توليد تيارات عالية (بترتيب 10 أمبير) ومن ثم حقل مغناطيسي قوي من خلال حلقة الإرسال. يجعل المولد الثقيل من الصعب إجراء القياسات عن طريق حمل الجهاز سيراً على الأقدام. بالإضافة إلى ذلك، توجد حاجة إلى ملف قياس وأسلاك للحلقات بحيث تكون الأسلاك الحالية قادرة على حمل التيارات الثقيلة. من الناحية العملية، عادة ما تكون حلقة الإرسال الكبيرة عبارة عن مربع طول ضلعه 150-300 متر. مع معدات

TEM التقليدية الجيدة وحلقة الإرسال 300 × 300 متر، مع TEM، من الممكن دراسة هياكل المقاومة وصولاً إلى مستويات أعماق تصل إلى 1 - 1.5 كم.

## ■ قياسات MT

MT أو الكهرومغناطيسية ذات المصدر الطبيعي تستخدم الحقل الكهرومغناطيسي الطبيعي للأرض كمصدر للطاقة. يحث الحقل المغناطيسي الطبيعي المتغير التيارات الكهربائية في الأرض الموصلة. من خلال قياس إشارة المجال المغناطيسي المتذبذب والتيارات الكهربائية (أي الحقل الكهربائي) على سطح الأرض، من الممكن ربط ذلك بمقاومة الأرض أسفل موقع القياس. يتعلق تردد الإشارة بعمق الفحص، حيث تصل الترددات المنخفضة إلى مستويات أعمق. ومن ثم، تستخدم ترددات من 0.00001 – 10 هرتز لأبحاث القشرة العميقة، في حين تستخدم ترددات أعلى، مثل 10 – 1000 هرتز، للقشرة العلوية. تعد معدات MT بسيطة ومحمولة إلى حد ما مع مراقبة الحقل الكهرومغناطيسي من خلال الملفات المغناطيسية وثنائيات الأقطاب الكهربائية، من خلال نظام الحصول على البيانات، وعادة ما يجري توصيله بمحطة المرجع البعيدة للضوضاء الكهرومغناطيسية.

## ■ قياسات الجهد الذاتي

الجهد الذاتي أو Self Potential (SP) هي نوع خاصّ من القياسات الكهربائية تهدف إلى رسم خرائط لمكون التيار المستمر للإمكانات الكهربائية الطبيعية للأرض. يمكن أن ترتبط الانحرافات الكبيرة بالنشاط الحراري الأرضي. قد تتعلق الحالات الشاذة باختلاف درجة الحرارة مما يخلق إمكانات حرارية كهربائية، أو تدفق مائع من الماء الساخن أو البارد، ولكن قد تتأثر أيضاً بترسبات المعادن الموصلة أو التغيرات الكيميائية في الصخور أو سائل المسام. لا تستخدم هذه الطريقة على نطاق واسع حيث يصعب تحديد تفسير البيانات، لكنها لا

تـزال تقـدم معلومـات مُهمَّـة. أهـم التطبيقـات هـي دراسـات الاسـتطلاع ورسـم الخرائـط وتتبـع الأخطـاء. في اليابـان، تسـتخدم الطريقـة أيضـاً لرصـد المكمـن بخاصـة أنظمـة الطاقـة الحراريـة الأرضيـة التـي يهيمـن عليهـا السـائل، بافتـراض أن السبب الرئيسي لشذوذ SP هو إمكانية التدفق.

## • قياســـات الجاذبيـــة

تسـتخدم قياسـات الجاذبيـة لاكتشـاف التكوينـات الجيولوجيـة ذات الكثافـات المختلفـة. يـؤدي تبايـن الكثافـة إلـى قـوة جاذبيـة مختلفـة يجـري قياسـها. تعتمـد كثافـة الصخـور بشـكل أساسـي علـى تكويـن الصخـور ومسـاميتها، لكـن التشـبع الجزئـي للصخـور قـد يؤثـر أيضـاً في القيـم. عـادة مـا تكـون الكثافـة بـين نحـو 2 و 3 غـرام / سـم$^3$. بشـكل عـامٍّ، تكـون الصخـور الرسـوبية أخـف مـن الصخـور البلّوريـة. البيانـات الأوليـة تحتـاج إلـى تصحيـح لعـدة عوامـل. عـادةً مـا يتـم عـرض النتائـج أو عرضهـا في خرائـط بوجيـه Bouguer بنـاءً علـى شـذوذ Bouguer ΔgB، حيـث أجريـت تصحيحـات علـى القيمـة المقاسـة لتأثيـرات المـد والجـزر والارتفـاع والتضاريـس المحليـة وخـط العـرض والانحـراف في مقيـاس الجاذبيـة. تتشـابه طـرق تفسـير البيانـات تمامـاً مـع تلـك المسـتخدمة في القياسـات المغناطيسـية. ومـع ذلـك، فـإن طريقـة الجاذبيـة محـدودة إلـى حـد مـا بسـبب الغمـوض الـذي يكتنـف نظريّـاً عـدداً لا حصـر لـه مـن توزيعـات الكثافـة يناسـب مجـال جاذبيـة معـين. لذلـك، هنـاك حاجـة إلـى معلومـات أخـرى لتكـون قـادرةً علـى إصـلاح القيـم، علـى سـبيل المثـال سـماكة التكوينـات ومـا إلـى ذلـك. تشـمل التطبيقـات في اسـتكشـاف الطاقـة الحراريـة الأرضيـة رسـم خرائـط: تغيـرات عمـق الطابـق السـفلي في المناطـق الرسـوبية، والصخـور المتطفلـة المرتبطـة أحيانـاً بمصـدر حـرارة محتمـل، وأنظمـة صـدع أو سـد، والتعديل/ التثبيت بسبب التأثيرات الحرارية.

## • الطرق الزلزاليـــــة

تقيس الطرق الزلزالية توزيع سرعة الصوت والشذوذ في الأرض بالإضافة إلى توهين الموجات الصوتية. وهي تنقسم إلى مجموعتين، طرق نشطة حيث يستخدم مصدر خارجي لإنشاء موجات صوتية، مثل الانفجارات أو أجهزة المطرقة، بينما تكشف الطرق السلبية عن النشاط الزلزالي في الأرض وتستخدم ذلك للحصول على معلومات حول المعالم (البارامترات) التي قد تكون مؤثرة في نظام الطاقة الحرارية الأرضية. تعتمد الطرق الزلزالية على الموجات المرنة التي لها سرعات مختلفة عند ارتحالها عبر أنواع الصخور المختلفة، وتنكسر أو تنعكس عند الانقطاعات في أو بين التكوينات. يوجد نوعان من الموجات المرنة:

- ✓ **موجات P**، أو موجات الضغط، حيث تكون حركة الموجة في اتجاه الارتحال.
- ✓ **موجات S**، حيث تكون حركة المواد عمودية على اتجاه الموجة؛ بسبب حركة الأمواج، لا تخترق الموجات S السوائل، وإنما الصخور الصلبة فقط.

في القياسات النشطة، يجري التمييز بين قياسات الانكسار وقياسات الانعكاس، اعتماداً على الإجراءات. تقدم القياسات النشطة معلومات عن كثافة التكوينات، والمسامية والملمس، والحدود والانقطاعات والمناطق المملوءة بالسوائل ومن ثم درجة الحرارة. القياسات مكلفة جدّاً، وبخاصة قياسات الانعكاس الجيدة. ومع كونها الأكثر استخداماً من بين جميع الطرق الجيوفيزيائية بصفتها طريقة رئيسية في التنقيب عن النفط، إلا أن القياسات الزلزالية النشطة، وبخاصة قياسات الانعكاس، لا تُستخدم بشكل روتيني في استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية.

يوجد النشاط الحراري الأرضي المرتفع بشكل أساسي داخل البراكين المركزية النشطة أو على الأقل المرتبطة بها، التي عادة ما تهيمن عليها أجسام

معقدة من الصخور البلّورية. لذلك قد يكون من الصعب جدّاً تفسير المعلومات كما أن اختراق العمق ليس مرتفعاً، ومن ثم فإن الطريقة ليست فعَّالة من حيث التكلفة. تظهر قوة الطرق النشطة في محيط رسوبي أفضل مقارنةً بالطرق الأساسية المستخدمة في تكوينات نقل الزيت.

## • الطرق الجيولوجيـــة

في الطرق الجيولوجية، يتم إجراء رسم خرائط أولي للآفاق المختارة، مثل الوحدات الجيولوجية الرئيسية والتكتونية والبراكين. يجري أيضاً تعيين المظاهر الحرارية مثل الينابيع الحارة والفومارول وما إلى ذلك والتغيير. تقاس الخصائص الفيزيائية للمظاهر السطحية مثل درجة الحرارة ومعدل التدفق والتوصيل وما إلى ذلك. بدون فهم جيد لجيولوجيا المنطقة المرتقبة، يكون الاستكشاف مجرد تخمين بالكامل. النماذج الجيولوجية ثلاثية الأبعاد هي أسس استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية وتساعد بشكل رئيسي في تفسير التوقيعات الجيوكيميائية والجيوفيزيائية لأنظمة الطاقة الحرارية الأرضية.

هذه النماذج ثنائية وثلاثية الأبعاد مصنوعة من خرائط جيولوجية مفصلة مكملة بجمع البيانات الجيوكيميائية والجيوفيزيائية، سواء من السطح أو تحت السطح. تطبق الخرائط التفصيلية للسطح، والتحليل الهيكلي للصدوع، وتفسير صور الأقمار الصناعية، وتحليل وتقييم توزيع المعادن، والتأريخ العمري لمظاهر الطاقة الحرارية الأرضية، والعديد من التقنيات الأخرى في العديد من المواقع والآبار لتحقيق نموذج موثوق به.

يمكن أن يوفر تطبيق التقنيات الجيولوجية نظرة ثاقبة حول سلوك وتطور نظام الطاقة الحرارية الأرضية الذي يتحكم فيه عن طريق الصدع النشط. يجري أيضاً تقييم توزيع النفاذية وأنماط تدفق السوائل وتوزيع الصدوع في المنطقة في البيئات الجيولوجية.

## • الطرق الجيوكيميائية

تستخدم الأساليب الجيوكيميائية على نطاق واسع وتؤدي دوراً رئيسيّاً في التنقيب الأولي عن موارد الطاقة الحرارية الأرضية. تؤدي الدراسة الجيوكيميائية أيضاً دوراً مُهمّاً في الاستكشاف والاستغلال. الهدف الرئيسي من الاستكشاف الجيوكيميائي هو الحصول على التركيب الجوفي للسوائل في نظام الطاقة الحرارية الأرضية. تعطي التركيبة المختلفة للسوائل معلومات مفصلة حول درجة حرارة الينابيع الساخنة، وأصل الينابيع الساخنة واتجاه التدفق. تعمل البيانات الكيميائية للمياه الساخنة وتصريفات البخار كمؤشرات مفيدة لإمكانية إجراء مزيد من الاستكشاف في المنطقة بما في ذلك مواقع الحفر الأولية. تكامل المعلومات الهيكلية من الطرق الجيولوجية والهيدرولوجية والجيوفيزيائية، يمكن للدراسة الجيوكيميائية أن توجه اتخاذ القرار بشأن الاستكشاف تحت السطحي عن طريق الحفر البارامترى. يوفر التحليل الكيميائي للسوائل المستخرجة من أعماق مختلفة عن طريق الحفر معلومات مُهمَّة عن أنماط تدفق السوائل الجوفية. علاوة على ذلك، تعتبر المسوحات الجيوكيميائية غير مكلفة نسبيّاً عند مقارنتها بالمسوحات الجيوفيزيائية والتحقيقات الجوفية عن طريق الحفر؛ لذلك تُستخدم الأدوات الجيوكيميائية حالياً على نطاق واسع في جميع مراحل استكشاف وتطوير الطاقة الحرارية الأرضية. تُجرى الدراسات الجيوكيميائية للسوائل الحرارية بشكل رئيسي وفق ثلاث خطوات: أخذ عينات من الماء والغاز، تحليل السوائل، تفسير البيانات. الهدف الرئيسي من الدراسة هو إجراء التحليل الجيوكيميائي لعينات المياه متبوعاً بتركيب البيانات الجيوكيميائية من أجل التأكد من طبيعة مصادر مياه الينابيع الحرارية وتفسير مختلف الظروف والعمليات الجوفية التي تتحكم في كيمياء المياه. إن التحليل الجيوكيميائي مفيد لتقييم درجات حرارة الخزان وظروف التوازن باستخدام مقاييس حرارة أرضية مختلفة.

# مصـــادر الطاقـــة الحراريـــة الأرضيـــة

في الفيزياء، الطاقة هي قدرة نظام مادي على القيام بعمل على أنظمة فيزيائية أخرى. هناك العديد من أشكال الطاقة المختلفة بما في ذلك الطاقة الميكانيكية (المحتملة، والحركية) والحرارية والكهربائية والكيميائية والنووية. يمكن فهم الطاقة الحرارية على أنها الحركة العشوائية للذرات والجزيئات. يمكن تحويل أشكال الطاقة المختلفة من واحدة إلى أخرى. على سبيل المثال، يجري تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية في محرك الاحتراق. ويتحول إشعاع الحرارة الشمسية في النظام الكهروضوئي إلى تيار كهربائي. نتج التمييز بين أشكال الطاقة المتجددة وغير المتجددة عن الرؤية المتزايدة بأن موارد الطاقة الطبيعية محدودة. تشمل أنواع الطاقة غير المتجددة، التي تسمى أيضاً موارد الطاقة الأحفورية، الفحم والنفط والغاز والوقود النووي، مثل (اليورانيوم). تتجدد هذه الأشكال من الطاقة في نطاقات زمنية ليست مثيرة للاهتمام لنظام الاقتصاد البشري الحالي. تعتبر الطاقة الشمسية ممثل نموذجي للطاقة المتجددة. إن الإشعاع المنبعث من الشمس الناتج عن العمليات النووية الشمسية غير محدود ويستمر إلى الأبد من منظور الإنسان مع أنّ العمليات على الشمس ستتوقف عند استخدام الوقود النووي بالكامل. يمكن تحويل الطاقة الإشعاعية التي تصل إلى الأرض إلى كهرباء (كهروضوئية) أو حرارة (حرارة شمسية). كما أن طاقة الرياح والطاقة الكهرومائية والكتلة الحيوية (الأخشاب ومحطات الطاقة) مشتقة في النهاية من الطاقة الشمسية. هذه الأشكال من الطاقة محدودة فقط بكمية الإشعاع التي تصل الأرض من الشمس بشرط استخدامها بطريقة مستدامة.

الطاقة متجددة بمعنى أن الشمس تغذي الطاقة المستهلكة في شكل ما، على سبيل المثال حطب النار والطاقة المحتملة للمياه في خزان كل يوم ولبعض الوقت.

لاحظ أيضاً أن أشكال الطاقة الأحفورية غير المتجددة مثل الفحم والنفط تمثل الطاقة الشمسية المخزنة. كما يجري تجديد أشكال الطاقة هذه مع أن المقاييس الزمنية ليست مثيرة للاهتمام للعمليات الاقتصادية البشرية قصيرة العمر. أما الطاقة الحرارية الأرضية، فإنّ الحرارة في باطن الأرض هي طاقة لا ترتبط بالطاقة الشمسية، ولكنها في النهاية تشكلت بوساطة طاقة الجاذبية والانحلال الإشعاعي للذرات غير المستقرة. إنها متجددة بمعنى أن هناك كمية كبيرة جدّاً من الحرارة مخزنة في جسم الكوكب ولا يمكن للاستهلاك البشري أن يستنفد خزان الطاقة هذا.

# تقييم الأثر البيئي على الطاقة الحرارية الأرضية

الطاقة الحرارية الأرضية هي الطاقة المستمدة من الحرارة من باطن الأرض. يمكن عقد هذه الحرارة في الماء الساخن أو البخار أو في الصخور نفسها وتمثل طاقة هائلة محتملة الموارد، التي تقدر بأكثر من 300 مرة الطاقة الموجودة في الوقود الأحفوري (Armstead & تستر، 1987م). ونظرًا للانخفاض الكبير في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بها

الطاقة الحرارية الأرضية عند مقارنتها باستخدام الوقود الأحفوري، فإن الطاقة الحرارية الأرضية غالبًا ما تكون توصف بأنها طاقة نظيفة ولكن لا تزال هناك آثار بيئية يجب مراعاتها فيما يتعلق باستغلالها. تختلف محطات الطاقة الحرارية الأرضية من حيث التكنولوجيا التي تستخدمها لتحويل المورد إلى كهرباء ونوع تقنية التبريد التي تستخدمها (المبردة بالماء والمبردة بالهواء).

على الرغم من أن هناك بالتأكيد تأثيرات بيئية مرتبطة بالطاقة الحرارية الأرضية فهي عموما أكثر حميدة من تلك المرتبطة بالطاقة الأخرى , تقنيات التوليد، وخاصة الأحفوري والنووي. بشكل عام، تكون التأثيرات البيئية لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية واستخدامها المباشر طفيفة، يمكن السيطرة عليها، أو لا تذكر. يجب أن يكون هناك الامتثال الكامل للوائح البيئية، والتي قد تختلف من بلد إلى آخر. آثار الطاقة الحرارية الأرضية يمكن إدارة الاستخدام والتقليل منه من خلال الدراسة المتأنية باعتبار تقييم الأثر البيئي (EIA) قبل تطوير الموقع ومن خلال تنفيذ بيئية نظام الإدارة (EMS) خلال تشغيل المخطط.

## • جـــودة الميـــاه واســـتهلاكها

يمكن أن يكون لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية تأثيرات على جودة المياه واستهلاكها. غالبًا ما تحتوي المياه الساخنة التي يتم ضخها من الخزانات

الجوفية على مستويات عالية من الكبريت والملح والمعادن الأخرى. تحتوي معظم مرافق الطاقة الحرارية الأرضية على أنظمة مياه ذات حلقة مغلقة، حيث يتم ضخ المياه المستخرجة مباشرة إلى خزان الطاقة الحرارية الأرضية بعد استخدامها لإنتاج الحرارة أو الكهرباء. في مثل هذه الأنظمة، يتم احتواء المياه داخل أغلفة الآبار الفولاذية المثبتة على الصخور المحيطة.

وتستخدم محطات الطاقة الحرارية الأرضية المياه أيضًا للتبريد وإعادة الحقن. اعتمادًا على تقنية التبريد المستخدمة، يمكن أن تتطلب محطات الطاقة الحرارية الأرضية ما بين 1700 إلى 4000 جالون من الماء لكل ميجاوات في الساعة. ومع ذلك، يمكن لمعظم محطات الطاقة الحرارية الأرضية استخدام السوائل الحرارية الأرضية أو المياه العذبة للتبريد؛ من الواضح أن استخدام سوائل الطاقة الحرارية الأرضية بدلاً من المياه العذبة يقلل من التأثير المائي الإجمالي للنباتات.

تقوم معظم محطات الطاقة الحرارية الأرضية بإعادة حقن المياه في الخزان بعد استخدامها لمنع التلوث وهبوط الأرض. ومع ذلك، في معظم الحالات، لا يتم إعادة حقن كل المياه التي تمت إزالتها من الخزان، لأن بعضها يُفقد على شكل بخار. ومن أجل الحفاظ على حجم ثابت من الماء في الخزان، يجب استخدام المياه الخارجية. تعتمد كمية المياه اللازمة على حجم النبات والتكنولوجيا المستخدمة؛ ومع ذلك، نظرًا لأن مياه الخزان «قذرة»، فليس من الضروري في كثير من الأحيان استخدام المياه النظيفة لهذا الغرض.

## • انبعاثات الهواء

يعد التمييز بين أنظمة الحلقة المفتوحة والمغلقة أمرًا مهمًا فيما يتعلق بالانبعاثات الهوائية. وفي أنظمة الحلقة المغلقة، لا تتعرض الغازات التي يتم إزالتها من البئر إلى الغلاف الجوي، ويتم حقنها مرة أخرى في الأرض بعد التخلص

من حرارتها، وبالتالي تكون انبعاثات الهواء في حدها الأدنى. في المقابل، تصدر أنظمة الحلقة المفتوحة كبريتيد الهيدروجين، وثاني أكسيد الكربون، والأمونيا، والميثان، والبورون. ويعد كبريتيد الهيدروجين، الذي له رائحة «البيضة الفاسدة» المميزة، هو أكثر الانبعاثات شيوعًا.

بمجرد وجوده في الغلاف الجوي، يتغير كبريتيد الهيدروجين إلى ثاني أكسيد الكبريت (SO2). وهذا يساهم في تكوين جزيئات حمضية صغيرة يمكن أن يمتصها مجرى الدم وتسبب أمراض القلب والرئة. ويتسبب ثاني أكسيد الكبريت أيضًا في هطول أمطار حمضية، مما يؤدي إلى إتلاف المحاصيل والغابات والتربة، وتحمض البحيرات والجداول. ومع ذلك، فإن انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت الصادرة عن محطات الطاقة الحرارية الأرضية أقل بنحو 30 مرة لكل ميجاوات/ساعة من محطات الفحم، التي تعد أكبر مصدر لثاني أكسيد الكبريت في البلاد.

## • اســـتخدام الأراضـــي

تختلف مساحة الأرض التي تحتاجها محطة الطاقة الحرارية الأرضية اعتمادًا على خصائص خزان الموارد، وكمية الطاقة، ونوع نظام تحويل الطاقة، ونوع نظام التبريد، وترتيب الآبار وأنظمة الأنابيب، والمحطة الفرعية واحتياجات البناء المساعدة. هبوط الأرض، وهي ظاهرة يغوص فيها سطح الأرض، يحدث أحيانًا بسبب إزالة المياه من خزانات الطاقة الحرارية الأرضية. تعالج معظم مرافق الطاقة الحرارية الأرضية هذا الخطر عن طريق إعادة حقن مياه الصرف الصحي مرة أخرى في خزانات الطاقة الحرارية الأرضية بعد احتجاز حرارة المياه.

# الطاقة الحيوية

تعد الكتلة الحيوية Biomass مادة عضوية متجددة تأتي من النباتات والحيوانات. ويمكن حرقها لإنتاج الحرارة والكهرباء أو تحويلها إلى وقود حيوي مثل الديزل الحيوي والإيثانول، والذي يمكن استخدامه لتشغيل المركبات. يختلف التأثير المناخي للطاقة الحيوية بشكل كبير اعتمادًا على مصدر المواد الأولية للكتلة الحيوية وكيفية زراعتها. على سبيل المثال، يؤدي حرق الخشب للحصول على الطاقة إلى إطلاق ثاني أكسيد الكربون؛ ويمكن تعويض هذه الانبعاثات بشكل كبير إذا تم استبدال الأشجار التي تم حصادها بأشجار جديدة في غابة تدار بشكل جيد، حيث أن الأشجار الجديدة سوف تمتص ثاني أكسيد الكربون من الهواء أثناء نموها.

تعد الكتلة الحيوية تقنية ناضجة تمامًا توفر آلية التخلص الجاهزة من النفايات العضوية البلدية والزراعية والصناعية. ومع ذلك، ظلت الصناعة راكدة نسبيًا على مدار العقد المنتهي في عام 2007م، على الرغم من استمرار نمو الطلب على الكتلة الحيوية (معظمها من الخشب) في العديد من البلدان النامية. إحدى مشاكل الكتلة الحيوية هي أن المواد التي يتم حرقها مباشرة في مواقد الطهي تنتج ملوثات، مما يؤدي إلى عواقب صحية وبيئية وخيمة، على الرغم من أن برامج مواقد الطهي المحسنة تخفف من بعض هذه الآثار. يمكن أن تكون تقنيات الكتلة الحيوية من الجيل الأول قادرة على المنافسة اقتصاديًا، ولكنها قد تظل بحاجة إلى دعم النشر للتغلب على القبول العام والقضايا الصغيرة النطاق (Stonge, 2011). لقد تم استخدام حرق أو حرق المواد البيولوجية مثل المواد الخشبية منذ فترة طويلة لتوفير الدفء. وتشير التقديرات إلى أنه في أواخر القرن الثامن عشر الميلادي، كان ما يقرب من ثلثي حجم الأخشاب التي

تمت إزالتها من الغابة الأمريكية يستخدم لتوليد الطاقة. ونظرًا لأن الخشب كان واحدًا من مصادر الطاقة المتجددة القليلة التي يمكن استغلالها بسهولة في ذلك الوقت، فقد استمر استخدامه في النمو. خلال القرن التاسع عشر، استهلكت الأسر الفردية ما بين 70 إلى 145 مترًا مكعبًا من الخشب سنويًا للتدفئة والطهي.

## • أنـــواع الوقـــود الحيـــوي

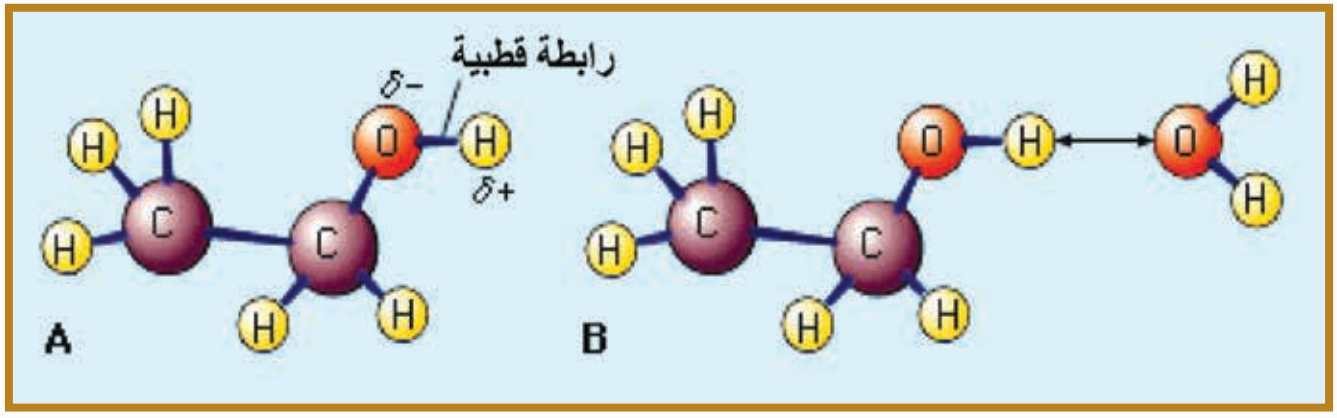
يمكن استخدام بعض أنواع الوقود الحيوي التي تم استغلالها منذ فترة طويلة، مثل الخشب، مباشرة كمادة خام يتم حرقها لإنتاج الحرارة. ويمكن استخدام الحرارة بدورها لتشغيل المولدات في محطة توليد الكهرباء لإنتاج الكهرباء. يقوم عدد من مرافق الطاقة الحالية بحرق العشب أو الخشب أو أنواع أخرى من الكتلة الحيوية. ويحظى الوقود الحيوي السائل بأهمية خاصة بسبب البنية التحتية الهائلة الموجودة بالفعل لاستخدامه، وخاصة في وسائل النقل. الوقود الحيوي السائل الأكثر إنتاجًا هو الإيثانول (الكحول الإيثيلي)، والذي يتم تصنيعه عن طريق تخمير النشا أو السكر.

ثاني أكثر أنواع الوقود الحيوي السائل شيوعًا هو وقود الديزل الحيوي، والذي يتم تصنيعه بشكل أساسي من النباتات الزيتية (مثل فول الصويا أو زيت النخيل) وبدرجة أقل من مصادر زيتية أخرى (مثل نفايات دهون الطهي الناتجة عن القلي العميق في المطاعم). يستخدم وقود الديزل الحيوي، الذي وجد قبولا أكبر في أوروبا، في محركات الديزل وعادة ما يتم مزجه مع وقود الديزل النفطي بنسب مختلفة. وتشمل أنواع الوقود الحيوي الأخرى غاز الميثان ـ الذي يمكن استخلاصه من تحلل الكتلة الحيوية في غياب الأكسجين ـ والميثانول، والبيوتانول، وثنائي ميثيل الإيثر ـ التي هي قيد التطوير. في الوقت الحاضر، ينصب الكثير من التركيز على تطوير طرق لإنتاج الإيثانول من الكتلة الحيوية التي تحتوي

على نسبة عالية من السليلوز. يمكن إنتاج هذا الإيثانول السليولوزي من مواد وفيرة منخفضة القيمة، بما في ذلك رقائق الخشب والأعشاب وبقايا المحاصيل والنفايات البلدية. مما لا شك فيه أن مزيج الوقود الحيوي المستخدم تجارياً سوف يتغير مع تطور أنواع الوقود هذه، ولكن مجموعة الإمكانيات المعروفة حالياً يمكن أن توفر الطاقة اللازمة للنقل والتدفئة والتبريد والكهرباء.

## • تصنيـــع الإيثانـــول

الإيثانول هو عضو في فئة المركبات العضوية التي يطلق عليها الاسم العام للكحولات؛ صيغته الجزيئية هي $C_2H_5OH$. يعد الكحول الإيثيلي مادة كيميائية صناعية مهمة، حيث يستخدم كمذيب وفي تركيب مواد كيميائية عضوية أخرى، بالإضافة إلى كونه مادة مضافة لبنزين السيارات لصنع الغازوهول.




(A) هيكل الإيثانول. (B) التفاعل بين الإيثانول وجزيئات الماء (Curley, 2012)

هناك عمليتان رئيسيتان لتصنيع الكحول الإيثيلي. تخمير الكربوهيدرات هو الطريقة المستخدمة لصنع المشروبات الكحولية وكذلك معظم الإيثانول المستخدم كوقود حيوي. ومع ذلك، يمكن أيضًا إنتاج الإيثانول عن طريق ترطيب الإيثيلين، والذي يتم الحصول عليه بدوره من البترول. يتضمن التخمير تحويل

الكربوهيدرات إلى كحول إيثيلي عن طريق زراعة خلايا الخميرة. المواد الخام الرئيسية المخمرة لإنتاج الكحول الصناعي هي محاصيل السكر مثل البنجر وقصب السكر ومحاصيل الحبوب مثل الذرة. يتم تحقيق ترطيب الإيثيلين عن طريق تمرير خليط من الإيثيلين وكمية كبيرة من البخار عند درجة حرارة عالية وضغط فوق محفز حمضي. يتم الحصول على الكحول الإيثيلي الناتج إما عن طريق التخمير أو عن طريق التوليف كمحلول مائي مخفف ويجب تركيزه عن طريق التقطير التجزيئي. يمكن أن ينتج عن التقطير المباشر في أفضل الأحوال خليط ذو درجة غليان ثابتة يحتوي على 95.6 بالمائة بالوزن من الكحول الإيثيلي. يؤدي تجفيف الخليط ذو نقطة الغليان الثابتة إلى إنتاج كحول لا مائي أو مطلق. الكحول الإيثيلي النقي هو سائل عديم اللون وقابل للاشتعال (درجة الغليان 78.5 %) ذو رائحة أثيرية مقبولة وطعم حارق.

## • التحويـــل الحـــراري

هناك خمس طرق حرارية تستخدم عادة لتحويل الكتلة الحيوية إلى وقود بديل: الاحتراق المباشر، والتغويز، والتسييل، والانحلال الحراري، والأكسدة الجزئية. عندما يتم تسخين الكتلة الحيوية في ظل ظروف نقص الأكسجين، فإنها تولد غازًا صناعيًا، أو غازًا صناعيًا، والذي يتكون بشكل أساسي من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون. يمكن حرق هذا الغاز الاصطناعي مباشرة أو معالجته بشكل أكبر للحصول على منتجات غازية أو سائلة أخرى. وبهذا المعنى، فإن التحويل الحراري أو الكيميائي للكتلة الحيوية يشبه إلى حد كبير تحويل الفحم.

## ▪ الاحتراق المباشر

وقد تسبب الحرق الداخلي لوقود الكتلة الحيوية في أماكن الطهي والتدفئة غير المهواة في مشاكل صحية كبيرة للمستخدمين المباشرين، وفي المقام الأول النساء والأطفال في البلدان النامية. وقود الكتلة الحيوية، عند استخدامه بشكل غير صحيح بهذه الطريقة، يطلق كميات كبيرة من الغازات السامة أو الخطرة في المنطقة غير المهواة. هذه الغازات هي، عادة، أول أكسيد الكربون (CO)، وأكاسيد النيتروجين (NOx)، والهيدروكربونات، والمواد العضوية، والألدهيدات، وكميات ضئيلة من العطريات والكيتونات. ومع زيادة محتوى الرطوبة في الخشب، ومع استخدام أنواع وقود الكتلة الحيوية الأخرى ذات المحتوى المنخفض من الطاقة (مثل نفايات الحيوانات والمحاصيل)، تزداد الانبعاثات. تحترق المكونات الخشبية للكتلة الحيوية بشكل أكثر كفاءة أثناء الاحتراق الكامل. في الأفران الترابية في البلدان النامية، يخضع الخشب لاحتراق غير كامل، مما يؤدي إلى إطلاق أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون وأكسيد النيتروز. عندما يتم الحرق المباشر للكتلة الحيوية في منطقة جيدة التهوية، يمكن أن يكون حرق الكتلة الحيوية المستخدم في المواقد والغلايات المنزلية بديلاً سليمًا لحرق الوقود الأحفوري التقليدي. تكون انبعاثات الكبريت (0.05 إلى 0.2 % بالوزن) أقل بكثير وتكون نسبة يمكن التحكم في تكوين الجسيمات من المصدر. على نطاق أوسع، يتم تقليل الكتلة الحيوية إلى قطع دقيقة للاحتراق في توربينات قريبة. في النظام المقترن، يتم فصل التوربين عن غرفة الاحتراق بواسطة مرشح.

## ▪ التغويز

إن التغويز Gasification ليس تكنولوجيا جديدة؛ ومع ذلك، فإن استخدامه لتحويل الكتلة الحيوية إلى وقود قابل للحياة لم يتم دراسته إلا على مدار الثلاثين عامًا الماضية. يمكن إنتاج الغاز الاصطناعي من الكتلة الحيوية بشكل

أساسـي مـن خـلال فئتـين عريضتـين مـن العمليـات الكيميائيـة والحراريـة، وهمـا الطـرق التحفيزيـة والعمليـات غيـر التحفيزيـة. عـادةً، تتطلـب العمليـات غيـر التحفيزيـة درجـة حـرارة تشـغيل عاليـة جـدًا، تصـل إلـى 1300 %، في حـين يمكـن تشـغيل العمليـات التحفيزيـة عنـد درجـات حـرارة أقـل بكثيـر. ومـع التقـدم في مجـال الحفـز الكيميائـي، مـن المتوقـع أن تنخفـض درجـة الحـرارة المطلوبـة أكثـر مـن القيمـة الحاليـة البالغـة حوالـي 900 درجـة مئويـة. كان النظـام الأول الـذي تم فحصـه علـى المسـتوى التجريبـي عبـارة عـن طبقـة مميعـة تحتـوي علـى حطـب الـذرة الجـاف الخالـي مـن الرمـاد (DAF) كعلـف. تم اختيـار حطـب الـذرة كعلـف منـذ عـام 1977، عندمـا تجـاوز الإنتـاج السـنوي مـن "مخلفـات محصـول الـذرة" 300 مليـون طـن.

VEGA هـو نظـام IGCC يعتمـد علـى الكتلـة الحيويـة ويجمـع بـين الحـرارة والطاقـة (CHP) لنظـام تدفئـة المنطقـة.22 ويولـد 6.0 ميجـاوات و9.0 ميجـاوات لتدفئـة المناطـق في مدينـة فامامـو، السـويد. حيـث تتـم إزالـة الرطوبـة مـن خـام تغذيـة الكتلـة الحيويـة الداخلـة عبـر «مجفـف الوقـود الحيـوي Biofuel Dryer» لتقليـل الانبعاثـات الغازيـة. يتـم بعـد ذلـك تحويـل الكتلـة الحيويـة المجففـة إلـى «وقـود حيـوي» في جهـاز تغويـز الـدورة المركبـة. يتـم تبريـد الغـاز النـاتج قبـل دخولـه إلـى غلايـة اسـتعادة الحـرارة وتوزيعـه علـى التدفئـة المركزيـة. يُعـرف جهـاز التغويـز باسـم Bioflow Gasifier. الطريقـة الأكثـر شـيوعًا لتغويـز الكتلـة الحيويـة هـي اسـتخدام جهـاز تغويـز بطبقـة مميعـة يتـم نفخهـا بالهـواء مـع مُصلـح حفـاز، علـى الرغـم مـن وجـود العديـد مـن الاختلافـات المختلفـة. تسـتخدم معظـم عمليـات تحويـل الطبقـة المميعـة إلـى غـاز احتراقًـا مغلقًـا مـع القليـل جـدًا مـن تنظيـف الغـاز المتوسـط أو لا يوجـد أي تنظيـف علـى الإطـلاق.

يتـم تشـغيل هـذا النـوع مـن العمليـات عـادةً عنـد حوالـي 900 درجـة مئويـة، ويحتـوي الغـاز النـاتج مـن جهـاز التغويـز علـى $H_2$ و$CO$ و$CO_2$ و$H_2O$ و$CH_4$ و$C_2H_4$

والبنزين والقطران. يستخدم التغويز الأكسجين (أو الهواء) والبخار للمساعدة في تحويل العملية، على غرار تغويز الفحم. يحتوي الغاز المتدفق من جهاز تغويز الطبقة المميعة على كمية مناسبة من تركيبات الغاز التخليقي، كما أن محتوى الهيدروكربون كبير جدًا أيضًا. لذلك، لا يمكن استخدام الغاز المتدفق من جهاز التغويز بشكل مباشر كغاز اصطناعي لمزيد من المعالجة لأنواع الوقود السائل أو المواد الكيميائية الأخرى دون خطوات تنقية رئيسية.

هذا هو السبب وراء اقتران جهاز التغويز مع المصلح الحفاز، حيث يتم إعادة تشكيل الهيدروكربونات بشكل أكبر إلى غاز صناعي. في هذه المرحلة، يتم تقليل محتوى الهيدروكربون بما في ذلك الميثان بنسبة 95 % أو أفضل. ومن الأمثلة الناجحة للغاية على ذلك مشروع كريس غاز، وهو مشروع ممول من الاتحاد الأوروبي، والذي يقوم بتشغيل مفاعل تغويز مميع بقدرة 18 ميجاوات في فارنامو بالسويد.

التغويز غير المباشر هو تقنية أخرى لعملية التغويز تستفيد من الخصائص الفريدة المرتبطة بالكتلة الحيوية. على هذا النحو، فإن التغويز غير المباشر للكتلة الحيوية يختلف اختلافًا كبيرًا عن معظم تقنيات عملية التغويز المعتمدة على الفحم. على سبيل المثال، تحتوي الكتلة الحيوية على نسبة منخفضة من الكبريت والرماد، كما أنها شديدة التفاعل ومتطايرة. في عملية التغويز غير المباشرة، يتم تسخين الكتلة الحيوية بشكل غير مباشر باستخدام وسائل خارجية مثل الرمال الساخنة في عملية باتيل. يكون المنتج الغازي النموذجي من جهاز تغويز غير مباشر قريبًا من غاز Btu المتوسط.

الفصل البرجي Torrefaction عبارة عن معالجة حرارية خفيفة عند درجة حرارة تتراوح من 250 إلى 300 درجة مئوية، والتي تحول الكتلة الحيوية الصلبة

إلى مادة أكثر هشاشة وسهلة السحق ويمكن معالجتها والتعامل معها تمامًا مثل الفحم. غالبًا ما يُطلق على هذا المنتج المُحرق اسم الفحم الحيوي. وبالتالي، يمكن معالجة الكتلة الحيوية المفصولة برجيًا مثل الفحم، ويمكن تحويل معظم أجهزة تحويل الغاز ذات التدفق المحبوس المصممة للفحم بسلاسة إلى فحم حيوي معذب دون الكثير من التكيف.

لقد تم استخدام عملية الفصل البرجي منذ فترة طويلة في العديد من التطبيقات، بما في ذلك صناعة القهوة. ومع ذلك، هناك حاجة إلى مزيد من الدراسات من قبل صناعة الكتلة الحيوية لضبط عملية الكتلة الحيوية وتحسينها كتقنية معالجة مسبقة فعالة. يمكن استخدام الغازات المنتجة أثناء عملية التنقية في عملية التنقية، وبالتالي إنجاز دورة إمداد الطاقة الذاتية. يمكن العثور على مثال على تغويز الكتلة الحيوية ذات التدفق المحصور من محطة Buggenum IGCC، التي تبلغ قدرتها 250 ميجاوات.

يعد الانحلال الحراري للكتلة الحيوية خيارًا مهمًا للعملية، إما كمعالجة مسبقة للتغويز أو كمعالجة عملية مستقلة. يحدث الانحلال الحراري بشكل نشط عند حوالي 500 % وينتج منتجًا سائلًا يسمى الزيت الحيوي. كما يمكن رؤيته من درجة حرارة الانحلال الحراري السائدة، فإن الانحلال الحراري للكتلة الحيوية يشبه تمامًا، كمعالجة عملية، الانحلال الحراري للصخر الزيتي والانحلال الحراري للفحم. عادةً ما يتم إنتاج الزيت الحيوي عن طريق الانحلال الحراري للكتلة الحيوية عن طريق الانحلال الحراري الوميضي. يمكن خلط الزيت الناتج مع الفحم لإنتاج ملاط حيوي. يعتمد مفهوم العملية على عملية تغويز الفحم Lurgi-Ruhrgas، كما تمت مناقشته في الفصل 2. تتوفر وحدة PDU (وحدة تطوير العملية) بقدرة 5–10 كجم/ساعة في موقع شركة FZK. في هذه العملية، يتم تحلل القش حراريًا إلى سائل يتم مزجه مع الفحم لتكوين ملاط

الزيت الحيوي/الفحم. الملاط قابل للضخ ويخفف من الصعوبات التقنية التي ينطوي عليها التعامل مع الكتلة الحيوية الصلبة. يتم نقل هذا الملاط وإضافته إلى جهاز تغويز منفوخ بالأكسجين المضغوط. تتضمن ظروف التشغيل لجهاز التغويز في فرايبيرج إنتاجية ملاط تتراوح من 0.35 إلى 0.6 طن/يوم، و26 بارًا، و1200 إلى 1600 %.

تتضمن مفاهيم عملية FZK الحالية تغويز المنتجات الخشبية المتحللة حرارياً بالوميض، وملاط فحم القش المتحلل ببطء (مع مكثفات الماء)، وملاط فحم القش المتحلل ببطء (مع زيت الانحلال الحراري السريع) 46 وقد تم تحويل الملاط من القش بكفاءة إلى غاز اصطناعي مع تحويل عالي ومحتوى من الميثان قريب من الصفر. هدفهم النهائي هو تطوير محطة فعالة لتحويل الكتلة الحيوية إلى سائل (BtL). كما حظيت التطورات الكندية في تغويز الكتلة الحيوية لإنتاج غازات متوسطة وعالية وحدة حرارية بريطانية بإشادة فنية عالمية. تم تطوير عملية التغويز BIOSYN بواسطة شركة Biosyn Inc.، وهي شركة تابعة لشركة Nouveler Inc، وهي قسم من شركة Hydro-Quebec.

تعتمد العملية على جهاز تغويز ذو طبقة مميعة فقاعية يحتوي على طبقة من السيليكا (أو الألومينا) ويمكن تشغيله عند ضغط يصل إلى 1.6 ميجا باسكال. لقد قاموا باختبار العملية على نطاق واسع من عام 1984 إلى عام 1988م في محطة تجريبية بقدرة 10 طن/ساعة تشتمل على جهاز تغويز بطبقة مميعة بهواء مضغوط أو تغذية بالأكسجين. يتمتع النظام بالقدرة على استخدام مجموعة متنوعة من المواد الأولية بما في ذلك الكتلة الحيوية الكاملة، والكتلة الحيوية المجزأة، والجفت، والنفايات البلدية الصلبة. الاستخدام النهائي الأساسي للغاز الحيوي هو استبدال الزيت المستخدم حاليًا في الغلايات الصناعية.

كمـا أن لديهـا القـدرة الإضافيـة علـى إنتـاج الغـاز الاصطناعـي للميثانـول أو إنتاج الغـاز منخفض الطاقة. في السنوات التالية، استخدموا وحدة PDU للتغويز BIOSYN بقدرة 50 كجم/ساعة، وأثبتت أيضًا جدوى تحويل مجموعة متنوعة من المواد الأولية الأخرى إلى غاز، مثل الحمأة الأولية، وRDF، وبقايا المطاط التي تحتوي على 5-15 % كيفلر، والبولي إيثيلين المحبب، والبولي بروبلين.

## ▪ التســـــييل

خـلال منتصـف وأواخـر الثمانينـات، تركـز الاهتمـام التجـاري بالتحويـل الكيميائـي الحـراري للكتلـة الحيويـة علـى الإسـالة. وخلافًـا لدراسـات التغويـز الأوليـة، اسـتخدمت دراسـات التميـع الأوليـة الكتلـة الحيويـة الخشـبية، أو مـادة الليجنوسـليلوز، كمـادة وسـيطة. واعتبـرت الكتلـة الحيويـة الخشـبية متفوقـة علـى الكتلـة الحيويـة لحطـب الـذرة بسـبب تكلفتهـا المنخفضـة المحتملـة وتوافرهـا بشـكل أكبـر.

يتـم إرسـال الجـزء الصلـب، مـادة السـليلوز واللجنـين، مباشـرة إلـى وحـدة التخميـر. بعـد مغـادرة وحـدة التخميـر، تتـم إزالـة مكونـات اللجنـين لتوليـد حـرارة العمليـة والكهربـاء. ثـم يتـم إرسـال المـواد المتبقيـة إلـى وحـدة التقطيـر. مـن نتائـج المصنـع التجريبـي، يبلـغ إنتـاج الإيثانـول مـن المـواد الأوليـة السـليلوز والهيميسـيلولوز حوالـي 110 جالـون مـن الإيثانـول لـكل طـن مـن الخشـب.

## ▪ التحـــــلل الحـــــراري

يمكـن تحويـل الكتلـة الحيويـة إلـى غـاز وسـائل وفحـم عـن طريـق الانحـلال الحـراري. تعتمـد النسـبة الدقيقـة للمنتجـات النهائيـة علـى عمليـة الانحـلال الحـراري المسـتخدمة (أي درجـة الحـرارة والضغـط ومـا إلـى ذلـك). خـلال أوائـل

الثمانينات، قام المختبر الوطني للطاقة المتجددة (NREL) بالتحقيق في استخدام الانحلال الحراري الاستئصالي لتحويل الكتلة الحيوية. التكنولوجيا وراء الانحلال الحراري للكتلة الحيوية مماثلة لتلك المستخدمة في صناعة النفط. تم إنتاج الخام الحيوي الأول بمقياس 30 كجم/ساعة.18 في ظروف تشغيل تبلغ 500 درجة مئوية ووقت بقاء قدره ثانية واحدة، كان للخام الحيوي نفس محتوى الأكسجين والطاقة مثل نظيره «الخام الطبيعي».

ومع ذلك، فإن التخوف من أن ارتفاع تكاليف نقل الكتلة الحيوية إلى المُحلل الحراري سوف يفوق الأرباح المحتملة، مما حد من تمويل الأبحاث للسنتين القادمتين. حدث ذلك عندما كان سعر الوقود السائل المعتمد على النفط أقل بكثير مما كان عليه في القرن الحادي والعشرين. للتحايل على هذه المشكلة، قامت شركة موارد الطاقة (ERCO) في ماساتشوستس بتطوير نموذج أولي متنقل للتحلل الحراري لصالح وكالة حماية البيئة الأمريكية.

المنتجات النهائية هي الزيت الحراري والفحم الحراري، وكلاهما أكثر اقتصادا في النقل من المواد الأولية للكتلة الحيوية الأصلية. يبلغ متوسط قيم التسخين للزيت الحراري والفحم 10000 وحدة حرارية بريطانية/رطل و12000 وحدة حرارية بريطانية/رطل على التوالي. لا يعتبر غاز الانحلال الحراري، الذي تبلغ قيمته الحرارية الاسمية 150 وحدة حرارية بريطانية/ قدم مكعب، منتجًا نهائيًا لأنه يستخدم مباشرة في نظام التوليد المشترك للطاقة.

نظام التغويز والانحلال الحراري المزدوج الأكثر دراسة على نطاق واسع هو عملية الهيدروكربونات. تركز عملية الهيدروكارب على تكوين أنظمة التغويز والانحلال الحراري لتحويل الكتلة الحيوية المختلطة والمواد الأولية للغاز الطبيعي إلى ميثانول وبنزين وفحم.

## تجمع العملية بين ثلاث خطوات أساسية:

- محلل مائي يتم فيه تغويز الكتلة الحيوية بغاز غني بالهيدروجين مُعاد تدويره لتكوين غاز غني بالميثان.
- محلل حراري للميثان حيث يتحلل الميثان إلى الكربون والهيدروجين.
- مفاعل تصنيع الميثانول حيث يتم دمج أول أكسيد الكربون حفزيًا مع الهيدروجين لتكوين الميثانول.

حافظت الدراسات الأولية على جهاز التغويز عند 800 درجة مئوية، ومحول الميثانول عند 260 درجة مئوية، ومفاعل الانحلال الحراري عند 1100 %. عندما يكون ضغط النظام في الخطوة 3 من العملية 50 ضغطًا جويًا عند درجات الحرارة المقابلة. لكل 100 كجم من الكتلة الحيوية و18 كجم من الميثان يتم تغذيتها بجهاز التغويز، تم إنتاج حوالي 67 كجم من الميثانول و40 كجم من الفحم.

إحدى مزايا هذه العملية هي أن الفحم الناتج هو في الأساس كربون «نقي». بمعنى آخر، فهو خالي من الكبريت والرماد والنيتروجين. ولذلك يمكن استخدامه كوقود نظيف في القطاع الصناعي.

ثانيًا، يؤدي تحويل الميثان إلى ميثانول في وجود الكتلة الحيوية إلى تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة عادةً بتغويز الميثان. ميزة أخرى هي إمكانية استبدال المواد الأولية بمواد أخرى.

ويمكن استبدال مكون الكتلة الحيوية بمواد كربونية أخرى، مثل النفايات البلدية الصلبة. ومن الممكن استبدال الميثان بالفحم. على الرغم من أن استبدال المواد الأولية لا يزال في المراحل الأولية، إلا أن الباحثين في مختبر بروكهافن الوطني (BNL) يتوقعون نتائج مماثلة (Lee et al., 2007).

# تقييم الأثر البيئي للطاقة الحيوية

إن إنشاء وزراعة محاصيل الطاقة الحيوية يمكن أن يؤدي إلى تهجير النظم البيئية الطبيعية، وتدهور التربة، واستهلاك موارد المياه والأسمدة الاصطناعية. يتم حصاد ما يقرب من ثلث جميع الأخشاب المستخدمة للتدفئة والطهي التقليدي في المناطق الاستوائية بشكل غير مستدام. تتطلب المواد الأولية للطاقة الحيوية عادةً كميات كبيرة من الطاقة لحصادها وتجفيفها ونقلها؛ قد يؤدي استخدام الطاقة لهذه العمليات إلى انبعاث غازات الدفيئة. في بعض الحالات، يمكن أن تؤدي تأثيرات تغيير استخدام الأراضي وزراعتها ومعالجتها إلى ارتفاع إجمالي انبعاثات الكربون من الطاقة الحيوية مقارنة باستخدام الوقود الأحفوري.

الطاقة الحيوية هي حل متعدد الاستخدامات ومرن للغاية ويمكن أن يساعد في مواجهة التحديات الرئيسية لتحقيق الحياد المناخي بحلول عام 2050م من خلال خلق فرص العمل والنمو الاقتصادي. يمكن أن يؤدي كل مليون طن إضافي من الكتلة الحيوية المستخدمة في الطاقة إلى تأثير قدره 359 مليون يورو من حيث الناتج المحلي الإجمالي وخلق فرص عمل تبلغ 7.376 مكافئ بدوام كامل Full-Time Equivalent (FTE) في المتوسط، مع منع 2.4 مليون طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون بسبب استبدال الوقود الأحفوري للطاقة. وفي الوقت الحالي، يعتمد ملايين المواطنين على الطاقة الحيوية لتدفئة منازلهم، ليس فقط من خلال أنظمة التدفئة الفردية ولكن أيضًا من خلال الأنظمة الجماعية، مثل تدفئة المناطق. علاوة على ذلك، فإن العديد من العمليات الصناعية، وخاصة في الصناعات المرتبطة بالأخشاب، مثل صناعات الورق ولب الورق، تعتمد على إعادة استخدام مخلفاتها لتوفير الطاقة لعملياتها. في المستقبل، سيزداد عدد المواطنين والصناعات التي تعتمد على استخدام الطاقة الحيوية حيث أن هناك حاجة إلى مزيد من التطوير لهذا المصدر المتجدد لتحقيق أهداف الانبعاثات في الاتحاد الأوروبي لعامي 2030م و2050م.

## ▪ فوائـــــد بيئيـــــة

يوفر الوقود الحيوي فوائد بيئية، ولكن اعتمادًا على كيفية تصنيعه، يمكن أن يكون له أيضًا عيوب بيئية خطيرة. وباعتباره مصدرا للطاقة المتجددة، فإن الوقود الحيوي النباتي من حيث المبدأ لا يساهم بشكل كبير في ظاهرة الانحباس الحراري العالمي وتغير المناخ؛ سيتم إزالة ثاني أكسيد الكربون (أحد الغازات الدفيئة الرئيسية) الذي يدخل الهواء أثناء الاحتراق من الهواء في وقت مبكر عندما تنخرط النباتات النامية في عملية التمثيل الضوئي. ويقال إن مثل هذه المواد «محايدة للكربون Carbon Neutral». ومع ذلك، من الناحية العملية، يمكن أن يؤدي الإنتاج الصناعي للوقود الحيوي الزراعي إلى انبعاثات إضافية من غازات الدفيئة التي قد تعوض فوائد استخدام الوقود المتجدد. وتشمل هذه الانبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتج عن حرق الوقود الأحفوري أثناء عملية الإنتاج وأكسيد النيتروز من التربة التي تمت معالجتها بالأسمدة النيتروجينية. وفي هذا الصدد، تعتبر الكتلة الحيوية السليولوزية أكثر فائدة.

في عام 2019م، أدى استبدال الوقود الأحفوري بالطاقة بالكتلة الحيوية إلى منع 290 مليون طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون، أي ما يعادل حوالي 8 % من انبعاثات الغازات الدفيئة في الاتحاد الأوروبي البالغ عددها 27 دولة. تساهم الطاقة الحيوية في إزالة الكربون من القطاعات كثيفة الاستخدام للوقود الأحفوري حيث يصعب تخفيف انبعاثات الكربون مثل قطاعي الصناعة والنقل.

من خلال استبدال الوقود الأحفوري بالطاقة الحيوية، سمح إنتاج الطاقة الأولية للطاقة الحيوية باستبدال 132 مليون طن مكافئ من الوقود الأحفوري في عام 2019م، مما قلل من الاعتماد على الدول الأجنبية في إمدادات الطاقة من خلال تعزيز موارد الطاقة المتجددة المحلية. يعد استخدام الأراضي أيضًا

عاملاً رئيسياً في تقييم فوائد الوقود الحيوي. تعتبر الذرة وفول الصويا من الأطعمة المهمة، وبالتالي فإن استخدامها في إنتاج الوقود يمكن أن يؤثر على اقتصاديات أسعار الغذاء وتوافره.

وبالإضافة إلى ذلك، يمكن للمحاصيل المزروعة من أجل الوقود الحيوي أن تتنافس على الموائل الطبيعية في العالم. على سبيل المثال، يؤدي التركيز على الإيثانول المشتق من الذرة إلى تحويل الأراضي العشبية والأراضي العشبية إلى زراعة الذرة الأحادية، كما يؤدي التركيز على وقود الديزل الحيوي إلى تدمير الغابات الاستوائية القديمة لإفساح المجال أمام مزارع النخيل. يمكن أن يؤدي فقدان الموائل الطبيعية إلى تغيير الهيدرولوجيا، وزيادة التآكل، وتقليل التنوع البيولوجي لمناطق الحياة البرية بشكل عام. يمكن أن يؤدي تطهير الأرض أيضًا إلى الإطلاق المفاجئ لكمية كبيرة من ثاني أكسيد الكربون حيث يتم حرق المادة النباتية التي تحتوي عليها أو تركها تتحلل.

تنطبق بعض عيوب الوقود الحيوي بشكل رئيسي على مصادر الوقود الحيوي منخفضة التنوع – الذرة وفول الصويا وقصب السكر ونخيل الزيت وهي محاصيل زراعية تقليدية. يتضمن أحد البدائل استخدام خليط شديد التنوع من الأنواع، مع اعتبار مروج أمريكا الشمالية الطويلة كمثال محدد. إن تحويل الأراضي الزراعية المتدهورة التي توقفت عن الإنتاج إلى مصادر الوقود الحيوي عالية التنوع يمكن أن يؤدي إلى زيادة مساحة الحياة البرية، والحد من التآكل، وتطهير الملوثات المنقولة بالمياه، وتخزين ثاني أكسيد الكربون من الهواء كمركبات كربون في التربة، وفي نهاية المطاف استعادة الخصوبة إلى الأراضي المتدهورة. ويمكن حرق هذا الوقود الحيوي مباشرة لتوليد الكهرباء أو تحويله إلى وقود سائل مع تطور التكنولوجيات. إن الطريقة الصحيحة لزراعة الوقود الحيوي لتلبية جميع الاحتياجات في وقت واحد سوف تظل موضع الكثير من التجارب والنقاشات، ولكن من المرجح أن يستمر النمو السريع في إنتاج الوقود الحيوي.

أحـد الوعـود المميـزة للوقـود الحيـوي هـو أنـه، بالاشـتراك مـع التكنولوجيـا الناشـئة التـي تسـمى احتجـاز الكربـون وتخزينـه، فـإن عمليـة إنتـاج واسـتخدام الوقـود الحيـوي قـد تكـون قـادرة علـى إزالـة ثانـي أكسـيد الكربـون مـن الغـلاف الجـوي بشـكل دائـم. وبموجـب هـذه الرؤيـة، سـتقوم محاصيـل الوقـود الحيـوي بإزالـة ثانـي أكسـيد الكربـون مـن الهـواء أثنـاء نموهـا، وسـتقوم منشـآت الطاقـة بالتقـاط ثانـي أكسـيد الكربـون المنبعث أثنـاء حـرق الوقـود الحيـوي لتوليـد الطاقـة. يمكـن عـزل ثانـي أكسـيد الكربـون المحتجـز (تخزينـه) في مسـتودعات طويلـة الأجـل مثـل التكوينـات الجيولوجيـة تحـت الأرض، أو في رواسـب أعمـاق المحيطـات، أو في صـورة مـواد صلبـة مثـل الكربونـات (Curley, 2012).

## ▪ النظـــــرة المستقبليـــــة

وبالنظـر إلـى السـيناريوهات التـي أبلـغ عنهـا تقييـم الأثـر التابـع للمفوضيـة الأوروبيـة، فـإن متوسـط الاسـتهلاك الداخلـي الإجمالـي للكتلـة الحيويـة للطاقـة سـيقترب مـن 220 مليـون طـن مكافـئ نفـط في عـام 2050م، ممـا يـدل علـى زيـادة سـنوية تبلـغ حوالـي 2 % بـين عامـي 2019م و 2050م. وهـذه الزيـادة السـنوية في الواقـع أقـل مـن وهـو مـا أظهرتـه الطاقـة الحيويـة في السـنوات العشـر الماضيـة، والـذي بلـغ حوالـي 2,6 %، ممـا يـدل علـى أن الزيـادة المسـتقبلية يمكـن أن تتوافـق مـع سـيناريو العمـل كالمعتـاد. إن الزيـادة في اسـتهلاك الكتلـة الحيويـة مـن أجـل الطاقـة يمكـن أن تكـون بمثابـة وسـيلة لخلـق فـرص العمـل وفرصـة اقتصاديـة للبلـدان في جميـع أنحـاء الاتحـاد الأوروبـي. وفقًـا للتقييـم الـذي تم إجـراؤه، فـإن كل مليـون طـن إضـافي مـن الكتلـة الحيويـة لإنتـاج الطاقـة سـيؤدي إلـى تأثيـر قـدره 261 مليـون يـورو مـن حيـث النـاتج المحلـي الإجمالـي وخلـق فـرص عمـل يبلـغ 5.181 مكافـئ في المتوسـط.

عـلاوة علـى ذلـك، واسـتنادًا إلـى متوسـط الاسـتهلاك الداخلـي الإجمالـي للكتلـة الحيويـة مـن أجـل الطاقـة في عـام 2050م الـذي أفـاد بـه تقييـم الأثـر الـذي أجرتـه المفوضيـة الأوروبيـة، فـإن اسـتبدال الوقـود الأحفـوري بالطاقـة بالكتلـة الحيويـة يمكـن أن يمنـع، في المتوسـط، 487 مليـون طـن مـن مكافـئ ثانـي أكسـيد الكربـون في ذلـك العـام. ومـن ثـم، فـإن كل مليـون طـن إضـافي مـن الكتلـة الحيويـة المسـتخدمة في الطاقـة يمكـن أن يخفـف مـن انبعاثـات 2.4 مليـون طـن مـن مكافـئ ثانـي أكسـيد الكربـون بسـبب اسـتبدال الوقـود الأحفـوري بالطاقـة، مـع خلـق النمـو الاقتصـادي وفـرص العمـل.

# طاقـــة من البحـــار

الطاقة البحرية Marine Energy لديها أصغر حصة في سوق الطاقة. وهي تشمل قوة المد والجزر، التي تقترب من مرحلة النضج، وطاقة الأمواج، التي هي في مرحلة مبكرة من التطور. ويشكل نظاما حركة المد والجزر في فرنسا وكوريا الجنوبية 90 % من الإنتاج العالمي. وفي حين أن أجهزة الطاقة البحرية المنفردة لا تشكل خطراً كبيراً على البيئة، إلا أن تأثيرات الأجهزة الأكبر حجماً أقل شهرة.

أول مولد لتيار المد والجزر متصل بالشبكة على نطاق تجاري في العالم – SeaGen – في Strangford Lough. تم تطويره بواسطة شركة Marine Current Turbines (MCT) وتم تشغيله في Strangford Lough في أيرلندا الشمالية في يوليو 2008. يتطلب مشروع SeaGen بقدرة 1.2 ميجاوات، والذي يتكون من توربينين بقدرة 600 كيلو وات، استثمارًا إجماليًا قدره 12 مليون جنيه إسترليني (Khaligh & Onar, 2010)

طاقة المد والجزر هي شكل من أشكال الطاقة المتجددة حيث يتم تحويل حركة المد والجزر في المحيطات إلى طاقة كهربائية. طاقة الأمواج هي توليد الكهرباء من خلال تسخير حركة أمواج المحيط لأعلى ولأسفل. هناك عدد من الطرق التي يمكن من خلالها تسخير قوة المد والجزر. تستفيد أنظمة طاقة خزان Barrage المد والجزر من الاختلافات بين المد والجزر المرتفعة والمد والجزر المنخفضة عن طريق استخدام خزان أو نوع من السد لاحتجاز المياه التي تدفقت إلى النظام خلال فترات المد العالي. ومع انحسار المد، يتم إطلاق المياه المحبوسة وتمر عبر توربين يولد الكهرباء. وتحدث عملية مماثلة في السدود الكهرومائية. تستفيد أنظمة طاقة تيارات المد والجزر من تيارات المحيط لتشغيل التوربينات، خاصة في المناطق المحيطة بالجزر أو السواحل حيث تكون هذه التيارات سريعة. يمكن تركيبها كأسوار للمد والجزر، حيث يتم تمديد التوربينات عبر قناة، أو كتوربينات للمد والجزر، والتي تشبه توربينات الرياح تحت الماء. يتم إنتاج طاقة الأمواج عادةً بواسطة منصات التوربينات العائمة. ومع ذلك، يمكن توليدها من خلال استغلال التغيرات في ضغط الهواء التي تحدث في غرف التقاط الأمواج التي تواجه البحر.

يمكن تركيب أنظمة طاقة الأمواج في المناطق الساحلية وكذلك في المناطق البحرية وبشكل عام، فإن المناطق ذات الإمكانات الأكبر لتطوير طاقة الأمواج هي خطوط العرض ذات أعلى الرياح (خطوط العرض 40 درجة - 60 درجة شمالا وجنوبا) على الشواطئ الشرقية لمحيطات العالم. ولهذا السبب توجد إمكانات كبيرة لأنظمة طاقة الأمواج في الجزر البريطانية وشمال غرب المحيط الهادئ في الولايات المتحدة.

العديد من تقنيات طاقة المد والجزر غير متوفرة على المستوى الصناعي، وبالتالي فإن طاقة المد والجزر تساهم بجزء ضئيل من الطاقة العالمية اليوم. ومع ذلك، هناك إمكانية كبيرة لاستخدامها، لأن الكثير من الطاقة القابلة للاستخدام موجودة في التيارات المائية. يبلغ إجمالي الطاقة الموجودة في المد والجزر في جميع أنحاء العالم 3000 جيجاوات، على الرغم من أن تقديرات مقدار هذه الطاقة المتاحة لتوليد الطاقة عن طريق قنابل المد والجزر تتراوح بين 120 إلى 400 جيجاوات، اعتمادًا على الموقع وإمكانية التحويل.

وبالمقارنة، تنتج محطة توليد نموذجية جديدة تعتمد على الفحم حوالي 550 ميجاوات. بالنسبة لطاقة الأمواج، فإن أحد التقديرات هو 2000 تيراواط/ساعة سنويًا (حوالي 10 % من إنتاج الكهرباء العالمي)، ويمكن لطاقة تيارات المد والجزر – التي تستخدم تيارات المحيط لدفع الشفرات تحت الماء بطريقة مشابهة لتوليد طاقة الرياح – في المياه الضحلة أن تولد حوالي 3800 تيراواط/ساعة سنويًا (تيراواط واحد يساوي $1 \times 10^{12}$ واط).

قارب يدور بالقرب من مولد طاقة الأمواج قبالة ساحل المحيط الأطلسي في البرتغال. تتمايل الأنابيب العائمة وسط الأمواج، وتعمل على تشغيل المولدات المرفقة (Curley, 2012)

وبحلول أوائل القرن الحادي والعشرين، أصبحت بعض هذه التقنيات متاحة تجاريًا. بدأت محطة طاقة المد والجزر في لارانس في فرنسا العمل في الستينيات بقدرة 240 ميجاوات. ويصل إنتاجه النموذجي إلى 0.5 تيراواط/ساعة سنويًا. ونظرًا لوجود عدد قليل من محطات تيارات المد والجزر، فإن تكاليف هذه التكنولوجيا غير معروفة، ولكن من المتوقع أن تكون التكاليف أقل من تكلفة أنظمة قناطر المد والجزر.

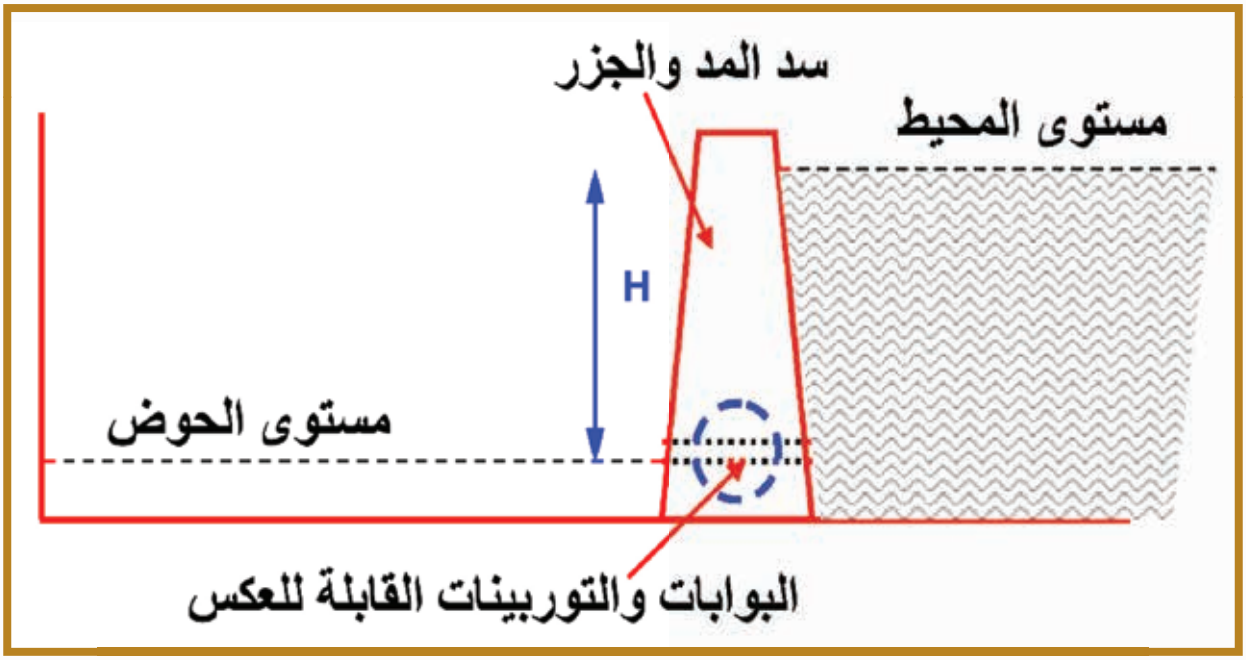
يقع أول مولد طاقة موجية تشغيلي في العالم قبالة ساحل ميناء أغوكادورا، وينتج ما يصل إلى 2.25 ميجاوات من ثلاثة أنابيب ضخمة مفصلية تطفو على سطح المحيط الأطلسي؛ توجد مولدات الطاقة الفردية عند مفاصل الأنابيب ويتم تنشيطها عن طريق حركة الموجة. وتتركز المخاوف البيئية التي أثيرت بشأن محطات طاقة المد والجزر إلى حد كبير على أنظمة قناطر المد والجزر، والتي يمكن أن تعطل النظم البيئية لمصبات الأنهار أثناء بنائها وتشغيلها. من المتوقع أن يكون لأسوار المد والجزر والتوربينات تأثير ضئيل على النظم البيئية للمحيطات. ومع ذلك، فإن أسوار المد والجزر لديها القدرة على إصابة أو قتل الأسماك المهاجرة، ولكن يمكن تصميم هذه الهياكل لتقليل هذه الآثار.

## • طاقة المد والجزر

ويتضح مما سبق أنه في كل موقع ساحلي على كوكب الأرض، من المتوقع أن يرتفع وينخفض مستوى سطح البحر بفترة تقارب 12.5 ساعة أو 45000 ثانية. ولذلك، فإن طاقة المد والجزر هي مصدر طاقة متجدد ومتغير بشكل يمكن التنبؤ به. يمكن دائمًا إنتاج الطاقة الكهربائية من المد والجزر بطريقة يمكن التنبؤ بها. ومع ذلك، لأن هذا لا يتزامن بالضرورة مع تباين الطلب على الطاقة

الكهربائية، فيجب تصميم أنظمة طاقة المد والجزر لتخزين بعض أو كل الطاقة المتوفرة في المد والجزر.

هناك نظام بسيط للاستفادة من قوة المد والجزر هو نظام المد والجزر أو نظام المد والجزر الفردي الذي يظهر بشكل تخطيطي في الشكل الآتي. إن حاجز المد والجزر هو في الأساس سد يفصل المحيط عن الحوض، والذي عادة ما يكون خليجًا أو مصبًا.




**نظام المد والجزر ذو الحوض الواحد أو سد المد والجزر (Michaelides, 2012)**

إن حاجز المد والجزر هو في الأساس سد يفصل المحيط عن الحوض، والذي عادة ما يكون خليجًا أو مصبًا. تقع البوابات بالقرب من أسفل الوابل وتؤدي إلى توربينات هيدروليكية. يعمل الأخير عند رؤوس الضغط المنخفض ويمكن

عكسه. وهذا يعني أنها تنتج الطاقة عندما يتدفق الماء في أي اتجاه. يتم إغلاق البوابات والحوض فارغ حتى يصل المد إلى أعلى مستوى، وهو ما يعادل نطاق المد والجزر H.

في هذه اللحظة تُفتح البوابات، وتعمل التوربينات لإنتاج الكهرباء ويمتلئ حوض السباحة بالمياه. إجمالي كمية الطاقة المنتجة أثناء ملء الحوض من المستوى 0 إلى H هي:

$$W = \int \eta ghdm = \int_0^H \eta ghA\rho dh = \frac{1}{2}A\eta\rho gH^2$$

حيث إن: $\eta$ متوسط كفاءة التوربين، و A هي مساحة المقطع العرضي للحوض، والتي يفترض أنها موحدة، و $\rho$ هو كثافة الماء، حوالي 1000 كغ/م$^3$. عندما يمتلئ حوض السباحة بالمياه، تغلق البوابات، ويكون مستوى حوض السباحة عند مستوى H ولا تنتج المحطة طاقة كهربائية. ينخفض مستوى المحيط حتى يتم الوصول إلى نقطة المد المنخفض، عندما يكون حوض السباحة عند المستوى H فوق المحيط. في هذه اللحظة، تفتح البوابات مرة أخرى وتنتج التوربينات الترددية الطاقة للمرة الثانية خلال دورة موجة مد واحدة. وبالتالي، فإن نظام المجمع الفردي ينتج ضعف كمية الطاقة الموضحة في المعادلة أعلاه خلال حوالي 12.5 ساعة من فترة المد والجزر. وبالتالي فإن متوسط الطاقة المنتجة هو:

$$\dot{W} = \frac{A\eta\rho gH^2}{T}$$

حيث: $T \approx 12.5\ \text{h} = 45{,}000\ \text{s}$

يتضح من هذا التحليل أن نظام المجمع الواحد لا ينتج الطاقة بشكل مستمر. وبدلاً من ذلك، فإن تشغيله ينتج هذا القدر من الطاقة في «دفعتين» أثناء عمليات التعبئة والتفريغ السريعة، والتي تستمر حوالي 20–30 دقيقة. إن الطاقة الفعلية المنتجة خلال الفترة القصيرة لتشغيل محطة توليد الكهرباء أعلى بكثير من تلك المحسوبة من المعادلة أعلاه. على سبيل المثال، إذا حدث التفريغ خلال 20 دقيقة (1200 ثانية)، فإن الطاقة الفعلية ستكون 45000/ (1,200*2) أو 18.75 مرة أعلى من متوسط القدرة المشار إليها بواسطة المعادلة أعلاه. ويبقى النظام خاملاً خلال بقية الوقت. هذا النوع من العمليات للاستفادة من طاقة المد والجزر له عدة عيوب منها ما يلي:

- يتم إنتاج طاقة عالية جدًا فقط خلال فترات زمنية قصيرة جدًا، عندما لا يكون الطلب موجودًا. وفي غياب الطلب المرتفع على الكهرباء، سيتعين خفض مستوى الطاقة في المرافق الأخرى لاستيعاب الطاقة المنتجة. وقد ينطوي ذلك على تقلبات كبيرة وغير مرغوب فيها في الطاقة في محطات الطاقة الأخرى التي تزود شبكة الكهرباء بالكهرباء.
- يجب أن يستخدم النظام توربينات ذات طاقة عالية جدًا لاستيعاب «دفعات» الطاقة المنتجة. تعد التوربينات عالية الطاقة أكثر تكلفة بكثير وتضيف إلى التكلفة الرأسمالية لمحطة الطاقة والتكلفة النهائية للطاقة الكهربائية.
- يؤدي تشغيل وإيقاف التوربينات والمثيرات والمولدات إلى زيادة تآكل المعدات بشكل كبير ويقلل من عمرها الإنتاجي.

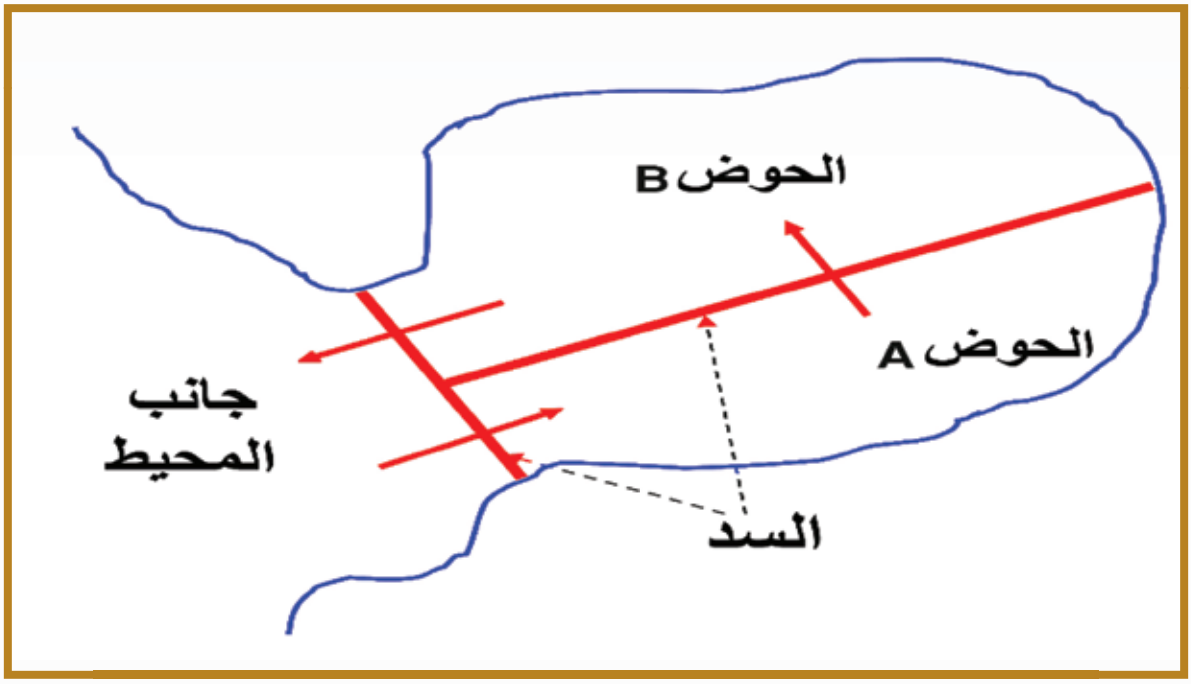
والتشغيل البديل لنظام المجمع الفردي هو تشغيل التوربينات لفترات زمنية أطول وإغلاقها فقط عندما تنخفض الطاقة المنتجة عن الحد الأدنى المحدد

مسبقًا .عيب هذا النوع من التشغيل هو أن حوض السباحة يمتلئ وقد يكون الفرق في مستوى الماء أقل بكثير من H خلال الفترات التي يتم فيها إنتاج الطاقة. تنتج التوربينات كمية أقل من الطاقة والطاقة أثناء دورة المد والجزر. الميزة الرئيسية لهذا النوع من العمليات هو أن محطة طاقة المد والجزر تستخدم توربينات أصغر حجماً وأقل تكلفة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن منشآت الطاقة الأخرى لا تتحمل أعباء لا داعي لها بسبب تشغيلها. يوضح الشكل الآتي تشغيل المحطة كدالة للوقت والطاقة التي تنتجها. يشتمل نظام المد والجزر ثنائي الحوض على معلمة أخرى يمكن التحكم فيها لتحسين أهداف توليد الطاقة من خلال الاستفادة من حوض مياه إضافي حيث يمكن تصريف المياه. يستخدم نظام المد والجزر ذو الحوضين حوضين مائيين، يتم ملؤهما وإفراغهما خلال كل دورة مد وجزر. يمكن تحسين النظام بإحدى الطرق الثلاث الآتية:

- **لإنتاج أكبر قدر ممكن من الطاقة خلال دورة المد والجزر.**
- **لإنتاج أقصى قدر من الطاقة خلال فترات ذروة الطلب.**
- **لإنتاج بعض الطاقة ولكن أيضًا لتخزين الطاقة لاستخدامها أثناء ذروة الطلب.**

الشكل الآتي هو رسم تخطيطي لنظام المجمعين. عند ارتفاع المد، يمتلئ حوض السباحة A بمياه المحيط، مما ينتج عنه بعض الطاقة، بينما يكون حوض السباحة B عند أدنى مستوى له ومغلقًا. عند امتلاء المجمع A، يبدأ التفريغ إلى المجمع المنخفض المستوى B، وبالتالي إنتاج طاقة إضافية.

بحلول الوقت الذي يتساوى فيه مستوى المياه في الحوضين A وB، ينخفض مستوى المحيط وقد يقوم كلا الحوضين A وB بتصريف مياههما إلى المحيط. يتم إنتاج الطاقة خلال مرحلة التفريغ هذه. يمكن اختيار سعة المجمعين بحيث يتم تقليل تأثيرات تقلب رأس الجاذبية. يؤدي هذا النوع من تشغيل النظام ثنائي المجمع إلى توليد طاقة مستمر وموحد تقريبًا.




تشغيل نظام المد والجزر ذو الحوضين (Michaelides, 2012)

تجدر الإشارة إلى أنه، لتشغيل نظام المجمعين، ليس من الضروري استخدام توربينات إضافية غير نظام المجمع الواحد. تعتبر التوربينات أكثر تكلفة وتضيف بشكل كبير إلى تكلفة التركيب. بدلاً من تركيب المزيد من التوربينات، يمكن بناء شبكة مناسبة من خطوط الأنابيب، والمداخل، والمخارج، وصمامات بوابة التحويل لتوجيه التدفق دائمًا من مستوى المياه الأعلى إلى المستوى الأدنى، مع تمرير المياه عبر نفس التوربينات الهيدروليكية (Michaelides, 2012).

## • تيـــارات المحيـــط

تحدث تيارات المحيط الدائمة في عدة أجزاء من البحر وتتولد عن مجموعة متنوعة من القوى بما في ذلك: قوة كوريوليس؛ الرياح السطحية السائدة؛ تدرجات درجة الحرارة والملوحة. المد والجزر السائدة. يؤثر التباين في خطوط العمق وتكوينات الخط الساحلي على اتجاه التيارات المحيطية وإمكانات الطاقة.

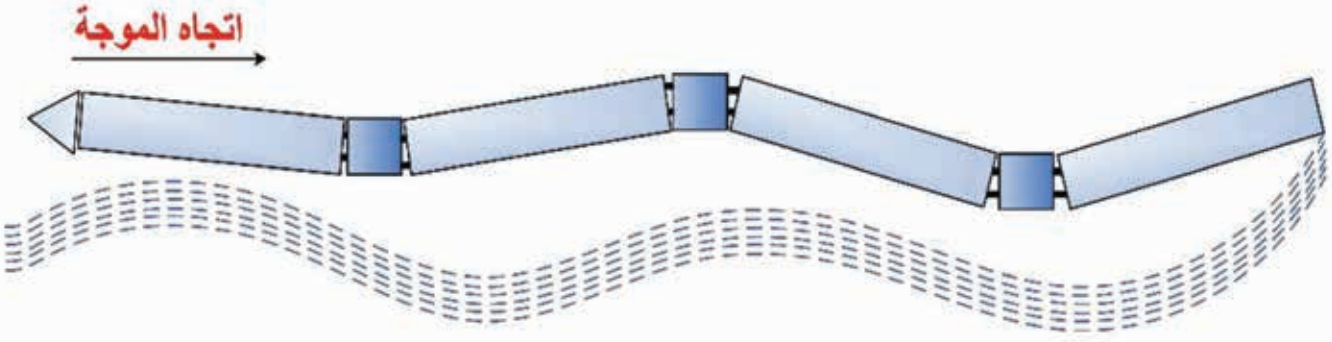
كثيرًا ما تلتقي تيارات المحيط عالية الكثافة في الممرات المائية بين الجزر، عند طرف شبه الجزيرة الكبيرة والرؤوس، على سبيل المثال قبالة كيب هاتيراس في ولاية كارولينا الشمالية، الولايات المتحدة الأمريكية أو في الممرات المائية التي تربط المحيطات، على سبيل المثال مضيق ماجلان في أقصى الجنوب. من أمريكا الجنوبية. في حين أن استخدام تيارات المحيط لإنتاج الكهرباء أمر ممكن وقد يكون له فوائد كبيرة، إلا أنه لم يتم بعد بناء محطة لتوليد الطاقة بتيار المحيط، حتى على نطاق تجريبي. المعوقات الرئيسية لمثل هذا المشروع هي:

- العواصف البحرية والتيارات العالية التي قد تؤدي إلى إتلاف المنشآت تحت الماء.
- نقل الكهرباء برا وتغذيتها بالشبكة الوطنية.
- الافتقار إلى الخبرة والأبحاث ذات الصلة بالتوربينات تحت الماء وأنظمة توليد الكهرباء واسعة النطاق، والتي يجب أن تعمل في بيئة معادية تحت الماء.
- معظم التيارات المائية القوية توجد في المياه الدولية. يؤدي الافتقار إلى المعاهدات الدولية والقوانين المنظمة إلى زيادة عدم اليقين ومخاطر الاستثمار.
- المخاوف المتعلقة بالتخريب والإرهاب بالنسبة للأنظمة التي بطبيعتها مبنية على مسافة كبيرة من الشاطئ.
- بيئة الحياة البحرية وتكاثرها وهجرتها (Michaelides, 2012).

## • طاقـــة الموجـــة

تنتج أمواج المحيط بشكل مباشر عن طريق الرياح، وبشكل غير مباشر عن طريق الطاقة الشمسية. وعلى غرار قوة المد والجزر، ولأن المحيطات تغطي أكثر من 70 % من سطح الأرض، فإن طاقة الأمواج وفيرة، وإذا تم تسخيرها بشكل مناسب، فإنها لديها القدرة على توفير قدر كبير من الطاقة الكهربائية.

تتراوح كثافة الطاقة النموذجية لكل وحدة عرض للأمواج بالقرب من شواطئ المحيطين الأطلسي والهادئ بين 20 و80 كيلووات/م. وبما أن اتساع الموجة يزداد بشكل كبير أثناء العواصف، فإن قوة الموجة تختلف من هذه المستويات إلى قيم أعلى بكثير. ولهذا السبب، فإن أي نظام يحول الطاقة الموجية إلى كهرباء يجب أن يكون قادرًا أيضًا على تحمل القوى العالية ومستويات الطاقة العالية المرتبطة بموجات العواصف العالية (Michaelides, 2012).




كان Pelamis Wave Energy Converter عبـارة عـن تقنيـة تسـتخدم حركـة أمـواج سـطح المحيـط لتوليـد الكهربـاء. كانـت الآلـة مكونـة مـن أقسـام متصلـة تنثنـي وتنحنـي مـع مـرور الأمـواج؛ هـذه هـي الحركـة التـي تسـتخدم لتوليـد الكهربـاء (Khaligh & Onar, 2010)

## • تحويل الطاقة الحرارية للمحيطات

إن مفهوم تحويل الطاقة الحرارية للمحيطات Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) قديم قدم نظرية المحركات الحرارية تقريبًا. تم تضمين مفهوم OTEC في معظم الكتب المدرسية للديناميكا الحرارية الأولية كدليل على عواقب القانون الثاني للديناميكا الحرارية: في خطوط العرض الاستوائية، قد تصل درجات حرارة المياه على سطح البحر إلى نطاق 27–32 درجة مئوية. وفي الوقت نفسه، ولأن ضوء الشمس لا ينفذ إلى أعماق أقل من 30 متراً، فإن المياه في قاع الخلجان العميقة تكون أكثر برودة وقد تتراوح درجة حرارتها بين 5–8 درجة مئوية. تعمل هذه الظروف على إنشاء خزانين حراريين ضروريين لتشغيل المحرك الحراري الأولي. تشكل مياه البحر الدافئة على السطح ومياه البحر الباردة في الأسفل خزانين حراريين ضروريين لتشغيل المحرك الحراري. كل ما هو مطلوب هو النظام الهندسي الذي من شأنه أن يجعل هذا المحرك الحراري جاهزًا للعمل.

منذ البداية لا بد من الإشارة إلى أن كفاءة المحرك الحراري OTEC ستكون صغيرة جدًا. حتى لو أخذنا درجات الحرارة القصوى المذكورة في الفقرة السابقة، 32 و5 درجة مئوية، فإن كفاءة كارنو لدورة OTEC ستكون أقل من 9 %. في المقابل، فإن كفاءات كارنو لدورات الغاز، حيث تزيد درجة الحرارة الأعلى عن 1500 درجة مئوية، تزيد عن 80 %، وتقترب كفاءة دورات رانكين من 70 %. إن كفاءة كارنو المنخفضة جدًا بطبيعتها لدورة OTEC تعني أن الكفاءة الفعلية لأنظمة OTEC ستكون أقل من ذلك.

وبالتالي، فإن النطاق المتوقع لمحطات توليد الطاقة الفعلية لشركة OTEC يتراوح بين 1–2 %. إلا أن كمية الحرارة التي يمكن استخلاصها من مياه المحيطات تكاد تكون مجانية ولا تنضب. على الرغم من الكفاءة المنخفضة المتوقعة، فإن نظام الطاقة OTEC المصمم بنجاح سيكون قادرًا على توفير كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية بطريقة صديقة للبيئة (Michaelides, 2012).

# تقييم الأثر البيئي لطاقة البحار

لا تزال تكنولوجيات طاقة المحيطات في مرحلة مبكرة من التطور؛ يتم اختراع واختبار عدد قليل فقط من المفاهيم في جميع أنحاء العالم. ولا يؤخذ الأثر البيئي لهذه الأجهزة في الاعتبار دائمًا، ويرجع ذلك أساسًا إلى حالة عدم اليقين السائدة فيما يتعلق بتقييمها. ومن الأهمية بمكان أن يتم إيلاء الاهتمام للتخفيف من الآثار السلبية المحتملة على النظم البحرية الفيزيائية والحيوية. إذْ يجب تحديد التأثيرات المباشرة وغير المباشرة لمشاريع طاقة المحيطات على الأنظمة الفيزيائية الحيوية، وتفاعلاتها، من خلال تحليل الأدبيات الحالية حول هذا الموضوع.

يتم بعد ذلك اقتراح أداة يمكن تطبيقها على أي مشروع للطاقة المحيطية في أي مرحلة من مراحل تقييم الأثر البيئي من خلال إطار مصمم لتقييم التأثيرات المتنوعة للأجهزة. يستخدم هذا الإطار تصنيفًا للتأثيرات البيئية لأجهزة التوعية بمخاطر الألغام (الفيزيائية الحيوية والكيميائية والاجتماعية والاقتصادية)، استنادًا إلى التكنولوجيا المستخدمة وموقع الجهاز. لقد تم الاعتراف بشكل متزايد بأهمية خدمات النظام البيئي التي توفرها النظم البحرية الساحلية والآثار المحتملة (المادية والبيئية والاجتماعية والاقتصادية) للأنشطة البشرية عليها. ومع ذلك، فإن تقييم الأثر على المناطق البحرية يعد مهمة معقدة، لأنه يعتمد على فهم أداء النظام البيئي البحري، ومقاومته ومرونته واستجاباته للضغوط البشرية. من الناحية النظرية، ينبغي أن يساعد التقييم البيئي الفعال في توجيه القرارات المتعلقة بالمكان الأفضل لوضع الأجهزة المتجددة وتحت أي ظروف ينبغي رفض الموافقة على بناء هذه الأجهزة أو تشغيلها. حيث يجب أن توفر المراقبة الفعالة بعد الموافقة خطوة مهمة لتقليل عدم اليقين بشأن التنبؤات المستقبلية وقرارات الموافقة بالإضافة إلى السماح بالإدارة التكيفية لأي

تأثيرات قد تنشأ. إن الحاجة إلى إجراء تقييمات فعالة للأثر البيئي (EIAs) وثيقة الصلة بشكل خاص بالبيئة البحرية في المملكة المتحدة. تم اقتراح بعض أكبر التطورات في العالم في البحار الإقليمية للمملكة المتحدة والجرف القاري، والتي تستضيف مجموعات ذات أهمية دولية من العديد من الفقاريات البحرية، ولكن تأثير الأنشطة البشرية هناك هو من بين أعلى المعدلات في العالم. عادة، هناك عدة مراحل لتقييم الأثر البيئي للطاقة البحرية. يتم إجراء الفحص لتحديد ما إذا كان تقييم الأثر البيئي مطلوبًا أم لا. إذا لزم الأمر، يتم إجراء المسح لتحديد محتوى ومدى المسائل التي ينبغي تغطيتها في المعلومات البيئية المقدمة إلى السلطة المختصة.

إن تقييم الأثر البيئي في حد ذاته عبارة عن تحليل للتأثيرات البيئية الهامة المحتملة المرتبطة بمقترحات التطوير الرئيسية وإيصال هذه المعلومات إلى صناع القرار والجمهور الأوسع. يتم الإبلاغ عن نتائج هذه التحليلات في شكل بيان بيئي ومن ثم يتم إجراء التقييم من قبل السلطة المختصة. فيما يتعلق بمنشآت الطاقة المتجددة البحرية، Marine Renewable Energy Iinstallations (MREI) عادة ما تكون هناك حاجة لرصد أي تأثيرات تم تقييمها على أنها إما ذات أهمية متوسطة أو كان هناك درجة معقولة من عدم اليقين حولها، لا سيما عندما تكون هناك اعتبارات فيما يتعلق بتشريعات توجيه الموائل. ويؤدي ذلك إلى تصميم وتنفيذ برنامج مراقبة بهدف نهائي هو تقييم أهمية التأثيرات أثناء التركيب والتشغيل وإيقاف التشغيل. عادةً ما يتم إرفاق نتائج عملية تقييم الأثر البيئي بالموافقة كشروط وأحكام محددة يجب على المطور الالتزام بها.

## ♦ التعامل مع حالة عدم اليقين

ومن المسلم به على نطاق واسع أن هناك عدم يقين بشأن ما إذا كان التأثير كبيرًا أم لا، وفي حين يتم الدعوة عادةً إلى اتباع نهج وقائي، فمن المهم ملاحظة أن الأساليب الحالية المستخدمة لتقييم الأهمية لا تحدد بشكل صريح حجم التأثير واحتمال حدوثه، وهو ما هي في نهاية المطاف التدابير المطلوبة. عند إجراء اختبارات إحصائية للكشف عن التأثيرات، تشير الأهمية إلى احتمالية ملاحظة التأثير عن طريق الصدفة، ولكن حجم التأثير لا يتم تحديده كميًا. علاوة على ذلك، ونظرًا لأنه لا يمكن إثبات فرضية العدم أبدًا، فيجب دائمًا اعتبار جميع التأثيرات ذات أهمية إذا تم اعتماد المبدأ الاحترازي بالمعنى الضيق. في سياق التنبؤ بالأهمية خلال تقييمات الأثر البيئي، فإن الأهمية هي مقياس لحجم التأثير، مرجحًا بأهمية ذلك التأثير أو حساسية النوع أو الموائل. ومع ذلك، لم يتم تحديد احتمالية التأثيرات بشكل واضح.

## ♦ التأثيرات على مستوى السكان

إن دعم الحاجة إلى تقييم الأثر البيئي هو القلق من أن تطورًا معينًا قد يكون له تأثير سلبي على البيئة. وبالتالي فإن تأثير منشآت الطاقة المتجددة البحرية على السكان أكثر أهمية من تأثيرها على الأفراد. وبالتالي فإن اختيار المقياس الذي يتم تقييم أهميته أمر مهم. على سبيل المثال، من غير المرجح أن يكون للتغيرات الصغيرة ولكن ذات الأهمية الإحصائية في توزيع الكائن الحي آثار كبيرة طويلة المدى على السكان. في كثير من الأحيان، يكون المقياس المستخدم هو نسبة السكان الإقليميين أو العالميين. ومع ذلك، عادةً ما تميل الأنواع قصيرة العمر إلى أن تكون عالية الخصوبة. وحيثما تخضع معدلاتها الديموغرافية للاعتماد على الكثافة، فمن المرجح أن يتمكن السكان من استبدال الأفراد المفقودين.

وبالتالي فإن الأنواع طويلة العمر، والتي تربي عددًا قليلًا من الصغار خلال حياتهم، قد تكون حساسة بشكل خاص لتأثيرات منشآت الطاقة المتجددة البحرية على الوفيات والتكاثر. وبما أن التأثيرات على مستوى السكان تعتمد أيضًا على حجم السكان، فإن الأنواع ذات الأعداد الصغيرة قد تكون أيضًا معرضة للخطر بشكل خاص. يتطلب تقييم التأثيرات على السكان وضع نماذج ديموغرافية تفصيلية ومعرفة بالمعايير الديموغرافية، ولكن نادرًا ما يتم إجراء مثل هذه الأساليب كجزء من تقييمات الأثر البيئي الفردية.

# طاقة الهيدروجين الأخضر

الهيدروجين الأخضر Green Hydrogen (GH2) هو هيدروجين يتم إنتاجه عن طريق التحليل الكهربائي للماء باستخدام الكهرباء المتجددة. ينتج عن إنتاج الهيدروجين الأخضر انبعاثات غازات دفيئة أقل بكثير من إنتاج الهيدروجين الرمادي، المشتق من الوقود الأحفوري دون احتجاز الكربون.

**الغرض الرئيسي للهيدروجين الأخضر هو المساعدة في الحد من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى 1.5 درجة مئوية، وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري عن طريق استبدال الهيدروجين الرمادي، وتوفير مجموعة موسعة من الاستخدامات النهائية في قطاعات اقتصادية وقطاعات فرعية وأنشطة محددة. (ICCT, 2021)**

قد يكون من الصعب تقنيًا إزالة الكربون من هذه الاستخدامات النهائية من خلال وسائل أخرى مثل الكهرباء باستخدام الطاقة المتجددة. ومن المرجح أن تكون تطبيقاته الرئيسية في الصناعات الثقيلة (مثل العمليات ذات درجات الحرارة المرتفعة إلى جانب الكهرباء، والمواد الخام لإنتاج الأمونيا الخضراء والمواد الكيميائية العضوية، كبديل لفحم الكوك المشتق من الفحم لصناعة الصلب)، والنقل لمسافات طويلة (مثل الشحن والطيران وصناعة الصلب). وبدرجة أقل مركبات البضائع الثقيلة)، وتخزين الطاقة على المدى الطويل.

اعتبارًا من عام 2021م، شكل الهيدروجين الأخضر أقل من 0.04 % من إجمالي إنتاج الهيدروجين. إن تكلفته مقارنة بالهيدروجين المشتق من الوقود الأحفوري هي السبب الرئيسي وراء انخفاض الطلب على الهيدروجين الأخضر. على سبيل المثال، كان الهيدروجين الناتج عن التحليل الكهربائي الذي يعمل بالطاقة الشمسية أغلى بنحو 25 مرة من نظيره المشتق من الهيدروكربونات في عام 2018م. هناك إمكانية أن يلعب الهيدروجين الأخضر دورًا مهمًا في إزالة الكربون من أنظمة الطاقة حيث توجد تحديات وقيود لاستبدال الوقود الأحفوري بالاستخدام المباشر للكهرباء. يمكن أن ينتج وقود الهيدروجين الحرارة المكثفة اللازمة للإنتاج الصناعي للصلب والأسمنت والزجاج والمواد الكيميائية، وبالتالي المساهمة في إزالة الكربون من الصناعة إلى جانب التقنيات الأخرى، مثل أفران القوس الكهربائي لصناعة الصلب. ومع ذلك، فمن المرجح أن تلعب دورًا أكبر في توفير المواد الأولية الصناعية لإنتاج أنظف للأمونيا والمواد الكيميائية العضوية. على سبيل المثال، في صناعة الصلب، يمكن للهيدروجين أن يعمل كحامل للطاقة النظيفة وأيضا كمحفز منخفض الكربون ليحل محل فحم الكوك المشتق من الفحم. من المرجح أن يجد الهيدروجين المستخدم لإزالة الكربون من وسائل النقل أكبر تطبيقاته في الشحن والطيران وبدرجة أقل مركبات البضائع الثقيلة، من خلال استخدام الوقود الاصطناعي المشتق من الهيدروجين مثل الأمونيا والميثانول، وتكنولوجيا خلايا الوقود.

# كيف يمكن إنتاج الهيدروجين دون أن يكون له تأثير على البيئة؟

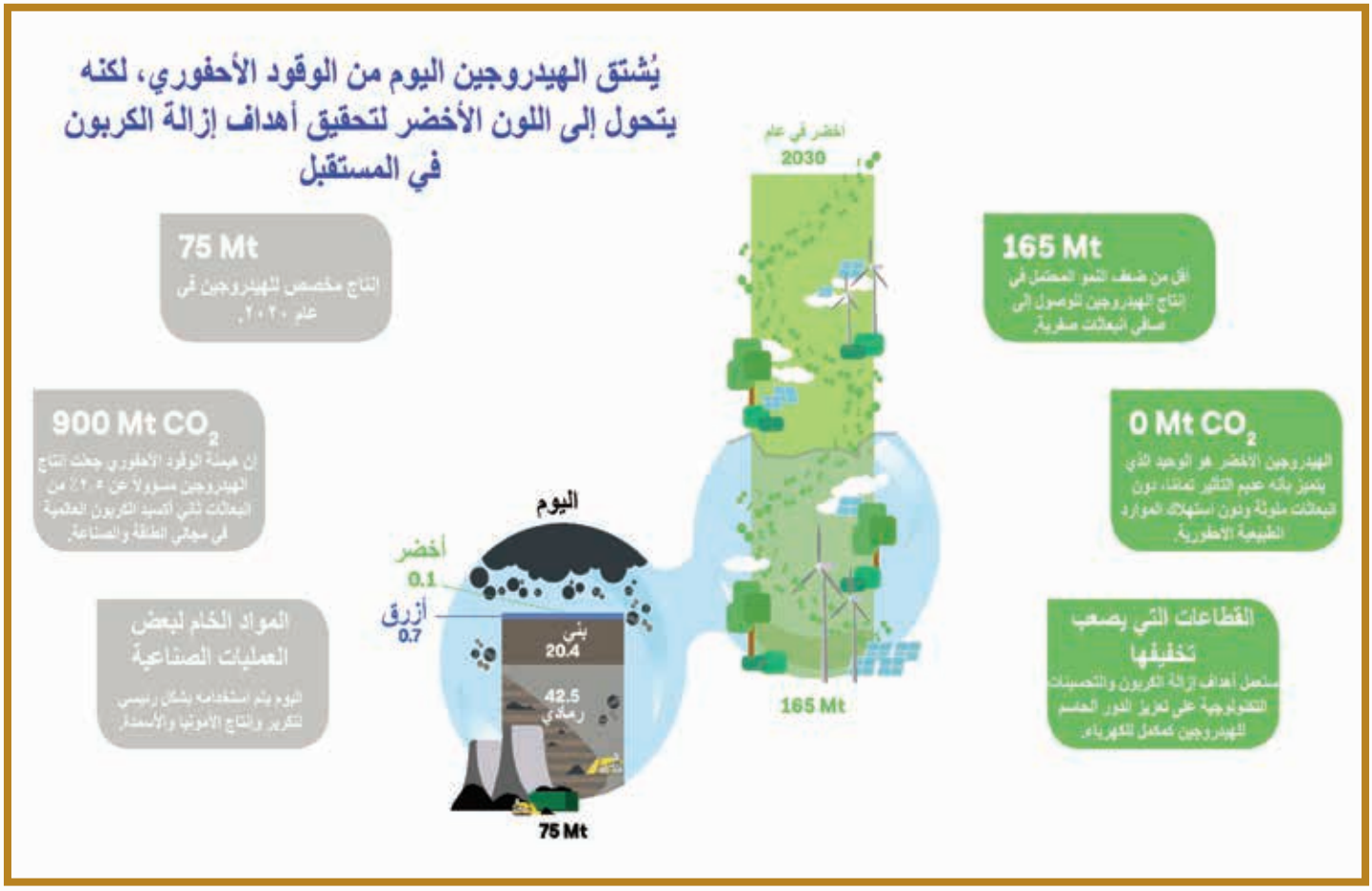
بالنسبة للمركبات الخفيفة بما في ذلك سيارات الركاب، فإن الهيدروجين يتخلف كثيرًا عن مركبات الوقود البديل الأخرى، خاصة بالمقارنة مع معدل اعتماد السيارات الكهربائية التي تعمل بالبطارية، وقد لا يلعب دورًا مهمًا في المستقبل. يمكن أيضًا استخدام الهيدروجين الأخضر لتخزين طاقة الشبكة على المدى الطويل، ولتخزين الطاقة الموسمية على المدى الطويل.

اعتبارًا من عام 2022م، بلغت قيمة سوق الهيدروجين العالمي 155 مليار دولار، وكان من المتوقع أن ينمو بمعدل نمو سنوي مركب يبلغ 9.3 % بين عامي 2023 و2030م. ومن هذا السوق، شكل الهيدروجين الأخضر حوالي 4.2 مليار دولار (2.7 %). ونظرًا لارتفاع تكلفة الإنتاج، يمثل الهيدروجين الأخضر جزءًا أصغر من الهيدروجين المنتج مقارنة بحصته من القيمة السوقية. غالبية الهيدروجين المنتج في عام 2020م مشتق من الوقود الأحفوري. 99 % جاء من مصادر تعتمد على الكربون. ويمثل الإنتاج المعتمد على التحليل الكهربائي أقل من 0.1 % من الإجمالي، ويتم تشغيل جزء منه فقط بالكهرباء المتجددة. تعتبر تكلفة الإنتاج المرتفعة الحالية هي العامل الرئيسي الذي يحد من استخدام الهيدروجين الأخضر. ويعتبر الكثيرون أن سعر 2 دولار للكيلوجرام هو نقطة تحول محتملة من شأنها أن تجعل الهيدروجين الأخضر منافسًا للهيدروجين الرمادي. من الأرخص إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام فائض من الطاقة المتجددة التي سيتم تقليصها لولا ذلك، مما يفضل المحللات الكهربائية القادرة على الاستجابة لمستويات الطاقة المنخفضة والمتغيرة (مثل المحللات الكهربائية ذات غشاء تبادل البروتون).

اعتبارًا من عام 2021م، تم تقدير خط أنابيب استثمار الهيدروجين الأخضر بـ 121 جيجاوات من قدرة التحليل الكهربائي عبر 136 مشروعًا في مراحل التخطيط والتطوير، بإجمالي يزيد عن 500 مليار دولار. إذا تم بناء جميع المشاريع في خط الأنابيب، فيمكنها ستشكل 10 % من إنتاج الهيدروجين

بحلـول عـام 2030م. يمكـن أن تصـل قيمـة السـوق إلـى أكثـر مـن تريليـون دولار سـنويًا بحلـول عـام 2050م وفقًـا لبنـك جولدمـان سـاكس. واقتـرح أحـد محللـي سـوق الطاقـة في أوائـل عـام 2021م أن سـعر الهيدروجـين الأخضـر سـينخفض بنسـبة 70 % بحلـول عـام 2031م في البلـدان التـي لديهـا طاقـة متجـددة رخيصـة الثمـن. يتمتـع الهيدروجـين الأخضـر (GH) بالقـدرة علـى تغييـر قواعـد اللعبـة في التحـول إلـى اقتصـاد منخفـض الكربـون. وهـي تبـرز كلاعـب رئيسـي بسـبب تنوعهـا واسـتدامتها وكبديـل واعـد لإزالـة الكربـون مـن القطاعـات «التـي يصعـب تخفيفهـا»، مثـل الصناعـات الثقيلـة والنقـل والطاقـة، التـي تمثـل أكثـر مـن 50 % مـن غـازات الدفيئـة في العالـم (غـازات الدفيئـة) الانبعاثـات.

## • ما هو الهيدروجين الأخضر؟



وفقًا للتسمية التي تستخدمها شركة أبحاث السوق Wood Mackenzie، فإن معظم الغاز المستخدم بالفعل على نطاق واسع كمادة كيميائية صناعية يكون إما بنيًا، إذا تم تصنيعه من خلال تغويز الفحم أو الليجنيت؛ أو الرمادي، إذا تم تصنيعه من خلال إعادة تشكيل غاز الميثان بالبخار، والذي يستخدم عادة الغاز الطبيعي كمادة خام. ولا تعتبر أي من هذه العمليات صديقة للكربون تمامًا.

يُعرف الخيار الأنظف المزعوم بالهيدروجين الأزرق، حيث يتم إنتاج الغاز عن طريق إعادة تكوين غاز الميثان بالبخار ولكن يتم تقليص الانبعاثات باستخدام احتجاز الكربون وتخزينه. يمكن لهذه العملية أن تخفض كمية الكربون المنتجة إلى النصف تقريبًا، لكنها لا تزال بعيدة عن أن تكون خالية من الانبعاثات.

في المقابل، يمكن للهيدروجين الأخضر أن يزيل الانبعاثات تقريبًا باستخدام الطاقة المتجددة – المتوفرة بكثرة والتي يتم توليدها غالبًا في أوقات أقل من المثالية – لتشغيل التحليل الكهربائي للمياه. الإضافة الأحدث إلى لوحة إنتاج الهيدروجين هي اللون الفيروزي. ويتم إنتاج ذلك عن طريق تحلل الميثان إلى هيدروجين وكربون صلب باستخدام عملية تسمى الانحلال الحراري. قد يبدو الهيدروجين الفيروزي منخفضًا نسبيًا من حيث الانبعاثات لأنه يمكن دفن الكربون أو استخدامه في العمليات الصناعية مثل صناعة الصلب أو تصنيع البطاريات، لذلك لا يتسرب إلى الغلاف الجوي. ومع ذلك، تشير الأبحاث الحديثة إلى أن الهيدروجين الفيروزي من غير المرجح أن يكون خاليًا من الكربون أكثر من الهيدروجين الأزرق، وذلك بسبب الانبعاثات الناتجة عن إمدادات الغاز الطبيعي وحرارة المعالجة المطلوبة.

## • كيف يُصنع الهيدروجين الأخضر؟

مع التحليل الكهربائي، كل ما تحتاجه لإنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين هو الماء، ومحلل كهربائي كبير وإمدادات وفيرة من الكهرباء. إذا كانت الكهرباء

تأتي من مصادر متجددة مثل الرياح أو الطاقة الشمسية أو الطاقة المائية، فإن الهيدروجين يكون أخضر بشكل فعال؛ انبعاثات الكربون الوحيدة هي من تلك المتجسدة في البنية التحتية للتوليد. ويتمثل التحدي الآن في نقص المعروض من المحللات الكهربائية الكبيرة، كما أن الإمدادات الوفيرة من الكهرباء المتجددة لا تزال باهظة الثمن.

بالمقارنة مع عمليات الإنتاج الأكثر رسوخًا، يعد التحليل الكهربائي مكلفًا للغاية، لذلك كان سوق المحللات الكهربائية صغيرًا. ورغم أن إنتاج الطاقة المتجددة أصبح الآن كبيرا بالقدر الكافي لإحداث منحنيات بطيئة في كاليفورنيا ومشاكل في الشبكة في ألمانيا، فإن الإفراط في الإنتاج يشكل تطورا حديثا نسبيا. لا تزال معظم أسواق الطاقة بحاجة إلى الكثير من مصادر الطاقة المتجددة فقط لخدمة الشبكة.

## • كيف يمكن تخزين واستخدام الهيدروجين الأخضر؟

من الناحية النظرية، هناك الكثير من الأشياء المفيدة التي يمكنك القيام بها باستخدام الهيدروجين الأخضر. يمكنك إضافته إلى الغاز الطبيعي وحرقه في الطاقة الحرارية أو محطات التدفئة المركزية. يمكنك استخدامه كمقدمة لحاملات الطاقة الأخرى، من الأمونيا إلى الهيدروكربونات الاصطناعية، أو لتشغيل خلايا الوقود مباشرة في السيارات والسفن، على سبيل المثال. في البداية، يمكنك استخدامه ببساطة لاستبدال الهيدروجين الصناعي الذي يتم تصنيعه كل عام من الغاز الطبيعي والذي يصل إلى حوالي 10 ملايين طن متري في الولايات المتحدة وحدها.

## لماذا الهيدروجين الأخضر أفضل من الأزرق؟

المشكلة الرئيسية في تلبية جميع هذه الأسواق المحتملة هي إيصال الهيدروجين الأخضر إلى حيث تكون هناك حاجة إليه. إن تخزين ونقل الغاز شديد الاشتعال ليس بالأمر السهل؛ إنها تشغل مساحة كبيرة ولها عادة جعل الأنابيب الفولاذية واللحامات هشة وعرضة للفشل. ولهذا السبب، سيتطلب نقل الهيدروجين بكميات كبيرة خطوط أنابيب مخصصة، الأمر الذي سيكون مكلفًا لبنائه أو ضغط الغاز أو تبريده إلى سائل. هاتان العمليتان الأخيرتان تستهلكان الكثير من الطاقة وستؤديان إلى إضعاف كفاءة الهيدروجين الأخضر المخيبة بالفعل ذهابًا وإيابًا.

## • لماذا أصبح الهيدروجين الأخضر فجأةً مهمًا؟

أحد الطرق المؤدية إلى إزالة الكربون بشكل شبه كامل هو كهربة نظام الطاقة بأكمله واستخدام الطاقة المتجددة النظيفة. لكن كهربة نظام الطاقة بالكامل ستكون صعبة، أو على الأقل أكثر تكلفة بكثير من الجمع بين توليد الطاقة المتجددة وأنواع الوقود المنخفضة الكربون. يعد الهيدروجين الأخضر أحد أنواع الوقود المنخفضة الكربون المحتملة التي يمكن أن تحل محل الهيدروكربونات الأحفورية الموجودة اليوم. من المسلم به أن الهيدروجين ليس مثاليًا كوقود. كثافتها المنخفضة تجعل من الصعب تخزينها وتحريكها. ويمكن أن تشكل قابليته للاشتعال مشكلة، كما سلط الضوء على انفجار محطة تعبئة الهيدروجين النرويجية في يونيو 2019م. كن أنواع الوقود الأخرى المنخفضة الكربون تعاني من مشاكل أيضا، ليس أقلها التكلفة. وبما أن معظمها يتطلب إنتاج الهيدروجين الأخضر كمقدمة، فلماذا لا نلتزم فقط بالمنتج الأصلي؟

ويشير المؤيدون إلى أن الهيدروجين يستخدم بالفعل على نطاق واسع في الصناعة، لذا فمن غير المرجح أن تكون المشاكل التقنية المتعلقة بالتخزين والنقل مستعصية على الحل. بالإضافة إلى ذلك، من المحتمل أن يكون الغاز متعدد الاستخدامات، مع تطبيقات محتملة في مجالات تتراوح من التدفئة وتخزين الطاقة على المدى الطويل إلى النقل. إن فرصة تطبيق الهيدروجين الأخضر عبر مجموعة واسعة من القطاعات تعني أن هناك عددًا كبيرًا من الشركات التي يمكنها الاستفادة من الاقتصاد المزدهر في استهلاك وقود الهيدروجين. ولعل أهم هذه الشركات هي شركات النفط والغاز التي تواجه دعوات متزايدة لخفض إنتاج الوقود الأحفوري.

هناك العديد من شركات النفط الكبرى من بين اللاعبين الذين يتنافسون على المركز الأول في تطوير الهيدروجين الأخضر. على سبيل المثال، أكدت شركة شل Nederland في شهر مايو أنها تعاونت مع شركة الطاقة Eneco لتقديم عطاءات للحصول على القدرة في أحدث مناقصة هولندية لطاقة الرياح البحرية حتى تتمكن من إنشاء مجموعة هيدروجينية قياسية في هولندا. وبعد أيام، كشفت شركة Lightsource BP، شركة تطوير الطاقة الشمسية التابعة لشركة بريتيش بتروليوم، أنها تدرس تطوير مصنع أسترالي للهيدروجين الأخضر يعمل بطاقة 1.5 جيجاوات من طاقة الرياح والطاقة الشمسية. قد يكون اهتمام شركات النفط الكبرى بالهيدروجين الأخضر أمرًا بالغ الأهمية في توصيل الوقود إلى مرحلة الجدوى التجارية. سيتطلب خفض تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر استثمارات ضخمة ونطاقًا واسعًا، وهو أمر تتمتع شركات النفط الكبرى بوضع فريد يمكنها من توفيره.

## • ما هي تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر؟

لا يزال إنتاج الهيدروجين الأخضر مكلفًا اليوم. وفي تقرير نُشر العام الماضي (باستخدام بيانات من عام 2018م)، حددت وكالة الطاقة الدولية تكلفة الهيدروجين الأخضر بما يتراوح بين 3 دولارات إلى 7.50 دولارات للكيلو، مقارنة بـ 0.90 إلى 3.20 دولارات للإنتاج باستخدام إعادة تشكيل الميثان ببخار. سيكون خفض تكلفة المحللات الكهربائية أمرًا بالغ الأهمية لخفض سعر الهيدروجين الأخضر، لكن ذلك سيستغرق وقتًا ونطاقًا واسعًا. وقالت وكالة الطاقة الدولية العام الماضي إن تكاليف المحلل الكهربائي قد تنخفض بمقدار النصف بحلول عام 2040م، من حوالي 840 دولارًا لكل كيلووات من القدرة اليوم.

تتطلب الحالة التجارية للهيدروجين الأخضر كميات كبيرة جدًا من الكهرباء المتجددة الرخيصة، وذلك لأن كمية لا بأس بها تُفقد في التحليل الكهربائي. وتتراوح كفاءة المحلل الكهربائي من حوالي 60 % إلى 80 %، وفقًا لشركة شل. ويتفاقم تحدي الكفاءة بسبب حقيقة أن العديد من التطبيقات قد تتطلب الهيدروجين الأخضر لتشغيل خلية الوقود، مما يؤدي إلى مزيد من الخسائر. وقد افترض بعض المراقبين أن إنتاج الهيدروجين الأخضر قد يتخلص من فائض الطاقة المتجددة من مراكز الإنتاج الكبرى، مثل مزارع الرياح البحرية في أوروبا. وبالنظر إلى التكلفة المرتفعة للمحللات الكهربائية، فمن المشكوك فيه ما إذا كان مطورو مشاريع الهيدروجين الأخضر سيكونون على استعداد للسماح لمحللاتهم الكهربائية بالبقاء في وضع الخمول حتى تنخفض أسعار الطاقة المتجددة إلى ما دون مستوى معين. والأرجح، كما تدرسه بالفعل شركة Lightsource BP و Shell، أن يقوم المطورون ببناء محطات لإنتاج الهيدروجين الأخضر مع أصول مخصصة لتوليد الطاقة المتجددة في مواقع عالية الموارد.

## • ما هي كمية الهيدروجين الأخضر التي يتم إنتاجها؟

ليس كثيرًا، في المخطط الكبير للأمور. ويمثل الهيدروجين الأخضر حاليًا أقل من 1 % من إجمالي إنتاج الهيدروجين السنوي. لكن شركة WoodMac تتوقع ازدهار الإنتاج في السنوات المقبلة. تضاعف خط أنابيب مشاريع المحلل الكهربائي الهيدروجيني الأخضر ثلاث مرات تقريبًا في الأشهر الخمسة التي سبقت أبريل 2020م، ليصل إلى 8.2 جيجاوات. وكان الدافع الرئيسي وراء هذه الزيادة هو زيادة عمليات نشر المحلل الكهربائي على نطاق واسع، حيث من المقرر أن تبلغ قدرة 17 مشروعًا 100 ميجاوات أو أكثر.

ولا يقتصر الأمر على تطوير المزيد من المشاريع فحسب. وتقول WoodMac إنه بحلول عام 2027، من المرجح أن يتجاوز متوسط حجم أنظمة التحليل الكهربائي 600 ميجاوات.

## • من يقود تطوير الهيدروجين الأخضر؟

يبدو أن الهيدروجين الأخضر يشغل أذهان الجميع في الوقت الحالي، حيث تتطلع 10 دول على الأقل إلى الغاز من أجل أمن الطاقة في المستقبل والصادرات المحتملة. وآخر دولة تنضم إلى هذه العربة هي البرتغال، التي كشفت في شهر مايو عن استراتيجية وطنية للهيدروجين قيل إنها تبلغ قيمتها 7 مليارات يورو (7.7 مليار دولار) حتى عام 2030م.

إلى جانب شركات النفط والغاز، يرى مطورو الطاقة المتجددة الهيدروجين الأخضر كسوق ناشئة، حيث أعلنت شركة أورستد الرائدة في مجال طاقة الرياح البحرية الشهر الماضي عن أول مشروع كبير يستهدف قطاع النقل حصريًا. وبعيدًا عن هذه الأسماء الكبيرة، تأمل مجموعة من الشركات الصغيرة في الحصول على شريحة من فطيرة الهيدروجين الأخضر المتنامية. قد لا تكون شركات مثل ITM Power معروفة جيدًا اليوم، ولكن إذا حقق الهيدروجين الأخضر جزءًا صغيرًا من وعده، فقد يصبح ضخمًا في يوم من الأيام.

## • وماذا عن السيارات الهيدروجينية؟

ساعدت سيارة تويوتا ميراي الملفتة للنظر في تغذية الآمال المبكرة بأن المركبات التي تعمل بخلايا الوقود الهيدروجينية قد تتنافس مع السيارات الكهربائية لتحل محل محرك الاحتراق الداخلي. ولكن مع ازدهار سوق السيارات الكهربائية، تلاشت احتمالية أن يكون الهيدروجين منافسًا جديًا عن الأنظار، على الأقل في قطاع سيارات الركاب. هناك ما يقرب من 7600 سيارة تعمل بخلايا الوقود الهيدروجيني على طرق الولايات المتحدة اليوم، مقارنة بأكثر من 326400 سيارة كهربائية تم بيعها في الولايات المتحدة العام الماضي وحده.

## • هل تستطيع خطوط أنابيب الغاز الحالية التعامل مع الهيدروجين؟

تشير أبحاث صناعة الغاز الأوروبية إلى أنه يمكن إعادة استخدام شبكات خطوط أنابيب الغاز الحالية إلى حد كبير لنقل الهيدروجين. يمكن أن يؤدي استخدام خطوط الأنابيب الحالية إلى خفض تكاليف الاستثمار بنسبة 50–80 % مقارنة ببناء خطوط جديدة. وبحلول عام 2040م، تتوقع أوروبا أن يكون لديها حوالي 39.700 كيلومتر من البنية التحتية الممتدة لخطوط أنابيب الهيدروجين، مما يربط مناطق الإنتاج الفعالة من حيث التكلفة مع وجهات التصدير.

علاوة على ذلك، يخطط كونسورتيوم من شركات الغاز من ألمانيا والنمسا وإيطاليا لمد خط أنابيب هيدروجين بطول 3300 كيلومتر يربط شمال إفريقيا بإيطاليا والنمسا وألمانيا. وتتطلع إسبانيا وفرنسا إلى مشروع H2Med، وهو عبارة عن خط أنابيب تحت الماء يمتد عبر بلديهما، ويهدف إلى نقل الهيدروجين من إسبانيا إلى فرنسا عبر البحر الأبيض المتوسط.

## • استراتيجيات الهيدروجين الوطنية والإقليمية

بحلول عام 2020م، أدركت كل من ألمانيا والاتحاد الأوروبي أن استراتيجيات الهيدروجين الخاصة بهما سوف تتطلب واردات كبيرة. في عام 2022م، ضاعف الاتحاد الأوروبي هدف إنتاجه لعام 2030 من الهيدروجين المتجدد من 5 ملايين طن إلى 10 ملايين طن ويخطط أيضًا لاستيراد 10 ملايين طن أخرى بحلول عام 2030م. ويتطلب استيراد هذه الكمية ما يقرب من 500 تيراواط ساعة من الكهرباء المتجددة، أي ما يعادل 14 % من الطاقة الكهربائية المتجددة. استهلاك الكهرباء في الاتحاد الأوروبي بالكامل. وخارج أوروبا، أظهرت دول مثل اليابان وأستراليا، في إطار مشروع سلسلة إمداد الطاقة الهيدروجينية، تفضيلات ليس فقط للهيدروجين الأخضر ـ المشتق من مصادر الطاقة المتجددة والتحليل الكهربائي ـ بل وأيضاً للهيدروجين الأزرق «النظيف» الذي يتضمن احتجاز وتخزين الكربون. ومع ذلك، فإن الجدوى التجارية لهذه المشاريع وملاءمتها، نظرا لارتفاع تكاليف الشحن، لا تزال غير واضحة في الوقت الحالي.

## • اقتصاد الهيدروجين

اقترح العديد من العلماء أن الاستخدام الواسع النطاق للهيدروجين كوقود للطاقة سيحول اقتصاد الكوكب إلى اقتصاد الهيدروجين. تمت صياغة مصطلح اقتصاد الهيدروجين في السبعينات. وفي سياق اقتصاد الهيدروجين،

فإن الهيدروجين ليس مصدرًا أساسيًا للطاقة ولكنه حامل للطاقة، على غرار ما هي الكهرباء في بداية القرن الحادي والعشرين. وبموجب مفهوم اقتصاد الهيدروجين، سيتم توليد الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة المستغلة من خلال الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح الوفيرة، أو بطريقة كيميائية باستخدام الحرارة المولدة من محطات الطاقة النووية.

على افتراض أن المشاكل الحالية لتخزين الهيدروجين ونقله قد تم حلها وأصبحت المواد المناسبة لتخزين الهيدروجين متاحة بسهولة، فإن الهيدروجين المنتج سيكون مستقرًا كيميائيًا ويمكن تخزينه ونقله بسهولة. إن استخدام الهيدروجين المخزن والمنقول من شأنه أن يزيل فعليًا انبعاث ثاني أكسيد الكربون، وبالتالي سيصبح وسيلة للتخفيف من ظاهرة الاحتباس الحراري والاحتباس الحراري. قد يصبح اقتصاد الهيدروجين علاجًا سحريًا للبلدان النامية التي لا تعتمد على الوقود الأحفوري: نظرًا لأن مصادر الطاقة المتجددة، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية، موزعة على نطاق واسع وبشكل موحد على الكوكب، ستكون جميع البلدان قادرة على تحقيق الاستقلال في مجال الطاقة وتجنب واردات الوقود الأحفوري الباهظة الثمن. وذلك باستخدام مزيج من الطاقة المتجددة والهيدروجين. إذا كان اقتصاد الهيدروجين سوف يتطور في المستقبل القريب أو البعيد سيعتمد بشكل كبير على التقدم التكنولوجي المتعلق بتخزين ونقل الهيدروجين وكذلك على التقدم التكنولوجي الذي سيتم إحرازه في طرق أخرى لتخزين الطاقة. يجادل أنصار اقتصاد الهيدروجين على نطاق عالمي بأن الهيدروجين هو أنظف مصدر للطاقة معروف للمستخدمين النهائيين، وخاصة في تطبيقات النقل، حيث لا يطلق مواد جسيمية وغازات دفيئة.

يؤكد منتقدو التحول إلى اقتصاد الهيدروجين أن تكلفة التحول إلى نظام وطني أو عالمي لتوزيع الهيدروجين قد تكون باهظة وأن الخطوة الوسيطة

قد تصبح أكثر جدوى اقتصاديًا: على سبيل المثال، الوقود الاصطناعي من الهيدروجين المنتج محليا وثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، مثل الإيثانول والميثانول، قد يحقق نفس أهداف اقتصاد الهيدروجين باستثمارات أقل بكثير. وبما أن مدخلات ثاني أكسيد الكربون ستكون من الغلاف الجوي، فإن هذا المخطط لن يساهم في زيادة انبعاثات الغازات الدفيئة. في نهاية العقد الأول من القرن الحادي والعشرين قد نرى علامات صغيرة ولكنها مقنعة تشير إلى التحول المستقبلي إلى اقتصاد الهيدروجين:

- اعتمدت العديد من المجتمعات الأوروبية من أيسلندا إلى اليونان الحافلات العامة التي تستخدم خلايا وقود الهيدروجين.

- قامت العديد من المستشفيات في دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بتركيب وحدات مشتركة تقوم بالتحليل الكهربائي للمياه وتخزين الهيدروجين لاستخدامه مع وحدات خلايا الوقود لتوليد الطاقة في حالات الطوارئ محليًا. تعتبر هذه الأنظمة مفيدة للاستخدام في حالات الطوارئ بسبب انخفاض متطلبات الصيانة والانبعاثات غير الملوثة. يمكن وضع هذه الأجهزة في أي مكان، على عكس المولدات التي تعمل بالاحتراق الداخلي، والتي يجب أن تحتوي على مساحة عادم كافية.

- بدأت دول مثل البرتغال وأيسلندا والنرويج والدنمارك وألمانيا واليابان وكندا بالإضافة إلى عدة ولايات في الولايات المتحدة الأمريكية، مثل كاليفورنيا وأوريجون ومينيسوتا وتكساس، الاستثمار في أنظمة شبكات توزيع الهيدروجين. وعلى الرغم من أن هذه الأنظمة أثبتت أنها مكلفة في البداية، إلا أن الاختراقات التكنولوجية والأساليب المحسنة لنقل الهيدروجين قد تصبح مربحة في مجتمع مستقبلي يهيمن عليه الهيدروجين.

- وقد بدأت البرامج التجريبية للهيدروجين وخلايا الوقود في كل بلدان منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، فضلاً عن روسيا والصين والهند والعديد من بلدان الشرق الأوسط.

لقد أصبح مفهوم اقتصاد الهيدروجين مفهوما مستقبليا أثار قدرا كبيرا من الانتقادات والنقاش، النابعة في المقام الأول من تكلفة خلايا وقود الهيدروجين وتكلفة البنية التحتية لتوزيع الهيدروجين. يهيمن الوقود الأحفوري على مجتمعنا في الوقت الحاضر لدرجة أنه يكاد يكون من المستحيل التفكير في وسيلة نقل خارج إطار الوقود الأحفوري السائل، مثل البنزين والديزل. ومع ذلك، يجب ألا ننسى أن هذين النوعين من الوقود كانا جديدين تمامًا ولم يستخدما إلا نادرًا حتى نهاية القرن التاسع عشر. الهيدروجين بالنسبة للبشر في عام 2011م، هو نفس ما كان عليه البنزين بالنسبة للبشر في عام 1880م.

خلال القرن العشرين، وهو القرن الذي يتميز بالاستخدام الواسع النطاق والاستكشاف المكثف والاستنزاف السريع للوقود الأحفوري، تم تطوير بنية تحتية على مستوى الكوكب لتعدين ونقل وتوزيع الوقود الأحفوري السائل. لم تكن محطة البنزين/البنزين، المنتشرة في كل مكان في المجتمع الحديث، موجودة دائمًا في كل ركن من أركان التطورات الحضرية تقريبًا. بالنسبة لمواطن ثمانينات القرن التاسع عشر، كانت البنية التحتية اليوم لنقل وتوزيع الوقود الأحفوري السائل تبدو باهظة الثمن وبعيدة المنال. ويبدو المستقبل الذي يتمتع ببنية تحتية هيدروجينية واسعة النطاق بنفس الطريقة بالنسبة لمواطني أوائل القرن الحادي والعشرين. إنها حقيقة لا جدال فيها أن البنزين والديزل سوف ينفدان في وقت ما في المستقبل القريب أو البعيد. ستكون هناك نقطة في مستقبل البشرية، حيث سيتم تقليص استخدام الوقود الأحفوري السائل بشكل كبير وسيتوقف نهائيًا.

ومن المحتم أن يحل وقود آخر محل الوقود الأحفوري السائل المستخدم حاليا، ويعتبر الهيدروجين مرشحا جيدا ليصبح هذا الوقود. وسوف يتبع هذا التطور الحتمي استثمارات كبيرة من القطاعين العام والخاص في إنتاج ونقل وتوزيع الهيدروجين. قد تصبح محطة تعبئة الهيدروجين في المستقبل منتشرة في كل مكان مثل محطة البنزين/ النفط في بداية القرن الحادي والعشرين. والفرق بين الوقودين هو أن الهيدروجين يمكن إنتاجه بشكل مستمر عن طريق مصادر الطاقة المتجددة أو غيرها من مصادر الطاقة الموثوقة والصديقة للبيئة في جميع البلدان وجميع المجتمعات البشرية. ونتيجة لذلك، فإن محطة توزيع الهيدروجين واقتصاد الهيدروجين مستدامان وسيستمران لفترة أطول بكثير من الوقود الأحفوري السائل (Michaelides, 2012).

# تقييم الأثر البيئي للهيدروجين الأخضر

أحد المخاطر البيئية الرئيسية المرتبطة بالهيدروجين الأخضر هو احتمال ندرة المياه. يتطلب إنتاج الهيدروجين الأخضر كمية كبيرة من المياه، وفي بعض المناطق التي تعاني بالفعل من ندرة المياه، قد تؤدي هذه الزيادة في الطلب إلى تفاقم نقص المياه الحالي. في حين أن استخدام المياه منزوعة الأيونات التي تنتجها محطات تحلية المياه قد يقلل من الطلب على المياه العذبة، فإنه يولد الحاجة إلى تصريف تيار من المياه المالحة إلى مصادر المياه والتربة.

وبالإضافة إلى ذلك، فإن إنتاج الأمونيا والميثانول يولد النفايات، وغالباً ما ينطوي على استخدام المواد الحفازة والمواد الكيميائية الأخرى التي يمكن أن تكون سامة أو ضارة بالبيئة، ومن المحتمل أن تلوث مصادر المياه والتربة أثناء الإنتاج والنقل، إذا لم يتم التعامل معها بشكل صحيح. وفي حالة التصريف المستمر أو التسرب إلى المسطحات المائية، فإن ذلك قد يمثل خطراً مباشراً على الحياة المائية، مع ما يترتب على ذلك من آثار على سبل عيش المجتمعات التي تعتمد عليها.

كما أن أحد المخاوف الرئيسية بين السلطات العامة والمواطنين فيما يتعلق باستخدام الهيدروجين الأخضر هو المخاطر التي تشكلها على صحة المجتمع وسلامته، والتي يعالجها المعيار البيئي والاجتماعي (ESPS 4). يتطلب تخزين الهيدروجين ونقله استخدام حاويات وخطوط أنابيب عالية الضغط، والتي يمكن أن يشكل تهديدًا للمجتمعات المجاورة في حالة حدوث تسربات أو انفجارات.

يمكن أن تؤدي الحوادث التي تنطوي على نقل الهيدروجين أيضًا إلى حدوث انفجارات وحرائق، مما قد يسبب ضررًا لكل من الأشخاص والبيئة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الهيدروجين الأخضر المنتج باستخدام طاقة الرياح البحرية قد

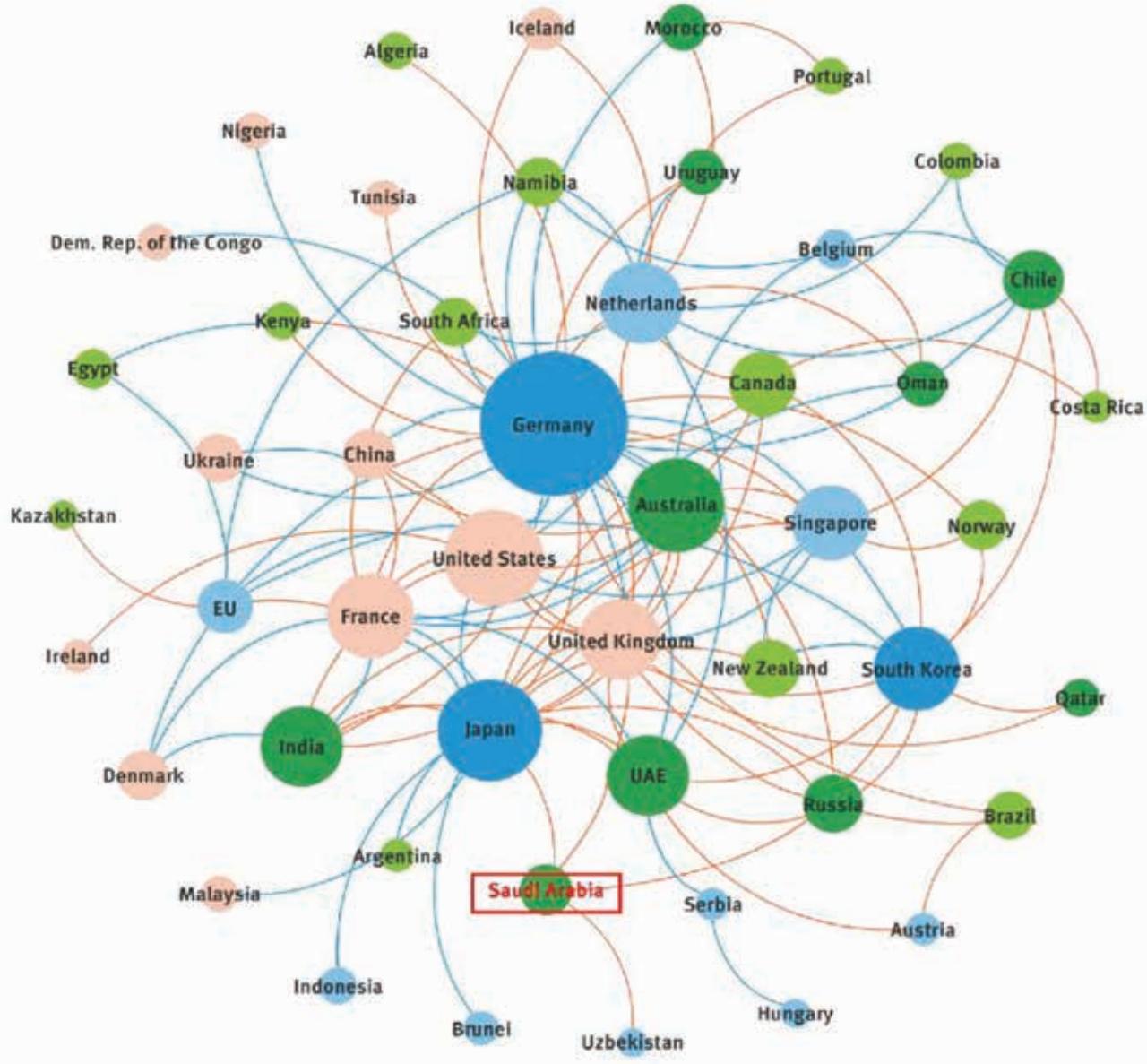
يشكل مخاطر على الموائل الساحلية والبحرية، والتي قد توفر خدمات النظام البيئي لمجتمعات الصيد المحلية. وفي الوقت نفسه، إذا تم استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية كمصدر للطاقة، فقد تكون هناك حاجة إلى مساحات كبيرة من الأراضي الصالحة للزراعة للحصول على القوة الكهربائية اللازمة، مما قد يؤدي إلى توليد استخدامات متضاربة للأراضي. وهناك خطر بيئي آخر مرتبط بالهيدروجين الأخضر وهو إمكانية استخدام الأراضي وتغيير الغطاء الأرضي. إن إنتاج الطاقة المتجددة، اللازمة لتشغيل التحليل الكهربائي، يتطلب في كثير من الأحيان مساحات كبيرة من الأراضي. وقد يؤدي ذلك إلى تحويل الموائل الطبيعية أو الأراضي الزراعية، مما قد يكون له آثار سلبية على التنوع البيولوجي والأمن الغذائي. قد تؤدي التغييرات في استخدام الأراضي التي تنطوي عليها مشاريع GH واسعة النطاق والمزارع المتجددة واسعة النطاق ذات الصلة إلى فقدان المناطق العازلة الطبيعية مثل الأراضي الرطبة وأشجار المانغروف وغابات المرتفعات التي تخفف من آثار المخاطر الطبيعية مثل الفيضانات والانهيارات الأرضية والحرائق؛ وقد يؤدي ذلك إلى زيادة الضعف والمخاطر والآثار المتعلقة بسلامة المجتمع والصحة.

وبصرف النظر عن اعتبارات التأثيرات المتعلقة باستخدام الأراضي، يمكن أن يتأثر الحفاظ على التنوع البيولوجي بتأثيرات الضغط المفرط على موارد المياه، سواء كانت مياه عذبة أو مياه بحر، التي تستقبل تصريف المياه المالحة من محطات تحلية المياه. بالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل توربينات الرياح يمكن أن يكون له آثار سلبية على الحياة البرية، بما في ذلك الطيور والخفافيش المهاجرة أو المهددة بالانقراض، والتي يمكن أن تصاب أو تقتل في تصادمات شفرات توربينات الرياح. ولضمان تطوير مشاريع الهيدروجين الأخضر بطريقة شاملة ومستدامة ومسؤولة اجتماعيًا، توصي دراسة نطاق GH باستخدام التقييم البيئي والاجتماعي الاستراتيجي (SESA).

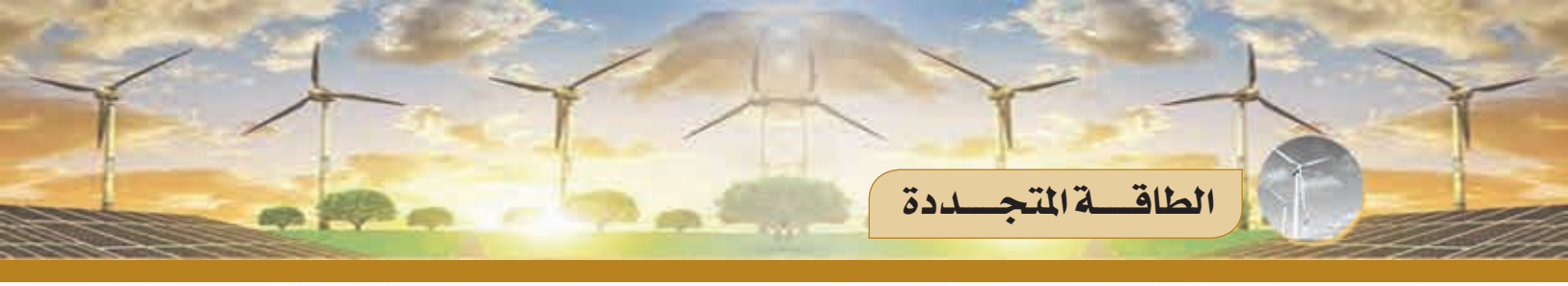
SESA هـي أداة تسـمح لمطـوري المشـاريع بتقييـم الآثـار البيئيـة والاجتماعيـة المحتملة لسياسات أو خطط أو برامج الهيدروجين الأخضر من منظور استراتيجي. ويأخذ في الاعتبار الأنواع المتنوعة من البنية التحتية والتقييم البيئي والاجتماعي ومتطلبات الترخيص في مشاريع الهيدروجين الأخضر المحتملة والمرافق المرتبطة بها، ويوصي بوضع التدابير المناسبة للتخفيف من الآثار والمخاطر طوال تنفيذ السياسة أو الخطة أو البرنامج. يمكن أن يساعد SESA أيضًا في تحديد الفرص لمشاركة أصحاب المصلحة ومشاركتهم، مما قد يؤدي إلى تطوير مشاريع أكثر استدامة ومسؤولية اجتماعيًا.

## • جهود المملكة في مجال الهيدروجين الأخضر

حققت شركة نيوم للهيدروجين الأخضر، وهي مشروع مشترك بين أكوا باور وإير برودكتس ونيوم، بإنشاء أكبر مصنع GH2 في العالم في مدينة نيوم، ومن المتوقع أن ينتج ما يصل إلى 600 طن يوميًا من الأمونيا الخضراء للتصدير من 4 جيجاوات من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بحلول نهاية عام 2026م. تم إبرام اتفاقية شراء حصرية لمدة 30 عامًا مع شركة Air Products. ويتم تمويل أكثر من ثلثي قيمة الاستثمار من 23 بنكاً ومؤسسة مالية محلية وإقليمية ودولية. (تم شرح المشروع بالتفصيل في الفصل التاسع).




تصور لشبكة شراكة الهيدروجين العالمية. تشير الظلال الخضراء إلى البلدان الموجهة نحو التصدير (قليلاً وبقوة ومن بينها المملكة العربية السعودية)، وتشير الظلال الزرقاء إلى البلدان الموجهة نحو الاستيراد (قليلاً/قوياً)، في حين يشير اللون الأحمر الفاتح إلى موقف البلدان المحايد أو المكتفي ذاتياً.
(UNIDO, IRENA and IDOS, 2023)



# الطاقـــــــة النوويـــــــة

وبينما يحاول العالم تحويل أنظمة الطاقة لديه بعيداً عن الوقود الأحفوري نحو مصادر الطاقة المنخفضة الكربون، منها الطاقة الكهرومائية، وطاقة الرياح، والطاقة الشمسية، والحرارية الأرضية والطاقة البيولوجية، ولكن أيضاً الطاقة النووية. إن الطاقة النووية تطلق عادة قدراً ضئيلاً للغاية من ثاني أكسيد الكربون عن كل وحدة من إنتاج الطاقة، كما أنها أفضل كثيراً من الوقود الأحفوري في الحد من مستويات تلوث الهواء المحلي. ولكن في حين أن بعض البلدان تستثمر بكثافة في زيادة إمداداتها من الطاقة النووية، فإن بلداناً أخرى توقف محطاتها عن العمل. وبالتالي فإن الدور الذي تلعبه الطاقة النووية في نظام الطاقة محدد جدًا لكل بلد.

إن الطاقة النووية والطاقة الكهرومائية هي واحدة من أقدم تقنيات الطاقة المنخفضة الكربون. كان توليد الطاقة النووية موجودًا منذ الستينيات، ولكنه شهد نموًا هائلاً على مستوى العالم في السبعينيات والثمانينيات والتسعينيات.

يتم تفريغ الطاقة النووية عن طريق التفاعلات النووية إما عن طريق الانشطار أو الاندماج. في الاندماج النووي، تتحد الذرات لتشكل ذرة أكبر. في الانشطار النووي، يحدث انقسام الذرات لتكوين ذرات أصغر عن طريق إطلاق الطاقة. تنتج محطات الطاقة النووية الطاقة باستخدام الانشطار النووي. تنتج الشمس الطاقة باستخدام آلية الاندماج النووي.

ما مقدار الطاقة التي تأتي من الطاقة النووية؟ وكيف يتغير دورها مع مرور الوقت؟ في هذا الفصل نلقي نظرة على مراحل توليد الطاقة النووية ، وسجل سلامتها مقارنة بمصادر الطاقة الأخرى وتقييم الاثر البيئي.

## هل الطاقة النووية متجددة أم غير متجددة؟

الطاقة النووية هي الطاقة التي تأتي من قلب الذرة (النواة). ومن أجل الحصول على الطاقة النووية، يجب إطلاقها من الذرة. الانشطار النووي هو عملية تنقسم فيها الذرة إلى نواتين أصغر أو أكثر وهي العملية التي يتم من خلالها استخدام الطاقة النووية لتوليد الكهرباء. المفاعل النووي هو جهاز يمكنه بدء سلسلة من تفاعلات الانشطار النووي والتحكم فيها لإنتاج الكهرباء. ويحتوي قلب المفاعل على وقود اليورانيوم. يُشار إلى الطاقة النووية أحيانًا على أنها تكنولوجيا طاقة نظيفة لأنها تنتج ما يقرب من الصفر من ثاني أكسيد الكربون أو انبعاثات الغازات الدفيئة الأخرى. وتتجنب الطاقة النووية أيضًا إنتاج ملوثات الهواء التي غالبًا ما ترتبط بحرق الوقود الأحفوري للحصول على الطاقة.

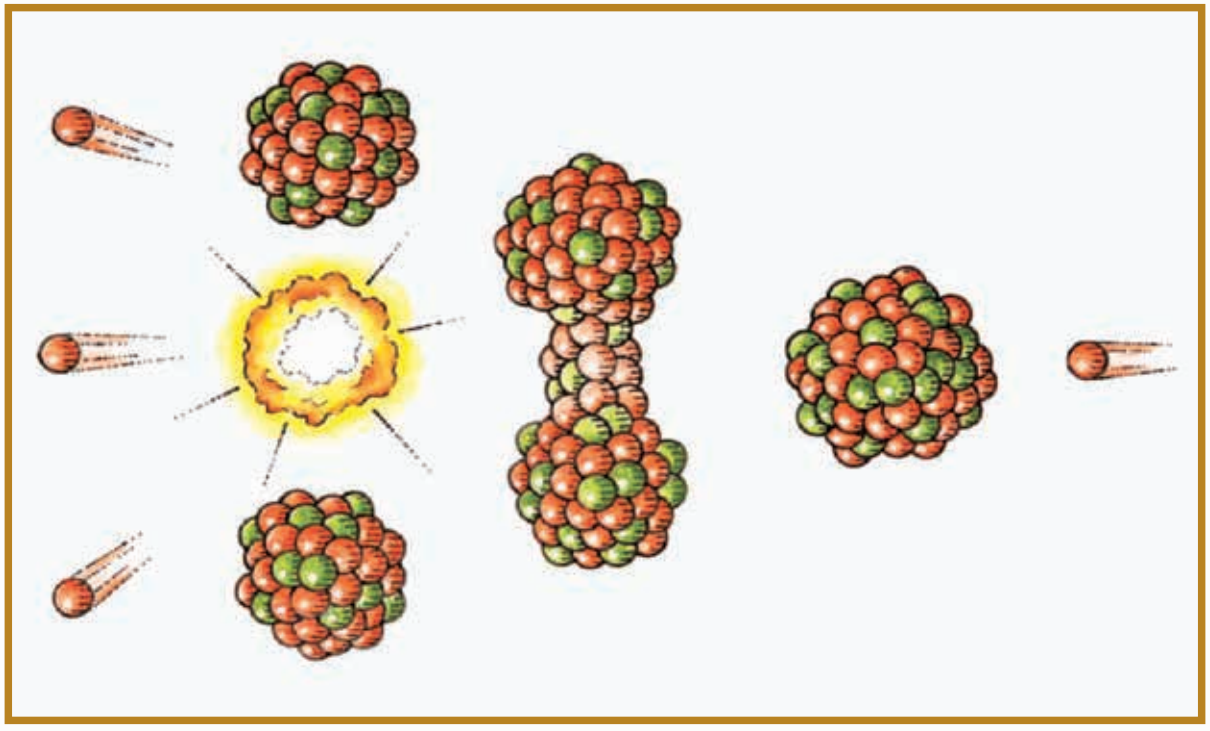
يحدث الانشطار داخل محطات الطاقة النووية. وعلى وجه التحديد، تولد محطات الطاقة النووية الكهرباء باستخدام البخار لتدوير التوربينات. يتم توليد هذا البخار من الحرارة الناتجة أثناء الانشطار النووي. المنتج الثانوي الرئيسي لإنتاج الطاقة النووية هو البخار الزائد. يتم إعادة تدوير هذا البخار الزائد في الغلاف الجوي كبخار ماء نظيف. ومع ذلك، هناك أيضًا مواد مشعة يمكن توليدها كمنتج ثانوي للانشطار النووي. تستخدم محطات الطاقة النووية التقليدية اليورانيوم كشكل أساسي للوقود..حيث تستخدم كمية ضئيلة من الوقود لتوليد نفس كمية الكهرباء التي يمكن أن تنتجها محطة توليد الطاقة التي تعمل بالفحم أو الغاز (على سبيل المثال، يحتوي 1 كجم من اليورانيوم على نفس كمية الطاقة التي يحتوي عليها 2.7 مليون كجم من الفحم)، لذا فإن الوقود النووي يعتبر مصدرًا موثوقًا للطاقة لعقود قادمة.

على الرغم من أن اليورانيوم معدن شائع جدًا ويوجد في جميع أنحاء العالم، إلا أن الانشطار النووي يتطلب اليورانيوم المعروف باسم U235، وهو نادر نسبيًا. بينما اليورانيوم الطبيعي المستخرج من مياه البحر (U238) لا ينضب فعليًا. وعلى وجه التحديد، كان قادرًا على إظهار أن المفاعلات المولدة التي تستخدم الانشطار النووي يمكنها توفير احتياجات الطاقة طالما ما تبقى من عمر الشمس الحالي والذي يبلغ حوالي خمسة مليارات سنة. وهذا يجعل المورد قابلاً للتجديد بشكل طبيعي. والسبب في ذلك هو أن المفاعلات المولدة هي مفاعلات نووية تستهلك مواد انشطارية أقل مما تولدها.

تعد الطاقة النووية حاليًا مصدرًا مستدامًا للطاقة ولكنها يمكن أن تصبح متجددة تمامًا إذا تغير مصدر اليورانيوم من خام مستخرج إلى مياه البحر. تشير التقديرات إلى وجود 4.5 مليار طن من اليورانيوم في مياه البحر بشكل عام. وبما أن اليورانيوم المستخرج يتم تجديده بشكل مستمر من خلال العمليات الجيولوجية، فإن الطاقة النووية ستصبح لا نهاية لها متجددة. تعتبر مصادر الطاقة غير متجددة إذا استغرق خلقها وقتا طويلا جدا، مثل الوقود الأحفوري، أو إذا حدث خلقها منذ فترة طويلة ومن غير المرجح أن يحدث مرة أخرى، مثل اليورانيوم. إذا تم استخراج اليورانيوم من مياه البحر بدلا من استخراجه من الخام، فإن الطاقة النووية تعتبر متجددة بنسبة 100 %. وذلك لأن اليورانيوم المستخرج من التكوينات الصخرية لليورانيوم وحرقه في المفاعلات، بمجرد اختفائه، يختفي إلى الأبد، في حين أن اليورانيوم المستخرج من مياه البحر يتجدد بشكل طبيعي ودوري. تنشأ تركيزات اليورانيوم في مياه البحر من التفاعلات الكيميائية بين الماء والصخور، وبعبارات بسيطة، تضمن «التجوية» المتنوعة للصخور تجديد جميع العناصر الموجودة في مياه البحر بشكل مستمر.

## • الانشطار النووي

الانشطار هو العملية التي تنقسم فيها نواة ثقيلة إلى قسمين أصغر. يتم إطلاق كمية كبيرة من الطاقة في هذه العملية، وهذه الطاقة هي أساس أنظمة الطاقة النووية. تكون الشظايا النووية في حالات شديدة الإثارة وتنبعث منها نيوترونات وأشكال أخرى من الإشعاع. يمكن للنيوترونات بعد ذلك أن تسبب انشطارات جديدة، والتي بدورها تنتج المزيد من النيوترونات، وهكذا دواليك. تشكل مثل هذه السلسلة المستمرة من الانشطارات ذاتية الاستدامة تفاعلًا متسلسلًا انشطاريًا. في القنبلة الذرية، تم تصميم التفاعل المتسلسل لزيادة شدته حتى انشطار جزء كبير من المادة. هذه الزيادة سريعة جدًا وتنتج انفجارات حادة للغاية وحيوية للغاية تتميز بها هذه القنابل.



رسم توضيحي يصور الانشطار النووي، حيث يقسم النيوترون نواة ثقيلة ويطلق الطاقة (Curley, 2012)

في المفاعل النووي، يتم الحفاظ على التفاعل المتسلسل عند مستوى ثابت تقريبًا. تم تصميم المفاعلات النووية بحيث لا يمكن أن تنفجر مثل القنابل الذرية. يتم إطلاق معظم طاقة الانشطار -حوالي 85 % منها- خلال فترة زمنية قصيرة جدًا بعد حدوث العملية. وتأتي بقية الطاقة من التحلل الإشعاعي لنواتج الانشطار، وهو ما تسمى الشظايا بعد انبعاث النيوترونات. ويستمر التحلل الإشعاعي عند إيقاف سلسلة الانشطار، ويجب التعامل مع طاقتها في أي تصميم مناسب للمفاعل.

## • التفاعل المتسلسل والحرج

يتم تحديد مسار التفاعل المتسلسل من خلال احتمال أن يتسبب النيوترون المنطلق أثناء الانشطار في انشطار لاحق. إذا تسبب أقل من نيوترون واحد في المتوسط في انشطار آخر، فإن معدل الانشطار سينخفض بمرور الوقت وينخفض في النهاية إلى الصفر. يقال أن هذا الوضع دون الحرج. عندما يتسبب نيوترون واحد في المتوسط من الانشطار في انشطار آخر، يكون معدل الانشطار ثابتًا ويكون المفاعل حرجًا. والمفاعل الحرج هو ما هو مرغوب فيه عادة. عندما يتسبب أكثر من نيوترون في انشطار لاحق، يزداد معدل الانشطار والقدرة ويسمى الوضع فوق الحرج. من أجل التمكن من زيادة الطاقة، تم تصميم المفاعلات لتكون فوق الحرجة قليلاً عند إزالة جميع الضوابط.

## • التحكم بالمفاعل

يكون المعامل المسمى بالتفاعلية موجبًا عندما يكون المفاعل فوق حرج، وصفرًا عند الحرجية، وسالبًا عندما يكون المفاعل دون الحرج. يمكن التحكم في التفاعلية عن طريق إضافة الوقود أو إزالته، أو تغيير جزء النيوترونات الذي يتسرب من النظام، أو تغيير كمية المادة الماصة التي تتنافس مع الوقود

للنيوترونات. يتم التحكم بشكل عام عن طريق تغيير المتصات، والتي عادة ما تكون على شكل عناصر متحركة - قضبان التحكم - أو في بعض الأحيان عن طريق تغيير تركيز المتص في مبرد المفاعل.

عادة ما تكون تغييرات التسرب تلقائية؛ على سبيل المثال، قد تؤدي زيادة الطاقة إلى غليان سائل التبريد، مما يؤدي بدوره إلى زيادة تسرب النيوترونات وتقليل التفاعل. يعد هذا، بالإضافة إلى أنواع أخرى من ردود الفعل السلبية لتفاعل الطاقة، جوانب حيوية لتصميم المفاعل الآمن. يتم تسهيل التحكم في المفاعل من خلال وجود النيوترونات المتأخرة. تنبعث هذه النيوترونات من منتجات الانشطار بعد مرور بعض الوقت على حدوث الانشطار. إن نسبة النيوترونات المتأخرة صغيرة، لكن هناك عددًا كافيًا من هذه النيوترونات لأنواع التغييرات اللازمة لتنظيم مفاعل عامل، وبالتالي يجب أن «ينتظر» التفاعل المتسلسل قبل أن يتمكن من الاستجابة. وهذا يسهل العملية إلى حد كبير.

## • المواد الانشطارية والخصبة

يمكن لجميع النويدات الثقيلة أن تنشطر إذا كانت في حالة إثارة كافية، ولكن القليل منها فقط ينشطر بسهولة عندما تصطدم بالنيوترونات البطيئة (منخفضة الطاقة). وتسمى هذه الأنواع من الذرات الانشطارية. وأهمها اليورانيوم ($^{233}U$)، واليورانيوم ($^{235}U$)، والبلوتونيوم ($^{239}Pu$)، والبلوتونيوم ($^{241}U$).

والنوع الوحيد الذي يوجد بكميات قابلة للاستخدام في الطبيعة هو اليورانيوم U235، الذي يشكل 0.711 % فقط من اليورانيوم الطبيعي من حيث الوزن. يمكن إنتاج اليورانيوم U233 عن طريق احتجاز النيوترونات في الثوريوم الطبيعي ($^{232}Th$)؛ وهذا يعني أنه عندما تمتص نواة الثوريوم U232 نيوترونًا، فإنها تصبح يورانيوم U233. وبالمثل، يتم إنشاء البلوتونيوم PU239 عن طريق احتجاز النيوترون

في اليورانيوم U238 ($^{238}U$)؛ المكون الرئيسي لليورانيوم الموجود طبيعيًا)، ويتكون البلوتونيوم PU241 عندما يتم امتصاص نيوترون في البلوتونيوم U240 ($^{240}Pu$).

يتراكم البلوتونيوم U240 بمرور الوقت في معظم مفاعلات الطاقة. يطلق على الثوريوم U232 واليورانيوم U238 والبلوتونيوم U240 مواد خصبة لأنها يمكن أن تتحول إلى مواد انشطارية. يحتوي مفاعل الطاقة على مواد انشطارية وخصبة. تحل المواد الخصبة محل المواد الانشطارية التي يتم تدميرها بالانشطار. وهذا يسمح للمفاعل بالعمل لفترة أطول قبل أن تنخفض كمية المواد الانشطارية إلى النقطة التي لا يمكن فيها الحفاظ على الحالة الحرجة.

## • إزالـــة الحـــرارة

وتتحول طاقة الانشطار بسرعة إلى حرارة، ويترسب الجزء الأكبر منها في الوقود. ولذلك مطلوب المبرد لإزالة هذه الحرارة. المبرد الأكثر شيوعا هو الماء، ولكن يمكن استخدام أي سائل. تم استخدام الماء الثقيل Heavy Water (أكسيد الديوتيريوم)، والهواء، وثاني أكسيد الكربون، والهيليوم، والصوديوم السائل، وسبائك بوتاسيوم الصوديوم (المعروفة باسم NaK)، والأملاح المنصهرة، والهيدروكربونات في المفاعلات أو تجارب المفاعلات.

يتم تشغيل بعض مفاعلات الأبحاث بطاقة منخفضة جدًا ولا تحتاج إلى نظام تبريد مخصص؛ في مثل هذه الوحدات تتم إزالة كمية صغيرة من الحرارة المتولدة عن طريق التوصيل والحمل الحراري إلى البيئة. يجب أن تحتوي المفاعلات ذات الطاقة العالية جدًا على أنظمة تبريد متطورة للغاية لإزالة الحرارة بسرعة وبشكل موثوق؛ وإلا فإن الحرارة سوف تتراكم في وقود المفاعل وتذوبه.

## • التدريع

يعد المفاعل العامل مصدرًا قويًا للإشعاع، نظرًا لأن الانشطار والتحلل الإشعاعي اللاحق ينتجان نيوترونات وأشعة جاما، وكلاهما إشعاعات عالية الاختراق. يجب أن يكون للمفاعل درع خاص حوله لامتصاص هذا الإشعاع من أجل حماية الفنيين وغيرهم من العاملين في المفاعل.

عمال داخل درع حراري ضخم لمفاعل محطة هينكلي بوينت للطاقة النووية الأمريكية في الخمسينات من القرن الماضي. الدروع هي خط الدفاع الأول ضد التسرب الإشعاعي العرضي (Curley, 2012)

في فئة شائعة من مفاعلات الأبحاث المعروفة باسم «أحواض السباحة»، يتم توفير التدريع عن طريق وضع المفاعل في بركة كبيرة وعميقة من الماء. وفي أنواع أخرى من المفاعلات، يتكون الدرع من هيكل خرساني سميك حول نظام المفاعل. قد يحتوي الدرع أيضًا على معادن ثقيلة، مثل الرصاص أو الفولاذ، لامتصاص أكثر فعالية لأشعة جاما، ويمكن استخدام الركام الثقيل في الخرسانة نفسها لنفس الغرض.

## • التركيز الحرج والحجم

لا يمكن وضع كل ترتيب للمواد التي تحتوي على الوقود الانشطاري في حالة حرجة. وحتى لو لم يكن هناك تسرب للنيوترونات من المفاعل، فلا بد من وجود تركيز حرج للمواد الانشطارية. وإلا، فإن امتصاص النيوترونات من قبل المكونات الأخرى للمفاعل سيكون مرتفعًا جدًا بحيث لا يسمح ببدء التفاعل المتسلسل الحرج. وبالمثل، حتى لو كان هناك تركيز عالٍ بدرجة كافية للحرجية، فيجب أن يكون المفاعل كبيرًا بما يكفي بحيث لا يتسرب الكثير من النيوترونات قبل امتصاصه. وهذا يفرض حدًا حرجًا لحجم المفاعل بتركيز معين. على الرغم من أن المادة الانشطارية الوحيدة المفيدة في الطبيعة، وهي اليورانيوم U235 ، توجد في اليورانيوم الطبيعي، إلا أنه لا يوجد سوى عدد قليل من مجموعات وترتيبات هذه المواد وغيرها التي يمكن أن تصل إلى الحالة الحرجة.

ولزيادة نطاق تصاميم المفاعلات الممكنة، يمكن استخدام اليورانيوم المخصب. تستخدم معظم مفاعلات الطاقة اليوم وقود اليورانيوم المخصب حيث تمت زيادة نسبة اليورانيوم U235 إلى 3 إلى 4 %. وهذا حوالي خمسة أضعاف التركيز الموجود في اليورانيوم الطبيعي.

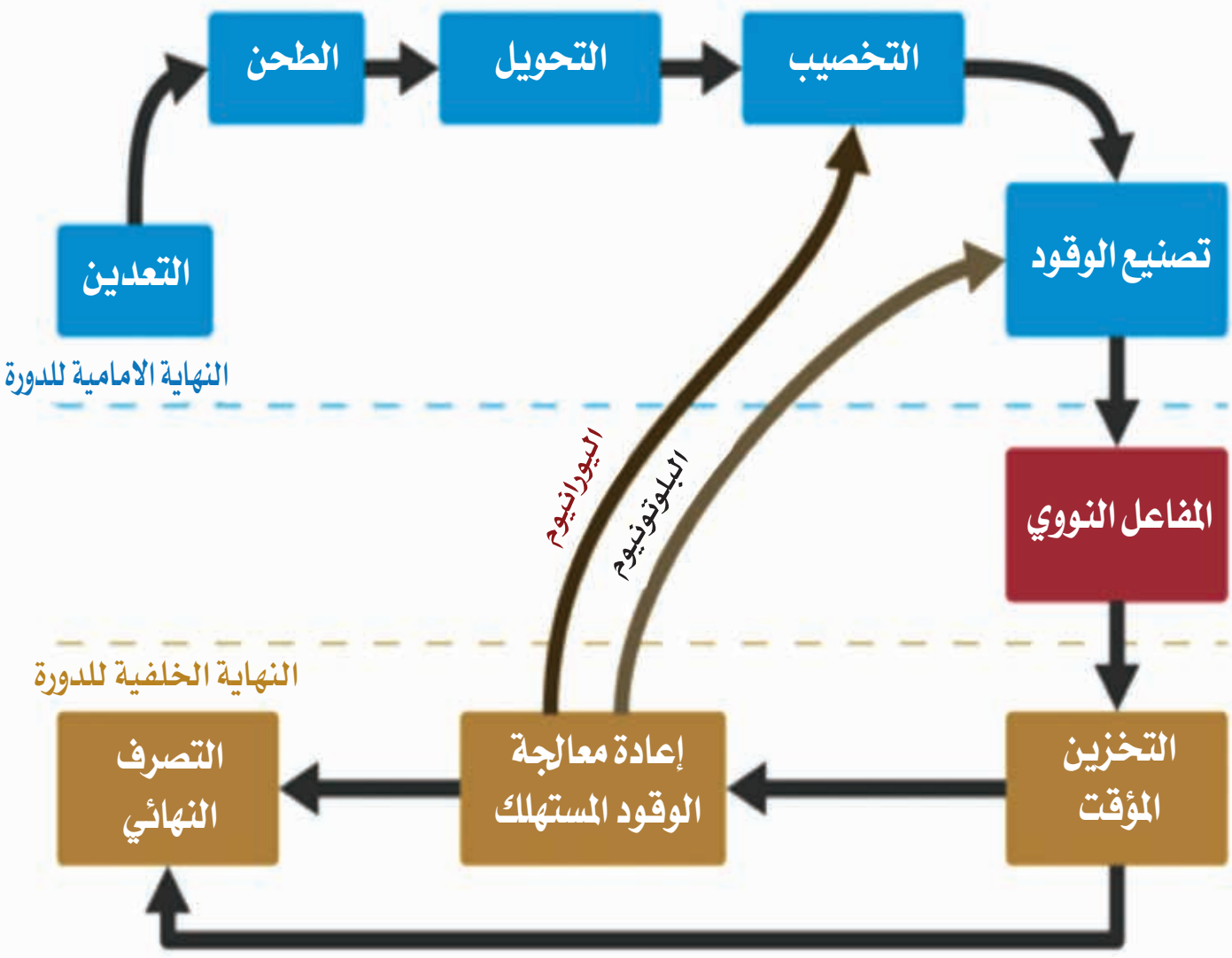
# دورة الوقود النووي

توفر محطات الطاقة النووية 80 % من الكهرباء في فرنسا، و30 % في اليابان، و 20 % في الولايات المتحدة، حيث تعمل 104 محطات. باستثناء التسرب الطفيف في مصنع ثري مايل آيلاند في بنسلفانيا في عام 1979 والانهيار الكبير لمفاعل نووي في تشيرنوبيل بـ أوكرانيا في عام 1986، فإن 430 محطة طاقة في العالم تعمل بأمان.

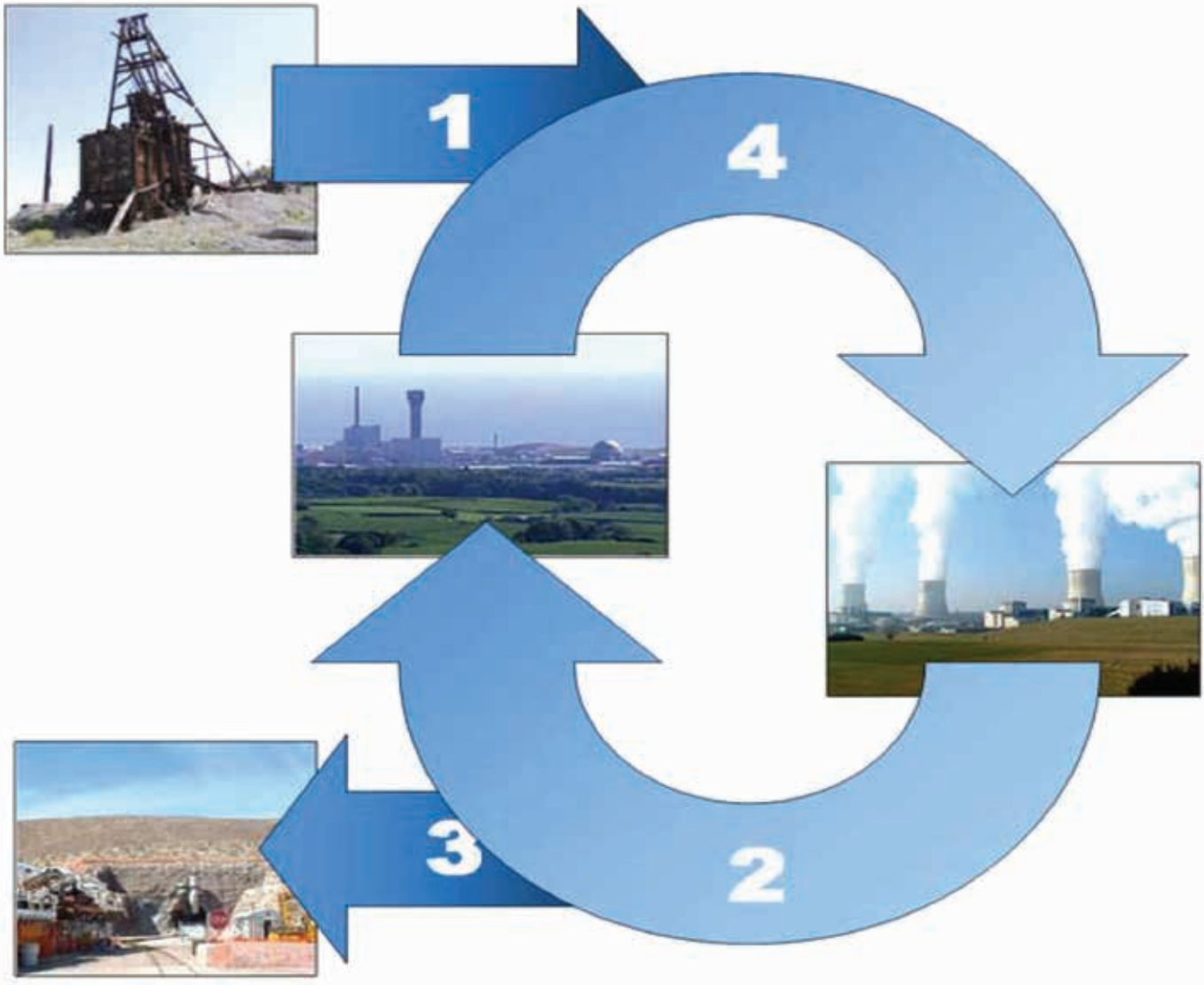
عموماً الطاقة النووية Nuclear Energy، أو الطاقة الذرية Atomic Energy، هي الطاقة التي يتم إطلاقها بكميات كبيرة في العمليات التي تؤثر على النوى الذرية، النوى الكثيفة للذرات. وهي تختلف عن طاقة الظواهر الذرية الأخرى مثل التفاعلات الكيميائية العادية، والتي تتضمن فقط الإلكترونات المدارية للذرات. إحدى طرق إطلاق الطاقة النووية هي الانشطار النووي المتحكم فيه في المفاعلات النووية، والتي يتم تشغيلها في أجزاء كثيرة من العالم كأدوات بحث، كأنظمة لإنتاج النظائر المشعة، والأهم من ذلك كمصادر للطاقة. وتسمى هذه الأخيرة عادة مفاعلات الطاقة.

دورة الوقود النووي هي سلسلة العمليات الصناعية التي تصف اليورانيوم طوال دورة حياته؛ من التعدين إلى المعالجة إلى توليد الكهرباء وأخيرًا إلى إعادة معالجتها ونفاياتها. تعتبر جميع الأنشطة المتعلقة بالطاقة النووية من بدايتها إلى نهايتها جزءًا من دورة الوقود النووي.

تنقسم الدورة إلى قسمين؛ الواجهة الأمامية والنهاية الخلفية. تشمل الواجهة الأمامية التعدين والطحن والمعالجة والتخصيب وتصنيع الوقود النووي. وتشمل النهاية الخلفية الهدف الأساسي لدورة الوقود، وتوليد الكهرباء، إلى جانب التخزين المؤقت، وإعادة المعالجة، وإعادة التدوير، والنفايات. نناقش باختصار طريقة عمل دورة الوقود النووي لليورانيوم.




دورة الوقـــود النـــــووي (معدلة من: WNA, 2015)




تبدأ دورة الوقود النووي عندما يتم استخراج اليورانيوم، وتخصيبه، وتصنيعه إلى وقود نووي، (1) يتم تسليمه إلى محطة الطاقة النووية. بعد الاستخدام في محطة الطاقة، يتم تسليم الوقود المستهلك إلى محطة إعادة المعالجة (2) أو إلى المستودع النهائي (3) للتخلص منه جيولوجيًا. عند إعادة المعالجة، يمكن إعادة تدوير 95 % من الوقود المستهلك لإعادته للاستخدام في محطة توليد الكهرباء (4) **(Stonge, 2011)**.

## • التعـــديـــن

يوجد اليورانيوم بشكل شائع نسبيًا في القشرة الأرضية، وهو أكثر وفرة بحوالي 500 مرة من الذهب وحوالي نفس وفرة القصدير. تمتلك العديد من الدول مناجم لليورانيوم، لكن كندا وكازاخستان وأستراليا هي أكبر منتجي اليورانيوم. هناك العديد من التقنيات لاستخراج الخام، ويعد التعدين تحت الأرض هو الأكثر شيوعًا نظرًا لأعماق معظم المناجم (World Nuclear Association, 2015).

## • الطحن والتخصيب والتصنيع

لا يمكن استخدام خام اليورانيوم المستخرج مباشرة لتشغيل مفاعل نووي؛ فهو يحتاج إلى معالجته وإثرائه لاستخدامه في إنتاج الطاقة. يتم إحضار الخام أولاً إلى المطحنة حيث يتم تحويله إلى U308، وهو شكل معزول من اليورانيوم يشار إليه باسم «الكعكة الصفراء». معظم محطات الطاقة لا يمكنها استخدام الوقود بهذا الشكل حتى الآن، حيث أن محتوى النظير الانشطاري لليورانيوم U235 يبلغ حوالي 0.7 % فقط.

لتخصيب اليورانيوم، الهدف هو زيادة تركيز U235 في العينة، بشكل عام بين 3–5 %. العملية الرئيسية المستخدمة لتحقيق ذلك هي استخدام أجهزة الطرد المركزي، التي تدور بسرعة كبيرة لفصل النظائر عن بعضها البعض، مما يسمح بالوصول إلى اليورانيوم U235. ومن أجل استخدامه في محطة توليد الكهرباء، يجب تصنيع الوقود على شكل كريات. يتم تشكيلها من ثاني أكسيد اليورانيوم المضغوط ويتم خبزها في فرن على حرارة 1400 درجة مئوية. يتم بعد ذلك تعبئة هذه الكريات في قضبان الوقود، والتي يتم تشكيلها في مجموعة للاستخدام في المفاعل النووي (World Nuclear Association, 2015).

## • توليـد الطاقـة

هناك حاجة إلى عدة مئات من مجمعات الوقود لمفاعل نووي، حيث يستخدم مفاعل بقدرة 1000 ميجاوات حوالي 75 طنًا من وقود اليورانيوم المخصب. يتم إنتاج الطاقة بشكل مشابه جدًا لمحطة توليد الطاقة التي تعمل بالفحم، إلا أن نوع الوقود وطرق الحصول على الحرارة تختلف بشكل كبير. عندما يمتص اليورانيوم U235 نيوترونات بطيئة الحركة، تنقسم الذرة، مما يسبب تفاعلًا نوويًا متسلسلاً. وهذا ينتج حرارة هائلة، ويمكن أن يمتص الماء هذه الحرارة. ويتحول الطور المائي إلى بخار يمكن استخدامه بعد ذلك لتدوير التوربين وتوليد الكهرباء.

يتم أيضًا استخدام بعض من اليورانيوم U238 لتوليد الطاقة، إلا أنه يجب تحويله إلى بلوتونيوم أولاً. يحدث هذا بشكل طبيعي في المفاعل، حيث يمتص اليورانيوم U238 نيوترونًا، ثم يضمحل بيتا ناقص مرتين حتى يصل إلى PU 239 يتحلل البلوتونيوم بعد ذلك من خلال سلسلة اضمحلال U235، ويمثل حوالي ثلث إنتاج الطاقة في المحطة. عادة يتم إنتاج 44 تيراواط/ساعة لكل طن من اليورانيوم الطبيعي (World Nuclear Association, 2015).

## • الوقود المستخدم وإعادة المعالجة

وبعد مرور الوقت، سوف تتضاءل كمية الوقود الصالح للاستخدام في المفاعل بسبب إنتاج العناصر الثقيلة ومنتجات الانشطار الأخرى. وبعد مرور 18 إلى 36 شهرًا، تتم إزالة الوقود من المفاعل، ومع ذلك لا تزال هناك إمكانية للطاقة الموجودة فيه، وتعتمد الكمية على نوع المفاعل. هذا الوقود ساخن جدًا ومشع، لذلك يتم تخزينه مؤقتًا في حوض تخزين من الماء، مما يؤدي إلى تبريده وامتصاص الإشعاع.

ويمكن بعد ذلك إعادة معالجة الوقود لأنه لا يزال يحتوي على U235 أكثر بقليل مما هو موجود في الطبيعة (إذا كان الوقود يأتي من مفاعل الماء الخفيف، أو BWR أو PWR). يمكن تحويل البلوتونيوم إلى وقود أكسيد مختلط (MOX)، حيث يتم دمج أكسيد اليورانيوم مع أكسيد البلوتونيوم. ويتم ذلك عن طريق إذابة قضبان الوقود في محلول للحصول على المواد المنفصلة (World Nuclear Association, 2015).

## • النفايـــــات

النفايات غير الصالحة للاستخدام التي يتم إنتاجها طوال دورة الوقود النووي، بما في ذلك النفايات منخفضة المستوى من جميع مراحل الدورة، والنفايات الوسيطة من المفاعل، والنفايات عالية المستوى التي يتم فصلها في إعادة المعالجة. ويمكن دمج النفايات في مادة صلبة، حيث تنتج النفايات السنوية من مفاعل بقدرة 1000 ميجاوات حوالي 5 أطنان.

في الوقت الحاضر لا توجد مرافق للتخلص من هذه المواد، فقط مرافق التخزين. وذلك لأنه لا توجد حاجة فورية للتخلص منه لأنه لا يشغل مساحة كبيرة، وأيضًا لأنه لا يزال من الممكن إعادة معالجته في وقت لاحق.

## • المفاعـــلات الحراريـــة والمتوسطة والســـريعة

يتم تصنيف المفاعلات بشكل ملائم وفقًا للطاقات النموذجية للنيوترونات التي تسبب الانشطار. النيوترونات المنبعثة من الانشطار نشطة للغاية؛ يبلغ متوسط طاقتها حوالي مليوني إلكترون فولت، أي أعلى بـ 80 مليون مرة من طاقة الذرات في المادة العادية في درجة حرارة الغرفة. وعندما تصطدم النيوترونات بالنوى في المفاعل، فإنها تفقد الطاقة. إن اختيار مواد المفاعل وتركيزات المواد الانشطارية يحدد مدى إبطائها بواسطة هذه الاصطدامات قبل التسبب في الانشطار.

في المفاعل الحراري Thermal Reactor، يُسمح بحدوث تصادمات كافية بحيث تصل معظم النيوترونات إلى التوازن الحراري مع ذرات المفاعل عند

طاقات تبلغ بضعة أجزاء من مئات الإلكترون فولت. تفقد النيوترونات الطاقة بكفاءة أكبر عن طريق اصطدامها بالذرات الخفيفة مثل الهيدروجين (الكتلة 1)، والديوتيريوم (الكتلة 2)، والبريليوم (الكتلة 9)، والكربون (الكتلة 12). المواد التي تحتوي على ذرات من هذا النوع - الماء، الماء الثقيل، معدن وأكسيد البريليوم، والجرافيت - يتم دمجها عمدًا في المفاعل لهذا السبب وتعرف بالمهدئات. وبما أن الماء والماء الثقيل يمكن أن يعملا أيضًا كمبردات، فيمكنهما القيام بمهمة مزدوجة في المفاعلات الحرارية.

أحد عيوب المفاعلات الحرارية هو أنه عند الطاقات المنخفضة، لا يمكن انشطار اليورانيوم U235 والبلوتونيوم PU239 بواسطة النيوترونات الحرارية (أو البطيئة) فحسب، بل يمكنه أيضًا التقاط النيوترونات دون الخضوع للانشطار. وهذا يدمر الذرات الانشطارية دون ظهور أي انشطار لها. عندما تسبب النيوترونات ذات الطاقة الأعلى الانشطار، يحدث عدد أقل من هذه الانشطار. ولتحقيق ذلك، يمكن بناء مفاعل ليعمل بدون وسيط. ومن ثم، اعتمادًا على عدد الاصطدامات التي تحدث مع الذرات الأثقل قبل حدوث الانشطار، يمكن أن تمتلك النيوترونات النموذجية المسببة للانشطار طاقات تتراوح بين 0.5 إلكترون فولت إلى آلاف الإلكترون فولت (المفاعلات المتوسطة) أو عدة مئات الآلاف من الإلكترون فولت (المفاعلات السريعة).

تتطلب مثل هذه المفاعلات تركيزات أعلى من المواد الانشطارية للوصول إلى الحالة الحرجة مقارنة بالمفاعلات الحرارية ولكنها أكثر كفاءة في تحويل المواد الخصبة إلى مواد انشطارية. وفي الواقع، يمكن تصميمها لإنتاج أكثر من ذرة انشطارية جديدة مقابل كل ذرة انشطارية يتم تدميرها. تسمى هذه المفاعلات بالمولدات Breeder Reactors. وقد تصبح المفاعلات المولدة ذات أهمية خاصة إذا تبين أن الطلب العالمي على الطاقة النووية طويل الأجل، حيث يتم تصنيع وقودها من مواد خصبة وفيرة للغاية (Curley, 2012) .

# تصميم ومكونات المفاعلات النووية

هناك العديد من الطرق التي يمكن من خلالها تصميم وبناء المفاعل. وقد تم تحقيق عدة أنواع تجريبيا . وعلى مر السنين، طور المهندسون النوويون مفاعلات تعمل بالوقود الصلب والوقود السائل، وعاكسات سميكة وبدون عاكسات، ودوائر تبريد قسرية، وأنظمة إزالة الحرارة بالتوصيل الطبيعي أو الحمل الحراري، وما إلى ذلك. ومع ذلك، تحتوي معظم المفاعلات على مكونات أساسية معينة، والتي سنتكلم عنها فيما يأتي.

## ❖ قلـــب المفاعـــل

تحتوي جميع المفاعلات على قلب، وهي منطقة مركزية تحتوي على الوقود، وكسوة الوقود، والمبرد، وحيثما تكون منفصلة عن الأخير، الوسيط. وفي النواة يحدث الانشطار وتهاجر النيوترونات الناتجة. عادة ما يكون الوقود غير متجانس، أي أنه يتكون من عناصر تحتوي على مواد انشطارية بالإضافة إلى مادة مخففة. قد يكون عامل التخفيف هذا عبارة عن مادة خصبة أو مجرد مادة ذات خواص ميكانيكية وكيميائية جيدة ولا تمتص النيوترونات بسهولة. يتم وضع المادة الانشطارية المخففة في غلاف وهي مادة تعزل الوقود عن المبرد وتحافظ على احتواء منتجات الانشطار المشعة.

تركيب قلب مفاعل في محطة للطاقة النووية في تايوان. وباعتباره المكان الذي يحدث فيه الانشطار النووي، فإن القلب هو عنصر أساسي في المفاعل النووي (Curley, 2012)

## ❖ أنـــــواع الوقـــــــود

تستخدم الأنواع المختلفة من المفاعلات أنواعًا مختلفة من عناصر الوقود. على سبيل المثال، يستخدم مفاعل الماء الخفيف (LWR)، وهو النوع الأكثر استخدامًا على نطاق واسع لتوليد الطاقة التجارية في الولايات المتحدة، وقودًا يتكون من كريات من ثاني أكسيد اليورانيوم الملبد المحملة في أنابيب تكسية من سبائك الزركونيوم يبلغ قياسها حوالي سنتيمتر واحد قطرها وطولها من ثلاثة إلى أربعة أمتار تقريبًا.

يتم تجميع هذه الأنابيب، التي تسمى الدبابيس، معًا في مجموعة وقود، مع ترتيب المسامير في شبكة مربعة. واليورانيوم المستخدم في الوقود مخصب بنسبة 3 إلى 4 %. وبما أن الماء الخفيف (العادي) يميل إلى امتصاص عدد أكبر من النيوترونات مقارنة بالمهدئات الأخرى، فإن مثل هذا التخصيب يعد أمرًا بالغ الأهمية. حيث يستخدم مفاعل كاندو (اليورانيوم والديوتيريوم الكندي) CANDU (Canadian Deuterium-Uranium)، وهو النوع الرئيسي من مفاعلات الماء الثقيل، اليورانيوم الطبيعي المضغوط في كريات. يتم إدخال هذه الكريات في أنابيب مرتبة في شبكة. يبلغ طول مجموعة الوقود هذه حوالي متر واحد، ويتم ترتيب عدة مجموعات من طرف إلى طرف داخل قناة داخل قلب المفاعل.

في مفاعل الجرافيت عالي الحرارة، يتكون الوقود من جزيئات كروية صغيرة تحتوي على ثاني أكسيد اليورانيوم في المركز مع أغلفة متحدة المركز من الكربون وكربيد السيليكون والكربون حولها. (تعمل هذه الأغلفة كغطاء مجهري). ويتم خلط الجسيمات مع الجرافيت وتغطيتها بطبقة من الجرافيت العيانية. في المفاعل السريع المبرد بالصوديوم، والذي يُطلق عليه عادةً مفاعل المعدن السائل (LMR)، يتكون الوقود من كريات ثاني أكسيد (تصميم فرنسي) أو دبابيس من سبائك اليورانيوم والبلوتونيوم والزركونيوم (تصميم أمريكي) في غلاف فولاذي.

يتكون النوع الأكثر شيوعًا من الوقود المستخدم في مفاعلات الأبحاث من ألواح من سبائك اليورانيوم والألمنيوم مع غلاف من الألومنيوم. يتم تخصيب اليورانيوم بنسبة 20 %، ويتم تضمين السيليكون مع الألومنيوم في «لحم» اللوحة. مجموعة متنوعة شائعة من مفاعلات الأبحاث، المعروفة باسم تريجا (من مفاعلات التدريب والأبحاث وإنتاج النظائر المشعة جنرال أتوميك)، تستخدم وقودًا من اليورانيوم المختلط وهيدريد الزركونيوم في كسوة الزركونيوم.

## ❖ المبـــردات والمعـــدّلات

تم استخدام مجموعة متنوعة من المواد، بما في ذلك الماء الخفيف، والماء الثقيل، والهواء، وثاني أكسيد الكربون، والهيليوم، والصوديوم السائل، وسبائك الصوديوم والبوتاسيوم السائل، والهيدروكربونات (الزيوت)، كمبردات. هذه المواد موصلة جيدة للحرارة وتعمل على نقل الطاقة الحرارية الناتجة عن الانشطار من القلب إلى معدات توليد البخار في محطة الطاقة النووية.

وفي كثير من الحالات، تعمل نفس المادة كمبرد ومهدئ، كما في حالة الماء الخفيف والثقيل. يقوم الوسيط بإبطاء النيوترونات السريعة (عالية الطاقة) المنبعثة في الانشطار إلى السرعات التي من المرجح أن تسبب فيها الانشطار. ومن خلال القيام بذلك، يساعد الوسيط في بدء تفاعل متسلسل انشطاري والحفاظ عليه.

## ❖ العاكـــس

العاكس عبارة عن منطقة من المواد غير الملوثة بالوقود تحيط بالنواة. وتتمثل وظيفتها في تشتيت النيوترونات التي تتسرب من النواة وبالتالي إعادة بعضها إلى النواة. وهذا يقلل من حجم النواة ويسهل كثافة الطاقة. وللعاكس أهمية خاصة في مفاعلات الأبحاث، حيث أنه المنطقة التي يوجد بها الكثير من الأجهزة التجريبية.

توجد بعض العاكسات داخل النواة كجزر مركزية يمكن من خلالها تحقيق كثافة نيوترونية عالية لأغراض تجريبية. وفي معظم أنواع مفاعلات الطاقة، يكون العاكس أقل أهمية، لأن المفاعلات كبيرة ولا يسرب الكثير من النيوترونات. ومع ذلك، وبما أنها تعمل على الحفاظ على كثافة الطاقة موحدة، فإن مثل هذه المنطقة غير المزوّدة بالوقود من المواد المعتدلة تُترك حول القلب. ويمثل مفاعل المعدن السائل حالة خاصة. يتم بناء معظم المفاعلات المبردة بالصوديوم

بشكل متعمد للسماح لجزء كبير من نيوتروناتها - تلك التي لا تحتاجها للحفاظ على التفاعل المتسلسل - بالتسرب من القلب. تعتبر هذه النيوترونات ذات قيمة لأنها يمكن أن تنتج مواد انشطارية جديدة إذا تم امتصاصها بواسطة مادة خصبة. وهكذا، يتم وضع مادة خصبة عادة اليورانيوم المستنفد أو ثاني أكسيده حول القلب لالتقاط النيوترونات المتسربة. ويشار إلى هذا العاكس المتص على أنه بطانية أو بطانية تربية.

## ❖ عناصـــر التحكـــم في المفاعـــل

تحتاج جميع المفاعلات إلى عناصر خاصة للتحكم. على الرغم من أنه يمكن تحقيق التحكم عن طريق تغيير معلمات دائرة المبرد أو عن طريق تغيير كمية المتص المذاب في المبرد أو الوسيط، إلا أن الطريقة الأكثر شيوعًا تتضمن استخدام مجموعات امتصاص خاصة وهي قضبان التحكم أو في بعض الأحيان الشفرات.

**عادةً ما يكون المفاعل مجهزًا بثلاثة أنواع من القضبان لأغراض مختلفة:**

- **قضبان الأمان لبدء وإغلاق المفاعل.**
- **قضبان تنظيم لضبط معدل طاقة المفاعل.**
- **قضبان الرقائق للتعويض عن التغيرات في التفاعلية حيث يتم استنفاد الوقود عن طريق الانشطار والالتقاط.**

إن الوظيفة الأكثر أهمية لقضبان الأمان هي إغلاق المفاعل، سواء عندما يكون هذا الإغلاق مقررا أو في حالة الطوارئ الحقيقية أو المشتبه فيها. تحتوي هذه القضبان على ماص كافٍ لإنهاء التفاعل المتسلسل تحت أي ظرف يمكن تصوره. ويتم سحبها قبل تحميل الوقود وتظل متاحة في حالة حدوث خطأ في التحميل يتطلب اتخاذ إجراء بشأنها. وبعد تحميل الوقود، يتم إدخال القضبان، ليتم سحبها مرة أخرى عندما يصبح المفاعل جاهزاً للتشغيل. تم تصميم الآلية

التي يتم من خلالها نقلها لتكون آمنة من الفشل، بمعنى أنه في حالة حدوث عطل ميكانيكي، فإن قضبان الأمان سوف تسقط بسبب الجاذبية في المفاعل.

علاوة على ذلك، في بعض الحالات، تتمتع قضبان الأمان بخاصية أوتوماتيكية، مثل المصهر، الذي يطلقها بحكم التأثيرات الفيزيائية المستقلة عن الإشارات الإلكترونية.

**صمام سكروم لقضبان التحكم في حالات الطوارئ في محطة هاماوكا للطاقة النووية في مدينة أومايزاكي، اليابان. تم تركيب القضبان كإجراء أمان، ويمكنها إيقاف المفاعل في حالة الطوارئ.**

أمكن تصميم قضبان التنظيم عمدًا للتأثير على التفاعلية بدرجة صغيرة فقط. من المفترض أنه في وقت ما قد يتم سحب القضبان تمامًا عن طريق الخطأ، والفكرة هي الحفاظ على التفاعل الإضافي في مثل هذه الحالات ضمن الحدود المعقولة. سيضيف قضيب التنظيم المصمم جيدًا القليل جدًا من التفاعل عند إزالته بحيث تستمر النيوترونات المتأخرة في التحكم في معدل زيادة الطاقة.

تم تصميم قضبان الرقائق للتعويض عن تأثيرات الاحتراق (أي إنتاج الطاقة). يمكن أن تكون تغييرات التفاعل الناتجة عن الاحتراق كبيرة، ولكنها تحدث ببطء على مدار فترات تتراوح من أيام إلى سنوات، مقارنة بمدى ثواني إلى دقائق الذي تتم خلاله إجراءات السلامة والتنظيم الروتيني. لذلك، قد تتحكم قضبان الرقائق في قدر كبير من التفاعلية، لكنها ستعمل بشكل جيد تمامًا في ظل القيود المفروضة على سرعة حركتها. الطريقة الشائعة التي يتم بها تشغيل الحشوات هي إدخالها أو إزالتها عندما تصل قضبان التنظيم إلى نهاية نطاق موضعها الأكثر فائدة. عندما يحدث هذا، يتم تحريك قضبان الرقائق بحيث يمكن إعادة ضبط قضبان التنظيم.

أحيانًا يتم الجمع بين وظائف الرقائق وقضبان الأمان في قضبان ذات معدلات سحب منخفضة ولكن يمكن إدخالها بسرعة. يتم ذلك عادةً عندما يكون تأثير الاحتراق هو تقليل التفاعل. يتم إدخال القضبان جزئيًا فقط في بداية التشغيل، ولكن يمكن إغلاق المفاعل بسرعة عن طريق خفضها إلى قلب المفاعل (صرف Scramming). مع استمرار التشغيل، يتم نقل القضبان إلى الخارج بحيث يكون هناك هامش أكبر لتفاعل الإغلاق.

يمكن تقليل مقدار التحكم المطلوب في الرقائق عن طريق استخدام «سم» قابل للحرق. وهي عبارة عن مادة ماصة للنيوترونات، مثل البورون أو الجادولينيوم، والتي تحترق بشكل أسرع من المواد الانشطارية. في بداية التشغيل، يتحكم هذا في التفاعل الإضافي المدمج في الوقود للتعويض عن كمية الوقود المستهلكة. وفي نهاية فترة التشغيل، ستكون المادة الماصة قد تم تدميرها بالكامل تقريبًا عن طريق التقاط النيوترونات.

## ❖ العناصر الأساسية

هذه هي أجزاء نظام المفاعل التي تربط المفاعل معًا وتسمح له بالعمل كمصدر مفيد للطاقة. العنصر البنيوية الأكثر أهمية هو عادة وعاء المفاعل. في كل من مفاعل الماء الخفيف والمفاعل الذي يتم التحكم فيه بالغاز ذو درجة الحرارة العالية High-Temperature Gas-Controlled Reactor (HTGR)، يتم استخدام وعاء ضغط بحيث يمكن احتواء المبرد وتشغيله في ظل ظروف مناسبة لتوليد الطاقة – أي درجة الحرارة والضغط المرتفعين. يوجد داخل وعاء المفاعل شبكات هيكلية لحمل قلب المفاعل والعاكسات الصلبة، وقنوات التبريد، وقنوات توجيه قضبان التحكم، والمكونات الحرارية المائية الداخلية (مثل المضخات أو دوائر البخار) في بعض الحالات، وأنابيب الأجهزة، وأجزاء من أنظمة السلامة.

## ❖ نظام التبريد

تتمثل وظيفة تركيب مفاعل الطاقة في استخلاص حرارة الانشطار النووي وتحويلها إلى طاقة مفيدة، عمومًا كهرباء. ويلعب نظام التبريد دورًا محوريًا في أداء هذه الوظيفة. يدخل سائل التبريد إلى القلب عند درجة حرارة منخفضة ويتركه عند درجة حرارة أعلى. يتم بعد ذلك توجيه هذا السائل ذو درجة الحرارة المرتفعة إلى المكونات الديناميكية الحرارية التقليدية حيث يتم تحويل الحرارة إلى طاقة كهربائية، في معظم مفاعلات الطاقة التي تعمل بالماء الخفيف والماء الثقيل والمبردة بالغاز، يتم الحفاظ على سائل التبريد عند ضغط مرتفع. تعمل المبردات الصوديوم والعضوية عند الضغط الجوي. تحتوي مفاعلات الأبحاث على أنظمة بسيطة جدًا لإزالة الحرارة حيث يتم تشغيل سائل التبريد عبر المفاعل ويتم نقل الحرارة التي تمت إزالتها إلى الهواء المحيط أو إلى الماء دون المرور عبر دورة الطاقة.

**محطة إيكاتا للطاقة النووية، عبارة عن مفاعل ماء مضغوط يتم تبريده عن طريق تبادل المبرد الثانوي مع المحيط (Stonge, 2011).**

وفي مفاعلات الأبحاث ذات الطاقة المنخفضة التي تعمل بقدرة قليلة فقط من الكيلووات، قد يتضمن ذلك تبادلًا حراريًا بسيطًا لمياه الصنبور أو إلى بركة من الماء المبرد بالهواء المحيط. أثناء التشغيل بمستويات طاقة أعلى، تتم عادةً إزالة الحرارة عن طريق برج تبريد صغير ذو سحب طبيعي.

## ❖ نظام الاحتواء

يتم تصميم المفاعلات مع توقع أنها ستعمل بأمان دون إطلاق النشاط الإشعاعي إلى المناطق المحيطة بها. ومع ذلك، فمن المسلم به أن الحوادث يمكن أن تحدث. وقد تم اعتماد نهج يستخدم حواجز متعددة للتعامل مع مثل هذه الحوادث. وهذه الحواجز هي، على التوالي، تكسية الوقود، والوعاء الأساسي، والتدريع السميك. وكحاجز أخير، يتم وضع المفاعل في هيكل الاحتواء. ويتكون هذا بشكل أساسي من مبنى المفاعل، والذي تم تصميمه واختباره لمنع أي نشاط إشعاعي يتسرب من المفاعل من الانطلاق إلى البيئة. يجب أن يكون هيكل الاحتواء محكم الإغلاق اسميًا على الأقل. ومن الناحية العملية، يجب أن يكون قادرًا على الحفاظ على سلامته في ظل الظروف ذات الطبيعة القاسية، مثل الحوادث التي يتم فيها إطلاق معظم محتويات قلب المفاعل إلى المبنى.

ويجب أن يتحمل تراكم الضغط والأضرار الناجمة عن الحطام الناجم عن انفجار داخل المفاعل، ويجب أن يجتاز اختبارًا لإثبات أنه لن يتسرب أكثر من جزء صغير من محتوياته على مدى عدة أيام، حتى عندما يكون الجزء الداخلي منه ملوثًا. الضغط أعلى بكثير من ضغط الهواء المحيط. الشكل الأكثر شيوعًا لمباني الاحتواء هو هيكل أسطواني ذو قبة كروية، وهو ما يميز أنظمة LWR. وهذا أكثر شيوعًا بالنسبة للمحطات النووية من برج التبريد الكبير الذي غالبًا ما يستخدم كرمز للطاقة النووية. تجدر الإشارة إلى أن أبراج التبريد موجودة أيضًا في محطات الطاقة الحديثة الكبيرة التي تعمل بالفحم والنفط. تحتوي المفاعلات الأخرى غير تلك من نوع LWR أيضًا على هياكل احتواء، ولكنها تختلف في الشكل والبناء. عندما يكون من الممكن تبرير عدم توقع تراكم كبير للضغط، يمكن أن يكون الاحتواء بأي شكل من أشكال الهيكل المحكم.

في الولايات المتحدة، هياكل الاحتواء مطلوبة لجميع مفاعلات الطاقة التجارية وجميع مفاعلات الأبحاث عالية الطاقة. بشكل عام، يتم استثناء مفاعلات الأبحاث منخفضة الطاقة، بناءً على الافتراض الشائع بأن وقوع حادث في مثل هذه الأنظمة لن يؤدي إلى إطلاق واسع النطاق للنشاط الإشعاعي. كما أن المفاعلات التي تديرها وزارة الطاقة الأمريكية والقوات المسلحة معفاة أيضًا، الأمر الذي أثار جدلًا كبيرًا. بعض هذه لديها هياكل الاحتواء، في حين أن البعض الآخر لا.

نشأ مفهوم الاحتواء في الولايات المتحدة خلال الخمسينيات من القرن الماضي، وقد تم قبوله بشكل عام في معظم أنحاء العالم. ومع ذلك، لم تتفق دول الكتلة السوفييتية مع هذا الرأي، وعندما تم توفير الاحتواء، لم يكن الاحتواء عمومًا على مستوى المعايير الغربية. على سبيل المثال، كانت وحدة تشيرنوبيل الرابعة، التي تعرضت لحادث انفجار كارثي وحريق في عام 1986م، تمتلك فقط بنية داخلية لا يمكنها تحمل فقدان وظيفة أنبوب ضغط واحد. وعلى الرغم من تسميتها بالاحتواء، إلا أنها كانت تسمية خاطئة بالمعايير الغربية.

## • أنـــواع المفاعـــلات

معظم المفاعلات الموجودة في العالم هي مفاعلات طاقة. هناك أيضًا العديد من المفاعلات البحثية، وتشمل القوات البحرية في العديد من الدول غواصات وسفن سطحية مدفوعة بمفاعلات الدفع. هناك عدة أنواع من مفاعلات الطاقة، لكن واحدًا فقط هو مفاعل الماء الخفيف، الذي يستخدم على نطاق واسع. وبناء على ذلك، تتم مناقشة هذا التنوع بالتفصيل هنا. يتم وصف الأنواع الهامة الأخرى بإيجاز، وكذلك مفاعلات البحث والدفع.

## ♦ مفاعل الماء الخفيف

كما هو مذكور أعلاه، فإن مفاعلات الماء الخفيف Light-Water Reactor (LWR) هي مفاعلات طاقة يتم تبريدها وتهيئتها بالماء العادي. هناك نوعان أساسيان: مفاعل الماء المضغوط Pressurized-Water Reactor (PWR) ومفاعل الماء المغلي Boiling Water Reactor (BWR).

في النوع الأول، يقوم الماء ذو الضغط العالي ودرجة الحرارة المرتفعة بإزالة الحرارة من القلب ثم يتم تمريرها إلى مولد البخار. هنا يتم نقل حرارة سائل التبريد إلى تيار من الماء في المولد، مما يتسبب في غليان الماء وارتفاع درجة حرارته قليلاً. يعمل البخار الناتج عن ذلك بمثابة سائل العمل في دورة التوربينات البخارية. في مفاعل الماء المغلي، يُسمح للمياه التي تمر عبر قلب المفاعل بالغليان عند ضغط متوسط، ويتم استخدام البخار الصادر من المفاعل مباشرة في دورة الطاقة.

محطة سسكويهانا للكهرباء البخارية، مفاعل الماء المغلي. وتقع المفاعلات داخل مباني الاحتواء المستطيلة باتجاه مقدمة أبراج التبريد (Stonge, 2011)

على الرغم من أن BWR يبدو أبسط، إلا أن PWR يتمتع بمزايا فيما يتعلق باستخدام الوقود وكثافة الطاقة، وكان المفهومان يتنافسان اقتصاديًا مع بعضهما البعض منذ الستينات. يتم تزويد كلا مفاعلي الماء الخفيف هذين بكريات ثاني أكسيد اليورانيوم المغطاة بسبائك الزركونيوم. يعتبر وقود BWR أقل إثراء قليلاً، لكن وقود PWR ينتج المزيد من الطاقة قبل تفريغه، وبالتالي فإن هذين الجانبين يوازن كل منهما الآخر اقتصاديًا.

نظرًا لأن BWR يعمل عند ضغط أقل، فإنه يحتوي على وعاء ضغط أرق من PWR؛ ومع ذلك، نظرًا لأن كثافة الطاقة أقل إلى حد ما، فإن وعاء مفاعل BWR له قطر أكبر لنفس طاقة المفاعل. يعد النظام الداخلي لمفاعل BWR أكثر تعقيدًا، نظرًا لوجود مضخات إعادة تدوير داخلية ومعدات معقدة لفصل البخار وتجفيفه داخل الوعاء. على الرغم من أن الأجزاء الداخلية لمحطة PWR أبسط، إلا أن محطة توليد الطاقة BWR أصغر لأنها لا تحتوي على مولدات بخار. وفي الواقع، فإن مولدات البخار – التي عادة ما تكون أربعة منها في محطة كبيرة لضغط الماء المضغوط – أكبر من وعاء المفاعل نفسه. يتم إدخال قضبان التحكم في مفاعل WR النموذجي من الأعلى (من خلال رأس المفاعل)، بينما يتم إدخال قضبان التحكم في مفاعل WR من الأسفل.

ويجري إعادة تزويد مفاعلات الماء الخفيف بالوقود عن طريق إزالة رأس المفاعل، بعد خفض وتحرير قضبان الأمان في حالة مفاعلات المياه المضغوطة. وهذا يعرض المفاعل للمراقبة البصرية. يتم ملء وعاء الضغط إلى الأعلى بالماء، وبما أن القلب قريب من قاع الوعاء، فإن الماء يعمل كدرع لهذه العملية. بعد ذلك، يتم رفع مجموعات الوقود المراد إزالتها إلى برميل محمي حيث يتم نقلها إلى حوض تخزين للتبريد بينما لا تزال مشعة للغاية.

يتم بعد ذلك نقل العديد من التجميعات المتبقية داخل القلب، وفي النهاية يتم تحميل الوقود الطازج إلى مواضع الوقود الفارغة. الغرض من تغيير الوقود في وقت إعادة التحميل هو تحقيق التفاعل الأمثل وتوزيع الطاقة لدورة التشغيل التالية. إعادة التحميل هي عملية تستغرق وقتا طويلا. من حيث المبدأ، يمكن إنجاز ذلك في ثلاثة أسابيع، ولكن من الناحية العملية تخضع المحطة للصيانة أثناء إعادة التحميل، الأمر الذي قد يستغرق وقتًا أطول بكثير - يصل إلى بضعة أشهر.

تقوم المرافق بجدولة الصيانة وإعادة التحميل خلال فصلي الربيع والخريف عندما يكون الطلب على الكهرباء في أدنى مستوياته وعادة ما يكون للنظام قدرة احتياطية. إن الوقود المفرغ والمخزن في حوض التخزين ليس عالي الإشعاع فحسب، بل يستمر أيضًا في إنتاج الطاقة. تتم إزالة هذه الطاقة عن طريق الدورة الطبيعية للمياه في حوض التخزين. وكان من المتوقع في الأصل أن يتم شحن هذا الوقود المستهلك لإعادة معالجته في غضون عامين، ولكن هذا الخيار يُطبق حاليًا في فرنسا فقط. وفي الولايات المتحدة، استمرت مجمعات التخزين في تلقي الوقود المستهلك، وبعض المجمعات بدأت تمتلئ.

تتمثل الخيارات المتاحة لمشغلي المحطات النووية في تخزين الوقود المستهلك بكثافة أكبر مما كان مخططا له في الأصل، أو بناء حمامات جديدة، أو تخزين الوقود الأقدم الذي لم يعد ساخنا جدا في صوامع فوق الأرض (التخزين الجاف). وفي نهاية المطاف، سيتم نقل هذا الوقود إلى وزارة الطاقة الأمريكية لإعادة معالجته أو التخلص من النفايات أو كليهما، على الرغم من عدم إنشاء برنامج فعال للتخلص منه.

خـلال سـبعينات القـرن العشـرين، مثلـت مفاعـلات المـاء الخفيـف أرخـص مصـدر للكهربـاء الجديـدة في معظـم أنحـاء العالـم، ولا تـزال اقتصاديـة في اليابـان وكوريـا وتايـوان وفرنسـا والعديـد مـن الـدول الأوروبيـة الأخـرى. ومـع ذلـك، ففـي الولايـات المتحـدة، أدى التنظيـم الصـارم لمفاعـلات المـاء الخفيـف خـلال الثمانينـات، إلـى جانـب انخفـاض نشـاط البحـث والتطويـر في المفاعـلات، إلـى جعـل الطبيعـة التنافسـية لمنشـآت مفاعـلات المـاء الخفيـف الجديـدة مشـكلة.

**ثلاث سفن تعمل بالطاقة النووية، (من الأعلى إلى الأسفل) الطرادات النووية يو إس إس بينبريدج ويو إس إس لونج بيتش مع يو إس إس إنتربرايز، أول حاملة طائرات تعمل بالطاقة النووية في عام 1964. يقوم أفراد الطاقم بتوضيح معادلة أينشتاين لتكافؤ الطاقة الكلية $E = mc^2$ على سطح الطائرة. (Stonge, 2011)**

تظل المحطات التي تمت إدارتها بشكل جيد أثناء الإنشاء والتشغيل قادرة على المنافسة؛ لسوء الحظ، هذه ليست القاعدة. ومع ذلك، فإن التصميمات الجديدة، التي تم تطويرها في الخارج، قد تغير هذا الوضع.

### ♦ المفاعل ذو درجة الحرارة العالية والمبرد بالغاز

يتم تزويد المفاعل ذو درجة الحرارة العالية والمبرد بالغاز، كما هو مذكور أعلاه، بمزيج من الجرافيت والكرات المجهرية الحاملة للوقود. هناك تصميمان تنافسيان لهذا النوع من المفاعلات:

- نظام ألماني يستخدم عناصر وقود كروية بحجم كرة التنس محملة في صومعة الجرافيت.
- نسخة أمريكية يتم فيها تحميل الوقود في موشورات سداسية من الجرافيت موضوعة بدقة.

في كلا الطرازين، يتكون سائل التبريد من الهيليوم المضغوط إلى حوالي 100 بار. في النظام الألماني يمر الهيليوم عبر فجوات في طبقة عناصر الوقود الكروية، بينما في النظام الأمريكي يمر عبر ثقوب في منشورات الجرافيت. وكلاهما قادر على العمل عند درجة حرارة عالية جدًا، حيث أن الجرافيت لديه درجة حرارة تسامي عالية للغاية والهيليوم خامل تمامًا كيميائيًا. يمكن استخدام الهيليوم الساخن مباشرة كمائع تشغيل في توربينات غازية ذات درجة حرارة عالية، أو يمكن استخدام حرارته لتوليد البخار لدورة المياه. تم بناء نماذج أولية تجريبية لكل من التصاميم الأمريكية والألمانية، ولكن لم يتم طلب أي مصانع تجارية.

## ♦ مفاعـــــلات المعـــادن الســـائلة

حظيـت مفاعـلات طيـف النيوترونـات السـريعة المبـردة بالصوديـوم بالكثيـر مـن الاهتمـام خـلال سـتينات وسـبعينات القـرن العشـرين عندمـا بـدا أن قدراتهـا التوليديـة سـتكون ضروريـة قريبًـا لتوفير المواد الانشـطارية للصناعة النووية سـريعة التوسـع. وعندمـا أصبـح مـن الواضـح في الثمانينـات أن هـذا لـم يكـن توقعاً واقعيـاً، تباطـأ الحمـاس. ومـع ذلـك، فقـد أسـفرت أعمـال التطويـر في العقـود السـابقة عـن بنـاء عـدد مـن مفاعـلات المعـدن السـائل Liquid-Metal Reactors (LMR) حـول العالـم – في الولايـات المتحـدة، والاتحـاد السـوفييتي السـابق، وفرنسـا، وبريطانيـا، واليابـان، وألمانيـا.

يتـم تزويـد معظـم مفاعـلات المعـدن السـائل بالوقـود بثانـي أكسـيد اليورانيـوم أو ثانـي أكسـيد اليورانيـوم والبلوتونيـوم المختلـط. ولكـن في الولايـات المتحـدة، كان النجـاح الأكبـر هـو اسـتخدام الوقـود المعدنـي. في حـين أن بعـض مفاعـلات المعـدن السـائل هـي مـن النـوع الحلقـي، ومجهـزة بمبـادلات حراريـة ومضخـات خـارج وعـاء المفاعـل الأساسـي، فـإن البعـض الآخـر مـن نـوع الحـوض، ويتميـز بكميـة كبيـرة مـن الصوديـوم الأولـي في حـوض يحتـوي أيضًـا علـى المضخـات الأوليـة وإلـى مبـادل حـراري ثانـوي.

في جميـع الأنـواع، يتـم نقـل الحـرارة المسـتخرجة مـن القلـب بواسـطة الصوديـوم الأولـي إلـى حلقـة صوديـوم ثانويـة غيـر مشـعة، والتـي تعمـل كمصـدر حـرارة لمولـد البخـار والتوربينـات. يبـدو أن نـوع حـوض السـباحة يتمتـع ببعـض المزايـا مـن حيـث السـلامة حيـث أن الحجـم الكبيـر مـن الصوديـوم الأولـي يسـخن ببـطء فقـط حتـى لـو لـم يتـم اسـتخراج الطاقـة؛ وبالتالـي، يتـم عـزل المفاعـل بشـكل فعـال عـن الاضطرابـات في تـوازن المصنـع. قلـب المفاعـل في جميـع هـذه الأنظمـة عبـارة عـن

حزمة من الوقود معبأة بإحكام في غلاف فولاذي يتدفق من خلالها مبرد الصوديوم لاستخراج الحرارة. معظم مفاعلات المعدن السائل هي مفاعلات مولدة أو قادرة على التكاثر، وهذا يعني أنها جميعها تنتج مواد انشطارية أكثر مما تستهلك.

## ♦ مفاعل كاندو

لقد ركزت كندا جهودها الإنمائية على المفاعلات التي تستخدم وفرة اليورانيوم الطبيعي المحلي كوقود دون الاضطرار إلى اللجوء إلى خدمات التخصيب التي لا يمكن توفيرها إلا من قبل بلدان أخرى. وكانت نتيجة هذه السياسة مفاعل كاندو CANDU، وهو خط المفاعلات التي تعمل بوقود اليورانيوم الطبيعي والتي يتم تبريدها بالماء الثقيل. ويتكون المفاعل من هذا النوع من خزان، أو وعاء كالاندريا Calandria Vessel، يحتوي على ماء ثقيل بارد عند الضغط العادي.

يتم ثقب الكلاندريا بواسطة أنابيب ضغط مصنوعة من سبائك الزركونيوم، يوضع فيها وقود اليورانيوم الطبيعي ويدور فيها الماء الثقيل المبرد. يتم الحصول على الطاقة عن طريق نقل الحرارة من الماء الثقيل الساخن المضغوط إلى مولد البخار ثم تشغيل البخار من الأخير من خلال دورة توربينية تقليدية. يمكن تغيير مجموعة الوقود في مفاعل كاندو، والتي تتكون من مجموعة من الأنابيب القصيرة المكسوة بسبائك الزركونيوم والتي تحتوي على كريات ثاني أكسيد اليورانيوم الطبيعي، أثناء تشغيل النظام.

تعد محطة كاندو بروس لتوليد الطاقة النووية ثاني أكبر محطة للطاقة النووية في العالم (Stonge, 2011)

يتم ببساطة دفع مجموعة جديدة إلى أحد طرفي أنبوب الضغط ويتم تجميع المجموعة القديمة عندما تسقط في الطرف الآخر. وقد أعطت هذه الميزة عوامل قدرة كاندو أعلى من أنواع المفاعلات الأخرى. وقد اشترت العديد من الدول مفاعلات كاندو لنفس السبب الذي دفع كندا إلى تطويرها، أي لتكون مستقلة عن خدمات التخصيب المستوردة.

## ♦ المفاعل المتطور المبرد بالغاز

تم تطوير المفاعل المتطور المبرد بالغاز (AGR) Advanced Gas-Cooled Reactor في بريطانيا خلفًا لمفاعلات فئة كالدر هول، التي جمعت بين إنتاج البلوتونيوم وتوليد الطاقة. كانت كالدر هول أول محطة نووية تغذي شبكة مدنية بكمية كبيرة من الطاقة. تم تزويدها بالوقود بسبائك من معدن اليورانيوم الطبيعي المعبأ في الألومنيوم، وتم تبريدها بثاني أكسيد الكربون، واستخدمت وسيطًا يتكون من كتلة من الجرافيت مثقوبة بواسطة قنوات الوقود.

كانت محطة كالدر هول للطاقة النووية في المملكة المتحدة أول محطة للطاقة النووية في العالم تنتج الكهرباء بكميات تجارية (Stonge, 2011)

في المفاعل المتطور الذي يتم تبريده بالغاز، يتم وضع دبابيس الوقود المكسوة بمادة الزركونيوم (علامة تجارية لسبائك الزركونيوم التي تحتوي على نسب منخفضة من الكروم والنيكل والحديد والقصدير) ومحملة بثاني أكسيد اليورانيوم المخصب بنسبة 2 % في قنوات سبائك الزركونيوم التي تخترق كتلة وسيط الجرافيت.

يسمح الوقود المخصب بالتشغيل إلى المستويات الاقتصادية لحرق الوقود. يقوم مبرد ثاني أكسيد الكربون بنقل الحرارة إلى مولد البخار، مما يؤدي إلى تنشيط دورة التوربينات البخارية. وعلى الرغم من بناء عدد من المفاعلات المتقدمة التي تعمل بتبريد الغاز في بريطانيا، إلا أنها كانت أقل خالية من المشاكل وأكثر تكلفة مما كان متوقعا، ولم يتم التخطيط لإنشاء مفاعلات جديدة (Curley, 2012).

# تقييم الأثر البيئي للطاقة النووية

تتطلب عملية تقييم الأثر البيئي الشاملة للطاقة النووية وقتًا حتى تكتمل بطريقة مرضية (عادة سنوات). ويتأثر جدول العمل بالعديد من المتغيرات، بما في ذلك: متطلبات الدولة المحددة؛ الوقت اللازم لجمع وتقييم البيانات اللازمة؛ ومقدار مشاركة أصحاب المصلحة، بما في ذلك المشاركة الدولية. وينبغي أن يؤخذ الجدول الزمني لتقييم الأثر البيئي في الاعتبار عند تنظيم التفاعل بين العمليات التشريعية والتنظيمية، والتطوير الشامل للمشروع وأصحاب المصلحة (IAEA, 2014).

## ♦ ميزات السلامة والأمن

يمكن أن يؤدي التفاعل النووي غير المنضبط في مفاعل نووي إلى تلوث الهواء والماء على نطاق واسع. إن خطر حدوث ذلك في محطات الطاقة النووية في الولايات المتحدة صغير بسبب الحواجز المتنوعة والمتكررة وأنظمة السلامة الموجودة في محطات الطاقة النووية، والتدريب والمهارات لدى مشغلي المفاعلات، وأنشطة الاختبار والصيانة، والمتطلبات التنظيمية. والإشراف على اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية. منطقة كبيرة تحيط بمحطة للطاقة النووية مقيدة وتحرسها فرق أمنية مسلحة. تحتوي المفاعلات الأمريكية أيضًا على أوعية احتواء مصممة لتحمل الظواهر الجوية القاسية والزلازل.

## ♦ لا تنتج مفاعلات الطاقة النووية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المباشرة

على عكس محطات الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري، فإن المفاعلات النووية لا تنتج تلوث الهواء أو ثاني أكسيد الكربون أثناء التشغيل. ومع ذلك،

فإن عمليات تعدين وتكرير خام اليورانيوم وتصنيع وقود المفاعلات كلها تتطلب كميات كبيرة من الطاقة.

تحتوي محطات الطاقة النووية أيضًا على كميات كبيرة من المعدن والخرسانة، والتي تتطلب تصنيعها كميات كبيرة من الطاقة. إذا تم استخدام الوقود الأحفوري للتعدين وتكرير خام اليورانيوم، أو إذا تم استخدام الوقود الأحفوري عند بناء محطة الطاقة النووية، فإن الانبعاثات الناتجة عن حرق هذا الوقود يمكن أن ترتبط بالكهرباء التي تولدها محطات الطاقة النووية.

## ♦ الطاقة النووية تنتج نفايات مشعة

أحد المخاوف البيئية الرئيسية المتعلقة بالطاقة النووية هو خلق النفايات المشعة مثل مخلفات مصانع اليورانيوم، ووقود المفاعلات المستهلكة (المستخدمة)، وغيرها من النفايات المشعة. ويمكن أن تظل هذه المواد مشعة وخطيرة على صحة الإنسان لآلاف السنين. تخضع النفايات المشعة لأنظمة خاصة تحكم التعامل معها ونقلها وتخزينها والتخلص منها لحماية صحة الإنسان والبيئة. تنظم اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (NRC) تشغيل محطات الطاقة النووية.

يتم تصنيف النفايات المشعة على أنها نفايات منخفضة المستوى أو نفايات عالية المستوى. يمكن أن يتراوح النشاط الإشعاعي لهذه النفايات من مستويات أعلى قليلاً من المستويات الطبيعية، مثل مخلفات مصانع اليورانيوم، إلى النشاط الإشعاعي الأعلى بكثير لوقود المفاعلات المستخدم (المستنفد) وأجزاء المفاعلات النووية.

يتناقص النشاط الإشعاعي للنفايات النووية بمرور الوقت من خلال عملية تسمى الاضمحلال الإشعاعي. يُطلق على مقدار الوقت الذي يستغرقه النشاط

الإشعاعي للمادة المشعة في الانخفاض إلى نصف مستواه الأصلي اسم نصف العمر الإشعاعي. غالبًا ما يتم تخزين النفايات المشعة ذات نصف العمر القصير مؤقتًا قبل التخلص منها لتقليل الجرعات الإشعاعية المحتملة للعاملين الذين يتعاملون مع النفايات وينقلونها. كما يعمل نظام التخزين هذا على تقليل مستويات الإشعاع في مواقع التخلص من النفايات. من حيث الحجم، فإن معظم النفايات المتعلقة بصناعة الطاقة النووية لديها مستوى منخفض نسبيًا من النشاط الإشعاعي. تحتوي مخلفات مطحنة اليورانيوم على عنصر الراديوم المشع، والذي يتحلل لينتج غاز الرادون المشع. يتم وضع معظم مخلفات مصانع اليورانيوم بالقرب من منشأة المعالجة، أو المطحنة، من حيث تأتي. يتم تغطية مخلفات مصانع اليورانيوم بحاجز مانع للتسرب من مادة مثل الطين لمنع غاز الرادون من الهروب إلى الغلاف الجوي. يتم تغطية حاجز الختم بطبقة من التربة أو الصخور أو المواد الأخرى لمنع تآكل حاجز الختم.

الأنواع الأخرى من النفايات المشعة منخفضة المستوى هي الأدوات والملابس الواقية وأقمشة المسح وغيرها من المواد التي يمكن التخلص منها والتي تصبح ملوثة بكميات صغيرة من الغبار أو الجزيئات المشعة في مرافق معالجة الوقود النووي ومحطات الطاقة النووية. تخضع هذه المواد لأنظمة خاصة للتعامل معها وتخزينها والتخلص منها حتى لا تتلامس مع البيئة الخارجية. تتكون النفايات المشعة عالية المستوى من وقود المفاعلات النووية المشعع أو المستهلك (الوقود الذي لم يعد مفيدًا لإنتاج الكهرباء). ويكون وقود المفاعل المستهلك في صورة صلبة، ويتكون من كريات وقود صغيرة توضع في أنابيب معدنية طويلة تسمى القضبان.

## ♦ تخزين الوقود المستهلك في المفاعلات وإخراجها من الخدمة

تعتبر مجمعات وقود المفاعلات المستهلكة شديدة الإشعاع، ويجب في البداية تخزينها في أحواض مائية مصممة خصيصًا لذلك. يقوم الماء بتبريد الوقود ويعمل كدرع للإشعاع. ويمكن أيضًا تخزين مجمعات وقود المفاعلات المستهلكة في حاويات تخزين جافة مصممة خصيصًا. يقوم الآن عدد متزايد من مشغلي المفاعلات بتخزين الوقود المستهلك القديم في مرافق التخزين الجاف باستخدام حاويات خرسانية أو فولاذية خارجية خاصة مع تبريد الهواء. لا تمتلك الولايات المتحدة حاليًا منشأة دائمة للتخلص من النفايات النووية عالية المستوى.

عندما يتوقف المفاعل النووي عن العمل، يجب إخراجه من الخدمة. يتضمن وقف التشغيل إزالة المفاعل وجميع المعدات التي أصبحت مشعة بأمان من الخدمة وخفض النشاط الإشعاعي إلى مستوى يسمح باستخدامات أخرى للممتلكات. لدى اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية قواعد صارمة تحكم إيقاف تشغيل محطات الطاقة النووية والتي تتضمن تنظيف أنظمة وهياكل محطات الطاقة الملوثة إشعاعيًا وإزالة الوقود المشع.

# الفصل السابع

## الطاقة الغير متجددة Non-renewable Energy

| | |
|---|---|
| نبـــذة تـــاريخيـــة | مـــوارد الطاقـــة الغـــير متجـــددة |
| أصـــل ونشـــأة النفط | مكـــونـــــات النفـــــط |
| النظـــام النفـــطي | طـــرق اســـتخراج النفـــط |
| طـرق استكشاف النفط | التأثير البيئي للطاقة الغير متجددة |

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

# الطاقة الغير متجددة Non-renewable Energy

## مُقَدِّمَة

لطالما كانت الطاقة Energy المورد الرئيسي الذي اعتمد عليه البشر للبقاء واستخدامه في الأنشطة الإنتاجية. كان التصنيع والتقدم التكنولوجي للمجتمع الحديث ممكناً أيضاً من خلال الاستخدام الفعال للطاقة. هناك علاقة قوية بين مؤشر جودة الحياة واستهلاك الطاقة. حيث تتحقق القوة الاقتصادية المتزايدة للبلد، والازدهار التكنولوجي للمجتمع، وزيادة الإنتاج الصناعي، وتحسين الموارد المالية للأسرة، وزيادة أنشطة الفرد من خلال الاستخدام الفعال للطاقة.

هناك عدد من العوامل المُهمَّة سيطرت تاريخيّاً على الاتجاه والسوق ونوع استخدام الطاقة. هذه العوامل هي: توافر الموارد، ملاءمة استخدام الطاقة، كفاءة التحويل، الجدوى التقنية، قابلية وسهولة النقل، الاستدامة، قابلية التجديد، القدرة على تحمل التكاليف، آثار السلامة والصحة، والقبول والتأثير البيئي.

يمكن أن يُعزى النجاح التقني والازدهار للصناعات البتروكيماوية في القرن العشرين وأوائل القرن الحادي والعشرين إلى حد كبير إلى الاستخدام الواسع للوقود الأحفوري، وبخاصة النفط، فضلاً عن الاختراقات والابتكارات التكنولوجية في الصناعات العملية. لقد شهدت الصناعة والمستهلكون مجموعة واسعة من المواد البوليمرية الجديدة والمحسنة وغيرها من المنتجات الكيماوية والبتروكيماوية. ومع ذلك، فإن موارد الوقود الأحفوري التي تعتمد عليها الصناعة بشكل كبير محدودة في الكميات المتاحة ومن المتوقع أن تكون قريبة من النضوب في المستقبل القريب.

قد تضطر الشعبية غير المسبوقة والاستخدام الناجح للموارد النفطية التي لوحظت في القرن العشرين إلى الانخفاض في القرن الحادي والعشرين بسبب نقص توافر الموارد، مما يجعل احتمالات الاستدامة المستقبلية تبدو قاتمة. ومع ذلك، فإن شهية الجمهور لمصادر الوقود الملائمة والمواد عالية الأداء آخذة في الازدياد. لذلك، فإن المصادر الإضافية والبديلة للوقود والمواد الأولية للبتروكيماويات لا يجب تطويرها فحسب، بل هناك حاجة أيضاً للاستغلال التجاري الفوري لها. لم يعد استخدام أنواع الوقود البديلة مسألة مستقبلية؛ إنها قضية واقعية للحاضر.

إن جميع مصادر الطاقة لها آثارها السلبية، ولكنها تختلف بشكل كبير في الحجم: فكما سنرى، يعتبر الوقود الأحفوري أقذر وأشد خطورة، في حين أن مصادر الطاقة النووية ومصادر الطاقة المتجددة الحديثة أكثر أماناً ونظافة إلى حد كبير. ومن منظور صحة الإنسان وتغير المناخ، لا يهم ما إذا كنا ننتقل إلى الطاقة النووية أو الطاقة المتجددة، بل من المهم أن نتوقف عن الاعتماد على الوقود الأحفوري. لقد لعبت الطاقة دورًا حاسمًا في التقدم البشري على مدى القرون القليلة الماضية. وكما تقول الأمم المتحدة عن حق: «إن الطاقة تشكل أهمية مركزية في التعامل مع كل التحديات الكبرى والفرص التي يواجهها العالم اليوم تقريباً».

في حين أن الطاقة تجلب لنا فوائد هائلة، إلا أنها لا تخلو من سلبياتها. يمكن أن يكون لإنتاج الطاقة آثار سلبية على صحة الإنسان والبيئة بثلاث طرق: الأول هو تلوث الهواء حيث يموت ملايين الأشخاص قبل الأوان كل عام نتيجة لتلوث الهواء. ويعد الوقود الأحفوري وحرق الكتلة الحيوية، الخشب والروث والفحم، مسؤولين عن معظم هذه الوفيات. والثاني الحوادث ويشمل ذلك حوادث التعدين واستخراج الوقود، الفحم واليورانيوم والمعادن النادرة والنفط

والغاز. كما يشمل حوادث نقل المواد الأولية والبنية التحتية أو إنشاء محطة توليد الكهرباء أو صيانتها. والثالث هو انبعاثات الغازات الدفيئة حيث الوقود الأحفوري هو المصدر الرئيسي للغازات الدفيئة، والمحرك الرئيسي لتغير المناخ. في عام 2020م، جاءت 19% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية من الوقود الأحفوري والصناعة.

في عالم اليوم، أصبح فهم الفرق بين الموارد المتجددة وغير المتجددة أكثر أهمية من أي وقت مضى. الطاقة المتجددة وغير المتجددة هما نوعان من مصادر الطاقة التي لها مزاياها وعيوبها، وكلاهما يلعب دوره في المساعدة على تزويد الكوكب وحياتنا اليومية بالطاقة. مصادر الموارد المتجددة هي تلك التي يمكن تجديدها مع مرور الوقت، في حين أن الموارد غير المتجددة لا يمكن ذلك. ومن خلال فهم الفرق بين الموارد المتجددة وغير المتجددة، يمكننا اتخاذ قرارات أكثر استنارة حول كيفية استخدامنا للطاقة وكيفية حماية بيئتنا للأجيال القادمة. فالطاقة المتجددة، على سبيل المثال، مهمة لبناء مستقبل مستدام وهي مصدر للطاقة يمكننا الاعتماد عليه لسنوات عديدة قادمة، مما يوفر فرص العمل والمواهب للأشخاص والشركات في جميع أنحاء العالم.

هناك أربعة أنواع رئيسية من الموارد غير المتجددة: النفط والغاز الطبيعي والفحم والطاقة النووية. يُطلق على النفط والغاز الطبيعي والفحم مجتمعة اسم الوقود الأحفوري. تكوّن الوقود الأحفوري داخل الأرض من النباتات والحيوانات الميتة على مدى ملايين السنين، ومن هنا جاء اسم الوقود «الأحفوري». تم العثور عليها في طبقات تحت الأرض من الصخور والرواسب. يعمل الضغط والحرارة معًا لتحويل بقايا النباتات والحيوانات إلى نفط خام (المعروف أيضًا باسم النفط) وفحم وغاز طبيعي. ومن ناحية أخرى، على الرغم من أن الطاقة غير المتجددة تنطوي على بعض الفوائد، فمن الصعب أن نزعم أن تأثيراتها

السلبية تفوق إيجابياتها، وأن الاستخدام المستمر للموارد غير المتجددة أصبح يمثل مشكلة متزايدة. في نهاية المطاف، مع نمو سكان العالم وزيادة وعينا بالتأثيرات البيئية لخياراتنا، أصبح من الضروري بشكل متزايد التحول إلى موارد الطاقة المتجددة.

سنتعرف في هذا الفصل على ماهية الموارد الغير متجددة وعلى التكوين الجيولوجي للنفط والغاز الطبيعي، بالاضافة إلى ذلك سنتناول التقنيات المستخدمة لاستخرج النفط مثل التكسير الهيدروليكي، والصخر النفطي وتقنياته الحديثة، وتاريخ نشوء عصر النفط، وننقاش ايضا مفهوم ذروة عصر النفط، والتحديات التي تواجه الطاقة الأحفورية، وأهمية بدائل الطاقة المستدامة، وكيف يتكون نهاية عصر النفط وتداعياته على البشرية، وكيف يمكننا تخفيض استخدامات النفط.

# نبذة تاريخية

يشير عصر النفط Oil Age، المعروف أيضاً باسم عصر النفط أو عصر ازدهار النفط، إلى عصر في تاريخ البشرية يتميز بزيادة استخدام النفط في المنتجات والوقود. مع أن النفط غير المكرر استخدم لأغراض مختلفة منذ العصور القديمة، فقد طوّر تقنيات التكرير وإنشاء محركات البنزين خلال القرن التاسع عشر. ومع استخدام النفط الخام لعدة أغراض لآلاف السنين، إلا أن عصر النفط قد بدأ في القرن التاسع عشر مع تقدم تقنيات الحفر، بالإضافة إلى معالجة المنتجات المستخدمة في محركات الاحتراق الداخلي. ويمكن تحديد عمر النفط في الفترة الأولى حتى أوائل القرن العشرين، عندما زاد استهلاك النفط واستخدام محركات الاحتراق. لقد بُني المجتمع الصناعي المعاصر إلى حد كبير على الموارد النفطية، ولكن مستقبل عصر النفط صار مثيراً للجدل بشكل متزايد عندما صارت تأثيرات تغير المناخ واضحة، وازداد استخدام مصادر الطاقة البديلة.

منذ بداية الثورة الصناعية، استخدم الوقود الأحفوري كمصادر للطاقة. بدأ استخدام الفحم على نطاق واسع بعد عام 1800م وسيبقى المصدر المهيمن للوقود في القرن العشرين. ومع ذلك، هناك حدثان مهدا الطريق لعصر النفط: الأول كان في عام 1846م، عندما اخترع أبراهام جيسنر الكيروسين الذي يُصنّع من المواد الخام للفحم والنفط كوقود للإنارة. الثاني كان في عام 1859م، عندما اخترع إدوين دريك أول عملية حفر حديثة لآبار النفط العميقة.

أسس جون دافيسون روكفلر شركة Standard Oil Company، التي هيمنت على صناعة النفط وكانت أول علامة تجارية كبيرة في الولايات المتحدة. في عام 1870م، أسس شركة ستاندرد أويل وأدارها بقوة حتى تقاعده رسمياً في

عام 1897م. ثم طور كارل فريدريش بنز سيارة تعمل بالبنزين في عام 1878م، وفي عام 1879م حصل على براءة اختراع للسيارة العملية. كان لاختراع محرك الاحتراق الداخلي التأثير الأكبر في زيادة أهمية النفط.

يُعتقد عموماً أن بداية العصر الحديث للنفط كانت في عام 1901م مع إضراب سبيندلتوب بوساطة مستكشف النفط الكرواتي أنطون لوتشيتش وتكسان باتيلو هايجينز، بالقرب من بومونت، في تكساس في الولايات المتحدة التي أطلقت إنتاج النفط على نطاق واسع وسرعان ما أنتجت المنتجات النفطية متوفرة على نطاق واسع.

منذ الستينات والسبعينات من القرن الماضي، عندما بلغ إنتاج النفط ذروته في العديد من الدول الصناعية، كان موضوع التكهنات المتكرر بين العلماء هو متى سيبلغ الإنتاج العالمي ذروته، وكذلك متى وكيف سينتهي عصر النفط في النهاية. وفقاً لبعض التعريفات، يُعرّف العصر بأنه ينتهي عند النقطة التي يتجاوز فيها الاستهلاك الإنتاج المتناقص مما يجعل استخدامه غير مربح أو مستحيلاً.

## • تاريخ النفـــط قديمـًا

مع بزوغ فجر ما يسمى بالعصر الذري، اعتقد العديد من المراقبين في منتصف القرن العشرين أن عصر النفط يقترب بسرعة من نهايته. لم يتحقق التغيير السريع للطاقة الذرية المتصور خلال هذه الفترة أبداً، ويرجع ذلك جزئياً إلى المخاوف البيئية التي أعقبت الحوادث البارزة مثل حادث جزيرة ثري مايل عام 1979م وكارثة تشيرنوبيل عام 1986م.

بحسب المؤرخ هيرودوت، قبل أكثر من أربعة آلاف عام، كان الإسفلت الطبيعي يستخدم في بناء أسوار وأبراج بابل، وقد وُجدت كميات كبيرة منه على ضفاف

نهر أسوس، أحد روافد نهر الفرات، وهذه الحقيقة أكدها ديدوروس الصقلي Diodorus Siculus. كما ذكر هيرودوت نبع الزفت على زاكينثوس (الجزر الأيونية، اليونان). أيضاً، وصف هيرودوت بئراً للقار (نفط كثيف جداً) والنفط بالقرب من أرديريكا Ardericca في سيسيا.

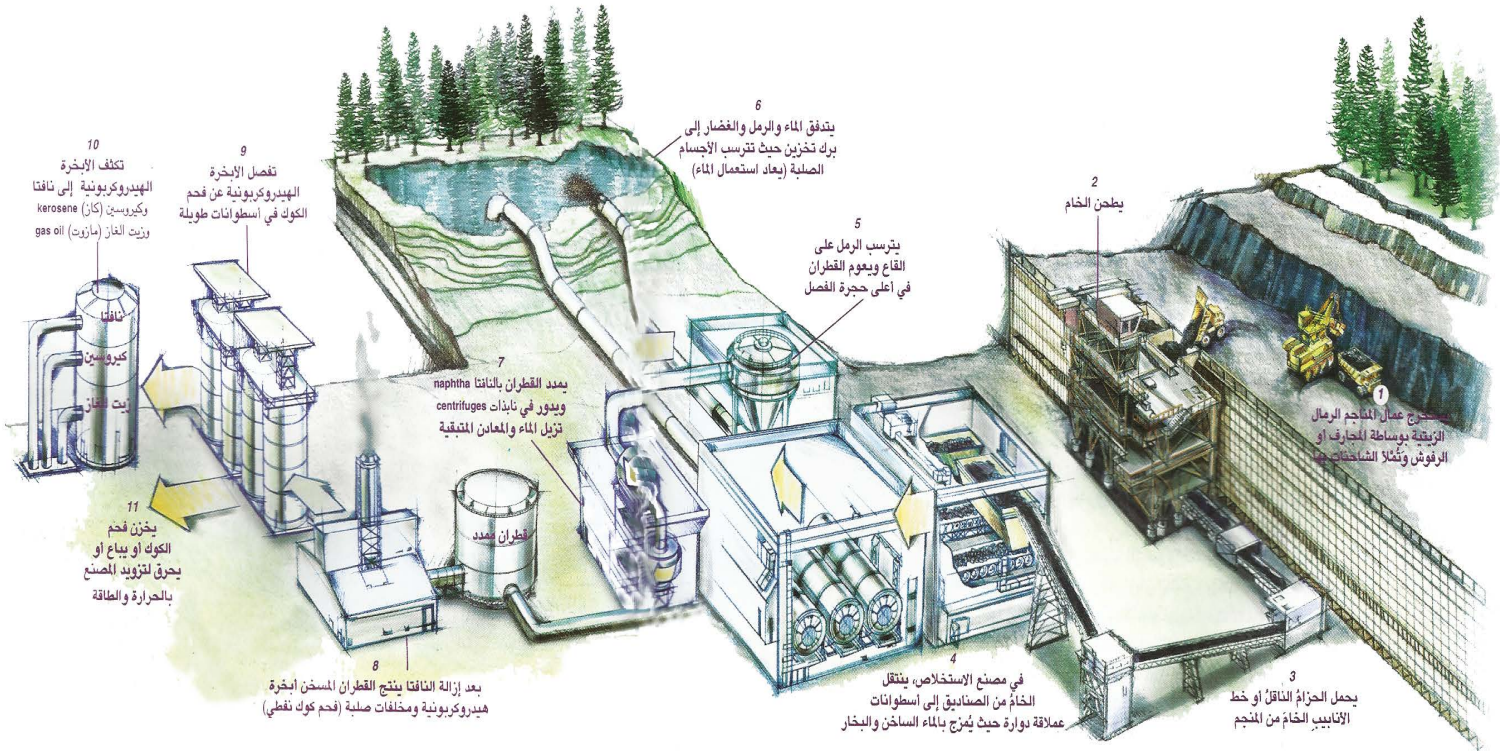
في الصين، استخدم النفط منذ أكثر من 2000م عام. في آي شينغ I Ching، واحدة من أقدم الكتابات الصينية التي تستشهد باستخدام النفط في حالته الخام دون تكرير قد اكتشف واستخرج واستخدم لأول مرة في الصين في القرن الأول قبل الميلاد. بالإضافة إلى ذلك، كان الصينيون أول من استخدم النفط كوقود منذ القرن الرابع قبل الميلاد. لقد حُفرت أقدم آبار النفط المعروفة في الصين في 347 م أو قبل ذلك. كان لها أعماق تصل إلى نحو (240 متراً) وجرى حفرها باستخدام قطع متصلة بأعمدة من الخيزران. حُرق النفط لتبخير المحلول الملحي وإنتاج الملح. في القرن العاشر، ربطت أنابيب الخيزران الواسعة آبار النفط وينابيع الملح.

يقال إن السجلات القديمة للصين واليابان تحوي على العديد من الإشارات إلى استخدام الغاز الطبيعي للإضاءة والتدفئة. كان النفط يُعرف بحرق المياه في اليابان في القرن السابع. في كتابه (مقالات دريم بول Dream Pool Essays) الذي كتب عام 1088م، صاغ العالم ورجل الدولة شين كو من أسرة سونغ كلمة (Shíyóu)، التي تعني حرفياً «نفط الصخور») للنفط، والتي لا تزال المصطلح المستخدم في اللغة الصينية واليابانية المعاصرة (Sekiyu).

كان هناك إنتاج لمواد كيميائية مثل الكيروسين في الإنبيق، والتي كانت تستخدم أساساً لمصابيح الإضاءة. كما قام الكيميائيون العرب بتقطير النفط الخام لإنتاج منتجات قابلة للاشتعال للأغراض العسكرية. من خلال إسبانيا

الإسلامية، صار التقطير متاحاً في أوروبا الغربية في القرن الثاني عشر. كما أنها كانت موجودة في رومانيا منذ القرن الثالث عشر، وجرى تسجيلها باسم باكورا păcură.

أقدم ذكر للنفط في الأمريكتين ورد في سرد السير والتر رالي لبحيرة ترينيداد بيتش في عام 1595م؛ بينما بعد سبعة وثلاثين عاماً، نُشر تقرير زيارة الفرنسيسكان جوزيف دي لاروش داليون إلى الينابيع النفطية في نيويورك في كتاب غابرييل ساجارد هوستوار دو كندا. أظهر السويدي الفنلندي المولد بيتر كام، وهو عالم وطالب كارل لينيوس، في عمله رحلات إلى أمريكا الشمالية التي نُشرت لأول مرة في عام 1753م على خريطة ينابيع النفط في ولاية بنسلفانيا. في عام 1710م أو 1711م (تختلف المصادر) اكتشف الطبيب السويسري المولد والمعلم اليوناني إيريني ديريني (Eirini d'Eirinis) الأسفلت في Val-de-Travers (نوشاتيل). أنشأ منجماً للبيتومين دي لا بريستا هناك في عام 1719م والذي كان يعمل حتى عام 1986م. في عام 1745م في عهد الإمبراطورة إليزابيث الروسية، جرى بناء أول بئر نفط ومصفاة في أوختا بوساطة فيودور بريادونوف. من خلال عملية تقطير «الصخر النفطي» حصل على مادة تشبه الكيروسين، والتي كانت تستخدم في مصابيح النفط من قبل الكنائس والأديرة الروسية (مع أن الأسر كانت لا تزال تعتمد على الشموع). جرى استخراج الرمال النفطية من عام 1745م في ميركويلر بيتشيلبرون Merkwiller-Pechelbronn، في الألزاس تحت إشراف لويس بيير أنسيلون دي لا سابلونيير Louis Pierre Ancillon de la Sablonnière، بتعيين خاص من لويس الخامس عشر. كان حقل نفط بيتشيلبرون نشطاً حتى عام 1970م، وكان مسقط رأس شركات مثل أنتار Antar وشلمبرغير Schlumberger. وجرى بناء أول مصفاة حديثة هناك عام 1857م.




مراحل استخراج النفط الرملي.

## • تاريـــخ النفـــط حـــديثًا

بـدأ التاريـخ الحديـث للنفـط في القـرن التاسـع عشـر بتكريـر البارافـين مـن النفـط الخـام. لاحـظ الكيميائـي الأسـكتلندي جيمـس يونـغ في عـام 1847م تسـرباً

طبيعياً للنفط في منجم ريدنغس في ألفريتون، ديربيشاير فقام بتقطير نفط خفيف رقيق مناسب للاستخدام كنفط مصباح، وفي الوقت نفسه حصل على نفط أكثر سمكاً مناسباً لآلات التشحيم. كانت الزيوت الجديدة ناجحة، لكن سرعان ما بدأ توريد النفط من منجم الفحم (الذي استنفد في النهاية في عام 1851م). يونغ، الذي لاحظ أن النفط كان يقطر من سطح الحجر الرملي لمنجم الفحم، افترض أنه نشأ بطريقة ما من تأثير الحرارة على الفحم ومن هذا التفكير وجد أنه قد ينتج بشكل مصطنع.

متابعةً لهذه الفكرة، جرب يونغ العديد من التجارب ونجح في النهاية، عن طريق تقطير فحم القناة على حرارة منخفضة، وهو سائل يشبه النفط، والذي عند معالجته بنفس طريقة النفط المتسرب يعطي منتجات مماثلة. وجد يونغ أنه من خلال التقطير البطيء، يمكنه الحصول على عدد من السوائل المفيدة منه، أطلق على أحدها اسم «نفط البارافين» لأنه يتجمد في درجات حرارة منخفضة إلى مادة تشبه شمع البارافين. شكل إنتاج هذه الزيوت وشمع البارافين الصلب من الفحم موضوع براءة اختراع ليونغ بتاريخ 17 أكتوبر 1850م. في عام 1850م دخل يونغ وميلدرم وإدوارد ويليام بيني في شراكة تحت اسم E.W. Binney & Co. في باثغيت في ويست لوثيان وإي. ميلدروم وشركاه في غلاسكو. جرى الانتهاء من أعمالهم في باثغيت في عام 1851م وصارت أول أعمال نفطية تجارية حقيقية ومصفاة لتكرير النفط في العالم، باستخدام النفط المستخرج من التوربانيت والصخر النفطي والفحم البيتومينى المستخرج محلياً لتصنيع النفثا وزيوت التشحيم؛ لم يجر بيع البارافين لاستخدام الوقود والبارافين الصلب حتى عام 1856م.

## • الكيروسين

طور أبراهام بينيو غيسنر، الجيولوجي الكندي، عملية لتكرير الوقود السائل من الفحم والبيتومين والصخر النفطي. اكتشافه الجديد، الذي سماه الكيروسين، يحترق بشكل أكثر نظافة وكان أقل تكلفة من المنتجات المنافسة، مثل نفط الحوت. في عام 1850م، أنشأ غيسنر شركة Kerosene Gaslight وبدأت في تركيب الإضاءة في الشوارع في هاليفاكس ومدن أخرى. في عام 1854م، توسع إلى الولايات المتحدة حيث أنشأ شركة كيروسين غاز لايت في أمريكا الشمالية في لونغ آيلاند، نيويورك. نما الطلب إلى حيث صارت قدرة شركته على الإنتاج مشكلة، لكن اكتشاف النفط، الذي يمكن من خلاله إنتاج الكيروسين بسهولة أكبر، حل مشكلة الإمداد.

قام البولندي إغناسي لوكاتسيفيتش Ignacy Łukasiewicz بتحسين طريقة غيسنر لتطوير وسيلة لتكرير الكيروسين من «الصخر النفطي» المتاح بسهولة أكبر في عام 1852م، وجرى بناء أول منجم للنفط الصخري في بوبركا Bóbrka، بالقرب من كروسنو Krosno في وسط أوروبا غاليسيا (بولندا) عام 1854م. انتشرت هذه الاكتشافات بسرعة في جميع أنحاء العالم، وبنت ميرزوف أول مصفاة روسية حديثة في حقول النفط الجاهزة في باكو في عام 1861م. في ذلك الوقت أنتجت باكو نحو 90 % من نفط العالم.

## • آبار النفط

من الصعب الإجابة عن السؤال حول ما كان يشكل أول بئر نفط تجاري. يعتبر بئر إدوين دريك 1859م بالقرب من تيتوسفيل، بنسلفانيا، والذي سنتكلم عنه بشكل مفصل أدناه، أول بئر حديث. من المحتمل أن ما يميز بئر دريك أنه حفره باستخدام محرك بخاري. لأنه كانت هناك شركة مرتبطة به؛ وأحدثت

طفرة كبيرة في صناعة النفط. ومع ذلك، فقد حفر أول بئر على الإطلاق في أي مكان في العالم، وأنتج النفط، في عام 1857م على عمق 280 قدماً من قبل شركة ميريماك الأمريكية في لا بريا في جنوب شرق ترينيداد في منطقة البحر الكاريبي.

بالإضافة إلى ذلك، كان هناك نشاط كبير قبل دريك في أجزاء مختلفة من العالم في منتصف القرن التاسع عشر. في عام 1846م، تم حفر أول بئر نفط في منطقة جنوب القوقاز التابعة للإمبراطورية الروسية (أذربيجان حالياً) في شبه جزيرة أبشيرون شمال شرق باكو (في مستوطنة بيبي هيبات)، بوساطة الرائد الروسي ألكسيف بناءً على بيانات نيكولي فوسكوبوينيكوف. قامت مجموعة بقيادة الرائد أليكسييف من فيلق باكينسكي لمهندسي التعدين بحفر بئر يدوياً في منطقة باكو في عام 1846م. كانت هناك آبار محفورة بوساطة المحركات في فيرجينيا الغربية في العام نفسه الذي كان فيه بئر دريك. حُفر بئر تجاري مبكر في بولندا عام 1853م، وآخر في رومانيا المجاورة عام 1857م.

## • المصافـــــي

في الوقت نفسه تقريباً افتتحت أول مصافي نفط في العالم، لكنها صغيرة، في جاستو Jasło، في بولندا، مع افتتاح أكبر المصافي في بلويستي Ploiești، في رومانيا. وجرى بناء مصفاة رافوف في عام 1856م وافتتحها في عام 1857م من قبل الأخوين تيودور ومارين مهدينيو، وهي مصفاة شُيدت في بلويستي، وتبلغ مساحة سطحها أربعة هكتارات، وبلغ الإنتاج اليومي أكثر من سبعة أطنان، وحصل عليها من حديد أسطواني وسبك حديد. وسُخنت بنار الخشب؛ ثم أطلق عليها اسم «أول معمل تقطير منهجي للنفط في العالم»، مسجلاً الرقم القياسي لكونها أول مصفاة نفط في العالم، وفقاً لأكاديمية السجلات العالمية.

حصلت هذه المصفاة، على أساس عقد أبرم في أكتوبر 1856م بين تيودور مهدينو ومجلس مدينة بوخارست، على الحق الحصري لتزويد عاصمة والاشيان بنفط المصباح. بدأ تنفيذ العقد في 1 أبريل 1857م، عندما استبدل النفط بالمنتجات التي توفرها مصفاة رافوف، وهكذا صارت بوخارست أول مدينة في العالم مضاءة بالكامل بالنفط الخام المقطر. في عام 1857م، بلغ إجمالي إنتاج رومانيا 275 طناً من النفط الخام. بهذا الرقم، سُجّلت رومانيا كأول دولة في إحصاءات إنتاج النفط في العالم، قبل الدول الأخرى المنتجة للنفط مثل الولايات المتحدة الأمريكية (1860م)، وروسيا (1863م)، والمكسيك (1901م) وبلاد فارس (1913م).

## • التطورات في القرن العشرين

في عام 1910م، تم اكتشاف حقول نفط كبيرة في جزر الهند الشرقية الهولندية (1885م، في سومطرة)، وبلاد فارس (1908م، في مسجد سليمان)، وبيرو (1863م، في منطقة زوريتوس)، وفنزويلا (1914م، في حوض ماراكايبو)، والمكسيك، وكان يجري تطويرها على المستوى الصناعي. تم استغلال حقول نفط كبيرة في ألبرتا (كندا) منذ عام 1947م. أدى التنقيب عن النفط البحري في أويل روكس (نفط داشلاري) في بحر قزوين قبالة أذربيجان في نهاية المطاف إلى إنشاء مدينة على أبراج في عام 1949م. جعلت حقول النفط الجاليكية من النمسا والمجر ثالث أكبر دولة منتجة للنفط في العالم بعد الولايات المتحدة والإمبراطورية الروسية، مع 5 % من إنتاج النفط العالمي عام 1908م.

صار توافر النفط والوصول إليه من «الأهمية الأساسية» في القوة العسكرية قبل وبعد الحرب العالمية الأولى، خاصة بالنسبة للقوات البحرية لأنها تغيرت من الفحم، ولكن أيضاً مع إدخال النقل بالسيارات والدبابات والطائرات.

سيستمر مثل هذا التفكير في النزاعات اللاحقة في القرن العشرين، بما في ذلك الحرب العالمية الثانية، حيث كانت المنشآت النفطية أحد الأصول الاستراتيجية الرئيسية والتي قُصفت على نطاق واسع. في عام 1938م اكتشفت احتياطيات ضخمة من النفط في المنطقة الشرقية من المملكة العربية السعودية على طول ساحل الخليج العربي.

حتى منتصف الخمسينات من القرن الماضي، كان الفحم لا يزال الوقود الأول في العالم، ولكن بعد هذا الوقت سرعان ما سيطر النفط. في وقت لاحق، في أعقاب أزمتي الطاقة 1973م و1979م، كانت هناك تغطية إعلامية كبيرة لموضوع مستويات إمدادات النفط. سلط هذا الضوء على القلق من أن النفط هو مورد محدود سينفد في النهاية، على الأقل كمصدر طاقة قابل للتطبيق اقتصادياً. مع أن التوقعات الأكثر شيوعاً وشعبية في ذلك الوقت كانت رهيبةً جداً، إلا أن فترة زيادة الإنتاج وانخفاض الطلب في السنوات اللاحقة تسببت في حدوث تخمة في النفط في الثمانينات. ومع ذلك، فإن هذا لم يدم، وفي العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، عادت المناقشات حول ذروة النفط إلى الأخبار.

حالياً، يجري تلبية نحو 90 % من احتياجات وقود المركبات عن طريق النفط. يشكل النفط أيضاً 40 % من إجمالي استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة، ولكنه مسؤول عن 2 % فقط من توليد الكهرباء. قيمة النفط أنه مصدر طاقة محمول وكثيف يغذي الغالبية العظمى من المركبات وباعتباره قاعدة للعديد من المواد الكيميائية الصناعية يجعله أحد أهم السلع في العالم.

أكبر ثلاث دول منتجة للنفط هي المملكة العربية السعودية وروسيا والولايات المتحدة. يقع نحو 80 % من احتياطيات العالم التي يمكن الوصول إليها بسهولة في الشرق الأوسط، ويأتي 62.5 % منها من الدول العربية الخمس: المملكة العربية السعودية (12.5 %) والإمارات العربية المتحدة والعراق وقطر والكويت.

ومع ذلك، مع ارتفاع أسعار النفط (أعلى من 100 دولار للبرميل)، تمتلك فنزويلا احتياطيات أكبر من المملكة العربية السعودية بسبب احتياطياتها الخام المستمدة من البيتومين.

لقد شهدت الفترة من 1950م إلى 2005م زيادة بمقدار ثمانية أضعاف في الطلب العالمي على النفط حيث وصل الطلب إلى 85 مليون برميل من النفط يومياً. أشارت بيانات وكالة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA) في عام 2004 إلى أن الطلب على النفط كان يتزايد بمعدل مركب سنوي يبلغ نحو 2% للسنوات السابقة. توقعات طلب تقييم الأثر البيئي في الولايات المتحدة زيادة إلى 118 مليون برميل يومياً بحلول عام 2030م. إذا استمرت اتجاهات الطلب الحالية، فقد يرتفع الطلب على النفط بنسبة 70 % بحلول عام 2050م.

في المستقبل، من المتوقع أن تأتي أكبر الزيادات في الطلب على النفط من العالم النامي. كانت الصين تشهد نمواً اقتصادياً مزدوج الرقم تقريبًا لأكثر من ربع قرن وصارت شرهة في شهيتها للنفط. زاد الطلب الإجمالي على الطاقة بنسبة 69 % من عام 1990م إلى عام 2005م. بحلول عام 2030م، من المرجح أن يرتفع صافي واردات الصين من النفط إلى 13.1 مليون برميل يومياً مقارنةً بصافي الواردات في عام 2006م البالغ 3.5 مليون برميل يومياً. كما شهد الاقتصاد الهندي أيضاً نمواً اقتصادياً سريعاً في السنوات الأخيرة وكان عدد سكانها يتزايد بمعدل أسرع من الصين. فـفي عام 2007م، زاد طلب الهند على النفط بنسبة 5.1 % مع توقع ارتفاعات مستمرة في المستقبل. يمكن للدول الآسيوية غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، بما في ذلك الصين والهند، أن تستأثر بنسبة 43 % من الزيادة المتوقعة في الطلب على النفط من الوقت الحالي وحتى عام 2030م.

يعود سبب زيادة الطلب على النفط في العالم النامي إلى حد كبير إلى طلب المستهلكين على السيارات التي تعمل بمحركات الاحتراق الداخلي. جلب النمو الاقتصادي في هذه البلدان ثروة أكبر لعدد أكبر من الناس، وعلى عكس الأفراد في دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية الذين فعلوا ذلك الأمر في الماضي مع ارتفاع الدخل، يستخدم العديد من هؤلاء الأشخاص ثرواتهم لشراء وسائل النقل الشخصية من أجل الاستقلال والتنقل الذي يوفره امتلاك سيارة. كانت النتيجة في الصين، أكبر دولة نامية في العالم، تضاعف سفر الركاب ثلاث مرات في فترة الخمسة عشر عاماً من 1990م إلى 2005م.

ومع ذلك، فإن دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية هي التي تمثل غالبية الاستهلاك العالمي الحالي للنفط. دولة واحدة على وجه الخصوص تبرز هي الولايات المتحدة، حيث تمثل أقل من 5 % من سكان العالم، ومع ذلك فهي تستهلك 25 % من نفط العالم. استهلاك الفرد من النفط في الولايات المتحدة يزيد 15 مرة عن مثيله في الصين. في عام 2005م، كان ثلث العجز التجاري للولايات المتحدة يُعزى إلى النفط. مع أن الولايات المتحدة هي ثالث أكبر منتج للنفط في العالم، إلا أن إنتاجها من النفط في انخفاض منذ أوائل السبعينات. إن عدم قدرة العرض المحلي على تلبية الطلب يعني أنه يتعين على الولايات المتحدة استيراد ما يقرب من 60 % من نفطها، وقد بقي الطلب الأمريكي ثابتاً في السنوات القليلة الماضية حتى في مواجهة ارتفاع الأسعار.

الناتج المحلي الإجمالي للولايات المتحدة هو الأكبر في العالم وليس هناك شك في أن صحة الاقتصاد الأمريكي لها تداعيات مهمة على صحة النظام المالي الدولي. ففي كل من البلدان المتقدمة والنامية، يعتمد الازدهار الوطني إلى حدٍ ما على النفط.

# ما هيـــة النفـــط؟

لايمكن للحضارة الحديثة أن تفكر في يوم بدون النفط والبتروكيماويات. الوقود النفطي، مثل البنزين والديزل، هو الوقود الرئيسي لجميع مركبات النقل. لقد صارت السلع المصنعة من البتروكيماويات، مثل البلاستيك والمطاط والألياف الصناعية المشتقة من النفط، جزءاً لا يتجزأ من حياتنا اليومية. سيؤدي غياب النفط إلى إنهاء حضارتنا الحديثة ما لم تتوافر الوسائل البديلة. وسيكون النفط الخام المستقبلي أثقل وملوثاً بالأملاح والمعادن غير المرغوب فيها. سيكون الإنتاج والمعالجة أكثر تكلفة من أي وقت مضى. لذلك، من المحتم الاستفادة من هذا المورد الطبيعي المتضائل بشكل أكثر حكمة وكفاءة من أجل دعم حضارتنا.

النفط بمفاهيمه المختلفة النفط أو الزيت الخام أو الذهب الأسود هو سائل كثيف قابل للاحتراق وهو عبارة عن هيدروكربون، بمعنى أنه يتكون أساساً من ذرات الكربون والهيدروجين، كما يحمل في بعض الأحيان مادة الكبريت ضمن مكوناته. تتعدد ألوانه من الأخضرٍ إلى الأسودٍ، وكثافته من خفيف كالبنزين إلى ثقيل كالقطران وذلك حسب مكان وجوده. غالباً ما يجتمع الغاز الطبيعي (غاز الميثان) والنفط في نفس الحقل، حيث يتكون في نفس الظروف التي يتشكل فيها النفط غير أنّ الاختلاف يكمن في اختلاف درجة حرارة التشكل. يعد النفط مصدرا غير متجدّدٍ للطاقة، ويُصنَّف إلى جانب الفحم ضمن الوقود الأحفوري لكونه تشكل في عصورٍ جيولوجيةٍ سالفة خلال الترسب الجيولوجي الذي استغرق ملايين السنين. المصدر الأساسي لتشكل النفط هو المادة العضوية المتكونة من بقايا حيوانية ونباتية ميتة، عامة ما تكون بحرية، حُفظت في ظروفٍ خاصة،

حيث تُدفن المادة العضوية تحت ألاف الأمتار من الطبقات الرسوبية من الطمي والرمل أو الطين. تحدث هجرته ثم تراكمه بعد تشكله، ويتطلب ذلك توفر عناصر تسمى عناصر النظام النفطي.

وبمعنى آخر فإن النفط Petroleum عبارة عن كتلة أحفورية تراكمت تحت سطح الأرض منذ زمن بعيد. يُعرف النفط الخام بأنه خليط من مواد عضوية مختلفة وهو مصدر الهيدروكربونات، مثل الميثان، والإيثان، والبروبان، والبيوتان، والبنتان، ومختلف الهيدروكربونات البرافينية والنفثينية والعطرية، وهي اللبنات الأساسية للصناعة العضوية اليوم. تُشتق المنتجات النفطية المختلفة، مثل الوقود الغازي والسائل وزيوت التشحيم والمذيبات والأسفلت والشموع وفحم الكوك، من تكرير النفط الخام. يتم تصنيع العديد من الهيدروكربونات الخفيفة والمواد الكيميائية العضوية الأخرى عن طريق المعالجات الحرارية والتحفيزية لهذه الهيدروكربونات. تنقسم صناعة معالجة الهيدروكربونات أساسًا إلى ثلاثة أنشطة متميزة - إنتاج النفط وتكرير النفط وتصنيع البتروكيماويات.

# موارد الطاقة الغير متجددة

الطاقة غير المتجددة هي مصادر الطاقة الموجودة بكميات محدودة ولا يمكن تجديدها أو تجديدها بشكل طبيعي. وتتشكل موارد الطاقة هذه من خلال العمليات الطبيعية، مثل تحلل المواد العضوية أو التفاعلات النووية التي تحدث في باطن الأرض. تلعب الطاقة غير المتجددة دورًا مهمًا في تلبية متطلباتنا الحالية من الطاقة ولكنها تشكل تحديات بسبب طبيعتها اللامتناهية وتأثيرها البيئي. لقد كانت الطاقة غير المتجددة بمثابة العمود الفقري للتصنيع الحديث وغذت النمو الاقتصادي لعدة قرون. ومع ذلك، فإن الطبيعة المحدودة لهذه الموارد تتطلب استكشاف وتطوير بدائل مستدامة، مثل مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. الفئتان العريضتان من الموارد غير المتجددة هما الوقود الأحفوري والطاقة النووية (من خام اليورانيوم).

## • الوقـــود الأحفـــوري

يتشكل الوقود الأحفوري بسبب التسخين المستمر وضغط المواد العضوية المدفونة تحت سطح الأرض. تتكون المادة العضوية بشكل أساسي من بقايا النباتات والحيوانات التي تحللت وسخنت وضغطت على مدى ملايين السنين لتكوين رواسب أحفورية. يتم استخراج الرواسب عن طريق الحفر أو التعدين، ويمكن أن تكون في صورة سائلة أو غازية أو صلبة. الوقود الأحفوري قابل للاحتراق بدرجة عالية، مما يجعله مصدرا غنيا للطاقة. يتم تصنيف الوقود الأحفوري إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

### ♦ الزيـــت الخـــام

النفط الخام، هو المورد الوحيد غير المتجدد الذي يتم استخراجه في صورة سائلة. ويوجد بين طبقات القشرة الأرضية، أو بين الصخور، ويتم استخراجه عن طريق حفر بئر عمودي في باطن الأرض وقاع المحيط. يتم بعد ذلك ضخ النفط

الخام إلى السطح، ونقله عبر مصفاة، ثم استخدامه في إنتاج منتجات مختلفة. وتستخدم لإنتاج البنزين والديزل لتشغيل السيارات وتصنيع البلاستيك وزيت التدفئة والبروبان ووقود الطائرات، بالإضافة إلى نكهات الطعام الاصطناعية. ومع استنفاد احتياطيات النفط بسرعة أكبر من اكتشاف حقول نفط جديدة، يتوقع العلماء أن الاحتياطيات النفطية الحالية قد لا تستمر إلى ما بعد منتصف القرن الحادي والعشرين.

## ♦ الغـــاز الطبيعـــي

الغاز الطبيعي هو مورد غازي غير متجدد يوجد تحت القشرة الأرضية ولكن بالقرب من رواسب النفط الخام في باطن الأرض. يتكون الغاز الطبيعي في المقام الأول من غاز الميثان، ولكنه قد يحتوي أيضًا على أشكال أخرى من الغاز الطبيعي مثل البروبان والإيثان والبيوتان.

الميثان عديم الرائحة، ويتم مزجه مع مادة مضافة خاصة لإعطائه رائحة لسهولة اكتشافه في حالة وجود تسرب للغاز. بمجرد استخراج الغاز الطبيعي، يتم إرساله إلى محطات المعالجة لإزالة البروبان والبيوتان، اللذين يستخدمان كغاز البترول المسال (LPG). يستخدم الغاز الطبيعي لتدفئة المنازل، وكذلك للطهي في أفران الغاز والمواقد والشوايات.

## ♦ الفحـــم

يتم إنتاج الفحم من مادة عضوية مضغوطة، ويحتوي على مادة الكربون والهيدروكربون. وتتكون من المستنقعات المليئة بالنباتات والتي غطتها الرواسب لملايين السنين. يتم استخراج الفحم عن طريق حفر الأرض وإخراج المواد الصلبة من الفحم لمعالجتها وتحويلها إلى طاقة. الأنواع الرئيسية للفحم هي الأنثراسايت، الليجنيت، الفحم البيتومينى، والفحم شبه البيتومينى. تم العثور على البيتومين في الولايات المتحدة. يحتوي على 45 % إلى 86 % من الكربون.

يحتوي على نسبة حرارة عالية ويستخدم في توليد الطاقة وصناعة الفولاذ والحديد. يحتوي الأنثراسايت على 86 % إلى 97 % من الكربون، وهو يتمتع بأعلى قيمة تسخين. ومن الصعب العثور عليه أكثر من الأنواع الأخرى من الفحم ويستخدم في صناعة المعادن.

## • الطاقة النووية (اليورانيوم)

وبصرف النظر عن الوقود الأحفوري، فإن الفئة الأخرى من الموارد غير المتجددة هي الوقود النووي. ويتم الحصول عليه في المقام الأول من خلال تعدين وتكرير خام اليورانيوم، وهو عنصر مشع طبيعي موجود تحت سطح الأرض. يتم العثور على اليورانيوم بكميات صغيرة، وغالباً ما يقوم عمال المناجم بجمع رواسب اليورانيوم لتكريره وتنقيته. ويولد المعدن الطاقة من خلال عملية تعرف باسم الاندماج النووي، والتي تخلق ضغطًا كافيًا لتشغيل التوربينات وتوليد الطاقة النووية. على الرغم من أن الطاقة النووية ليست وقودًا أحفوريًا، إلا أنها تصنف عادةً على أنها شكل من أشكال الطاقة غير المتجددة، ويرجع ذلك إلى حد كبير إلى أن معظم المفاعلات النووية تعتمد على اليورانيوم كمصدر للوقود. تتمتع الطاقة النووية، المستخدمة لإنتاج الكهرباء، ببعض المزايا الرئيسية مقارنة بالوقود الأحفوري، وهي أنها تساهم بشكل أقل بكثير في تلوث الهواء وانبعاثات الكربون. ومع هذا فانه من الضرورة الحفاظ على الطاقة الغير متجددة لضمان توافر الموارد على المدى الطويل، وتقليل الآثار البيئية والتخفيف من تغير المناخ والتقليل من انبعاثات الغازات الدفيئة.

# أصل ونشـــأة النفـــط

هناك ثلاث نظريات تفسر أصل ونشأة النفط هما: النظرية البيولوجية أو العضوية والنظرية الكيميائية والنظرية المعدنية.

## • النظرية البيولوجية أو العضوية

تقرر النظرية الخاصة بالأصل البيولوجي أو العضوي أن النفط قد تكون من بقايا بعض الكائنات الحية الحيوانية والنباتية، وبخاصة الأحياء البحرية الدقيقة، التي تجمعت مع بقايا كائنات أخرى بعد موتها في قيعان البحار والمحيطات، واختلطت بالرمال وبالرواسب الأخرى، وتزايد سمكها وتعرضت لضغوط هائلة وارتفعت حرارتها إلى درجات عالية جداً بفعل تحركات القشرة الأرضية وتأثير حرارة باطن الأرض، فتحولت إلى طبقات من الصخور الرسوبية تسمى بصخور المصدر، والتي في ثناياها تحولت البقايا العضوية الغنية بالكربون والهيدروجين إلى مواد هيدروكربونية، تكون منها زيت النفط والغاز الطبيعي بفعل عوامل الضغط والحرارة والنشاط البكتيري الذي قام بدور مهم في انتزاع الأكسجين والكبريت والنيتروجين من المركبات العضوية بخلايا الكائنات الحية.

تعتبر نظرية النشأة العضوية للنفط هي الأكثر قبولا بين العلماء المعاصرين لأسباب عديدة، أولها اكتشاف الغالبية العظمى من حقول النفط في الصخور الرسوبية، وبالقرب من شواطئ البحار، أو في قيعانها مثل الخليج العربي وخليج السويس وبحر الشمال. أما النفط الموجود في بعض الصخور النارية أو المتحولة فإن مصدره هو الهجرة من صخور رسوبية مجاورة. ثانيها أن الزيت المستخرج من باطن الأرض يحتوي عادة على بعض المركبات العضوية التي يدخل في تركيبها

النيتروجين والفوسفور والكبريت، وهي عناصر لا توجد في كبريتيدات الفلزات بل توجد في خلايا الكائنات الحية فقط، سواء كانت حيوانية أم نباتية. وثالثها تميز النفط بخاصية النشاط الضوئي التي تكاد تنفرد بها المواد العضوية. ولما كانت المواد العضوية المترسبة هي المصدر الأساسي الذي نشأ منه النفط، فإن صفاته الطبيعية وخصائصه الكيميائية تختلف باختلاف طبيعة الكائنات الحية، ومكونات الصخور الرسوبية الحاوية له.

## ♦ النظرية المعدنية

صاحب هذه الفرضية هو العالم الروسي ماندليف الذي أشار إلى ان النفط تكوّن نتيجة لتعرض بعض رواسب كبريتيدات الفلزات الموجودة في باطن الأرض لبخار الماء، ذلك لأن كربيد الكالسيوم يتفاعل مع الماء مكونا الهيدروكربون غير المشبع «الأسيتلين». وما جعل هذه النظرية غير مقبولة هو أن الندرة الشديدة لرواسب الكبريتيدات يصعب معها تصور أنها كانت موجودة بكميات هائلة وكافية لتكوين ما استخرج فعلا من زيت النفط وما لا يزال موجوداً في باطن الأرض. وجيولوجيا فمثل هذه الكبريتيدات إن وجدت فلابد أن تكون في ثنايا الصخور البركانية بدليل خروج غازات هيدروكربونية من فوهات البراكين، بينما لا يوجد النفط إلا في طبقات الصخور الرسوبية.

## ♦ النظرية الكيميائية

تفترض النظرية الكيميائية أن بعض الهيدروكربونات قد تكونت في الزمن القديم باتحاد الهيدروجين بالكربون، ثم انتشرت في باطن الأرض، واختزنت فيها، وتحولت إلى زيت النفط، الذي بدأ يتسرب إلى سطح الأرض عن طريق

بعض الشقوق والصدوع في القشرة الأرضية، أو عن طريق حفر آبار الاستكشاف أو المياه، وظهرت الهيدروكربونات على هيئة غازات طبيعية ونفط، أو بقيت في بعض الطبقات المسامية. وما يدعم هذه النظرية هو وجود احتياطيات هائلة من النفط في مناطق صغيرة جداً في مساحتها كالخليج العربي، والذي يحتوي على ثلثي الاحتياطي المؤكد للنفط العالمي، ولا يعقل أن تكون هذه المساحة مكان تجمع بالغ الضخامة من بقايا الكائنات الحية. هذه النظرية تعني أن هناك احتمالات كبيرة للغاز الطبيعي والنفط في أماكن كثيرة من الأرض، وأن باطن الأرض يحتوي على مصدر لا ينضب من الهيدروكربونات المكونة للنفط. ويثق بعض العلماء من الولايات المتحدة والسويد وروسيا بصدق هذه النظرية، إذ جرى الحفر على أعماق تناهز خمسة آلاف متر أو أكثر، بل إن عمق بعض الآبار الاستكشافية في روسيا وصل إلى 15كم في الدروع الجرانيتية لشبه جزيرة «كولا» شمال الدائرة القطبية.

# مكونات النفط

تقع المصادر الرئيسية للنفط الخام في منطقة الشرق الأوسط (السعودية والعراق والكويت والبحرين وعمان وإيران) وفي أمريكا الشمالية (ولايات بنسلفانيا وكاليفورنيا وتكساس وكندا) وفي الاتحاد السوفيتي (القوقاز وباكو) وفي أمريكا الجنوبية (فنزويلا والأرجنتين وكولومبيا) وفي أفريقيا (ليبيا والجزائر ونيجيريا) واندونيسيا وهنالك بعض الدول الأخرى ولكن كميات الإنتاج فيها قليلة. يختلف تركيب النفط الخام حسب مناطق الإنتاج فالنفط الأمريكي يتكون بشكل رئيسي من الهيدروكربونات ذات السلسة المستقيمة بينما يتكون النفط الروسي من المركبات الحلقية ذات الصيغة $C_nH_{2n}$ (النافثينات) وأهمها البنتان الحلقي والهكسان الحلقي ومشتقاتهما. أما بقية أنواع النفط فإنها تحتوي على كلاً من النوعين الألكانات المشبعة الاعتيادية والحلقية. ويحتوي النفط كذلك على كميات قليلة (0.1 - 3 %) من المركبات الأوكسيجينية (الحوامض النافثينية) والتي تتميز على أنها مشتقات البنتان الحلقي ومن المركبات النيتروجينية والكبريتية (مشتقات البيريدين والكوينولين والمركبتان والكبريتيدات والثايوفين وغيرها)، أما النفط الموجود في بورنيو (أندونسيا) فإنه يحتوى على كميات كبيرة من الهيدروكربونات الأروماتية.

## • المكونات الكيميائية للنفط

**يتم فصل المكونات الكيميائية للنفط الخام بواسطة التقطير التجزيئي إلى أربع أجزاء رئيسية هما:**

- **النفط (الجازولين) في حرارة 200 – 40 م°**
- **زيت البارافين (الكيروسين) في حرارة 250 – 40 م°**

- زيت الغاز (زيت الديزل ، زيت الوقود، الزيت الثقيل ) في حرارة 300 – 250 م°
- زيوت التشحيم، الشحوم، المشع البارافيني والجازولين أكثر من 300 م°

## أما ما يترسب بعد ذلك فهي منتجات أسفلتية

عند إجراء تقطير جزيئي بكفاءة عالية لأجزاء النفط والتي تحتوي على نظائر الهيدروكربونات المشبعة المتضمنة من $C_5 - C_{10}$ فأن النواتج تكون:

- إيثر نفطي 70 – 40 م°
- نفط خفيف 90 – 70 م°
- ليكروين 120 – 90 م°
- نفط ثقيل 200 – 120 م°

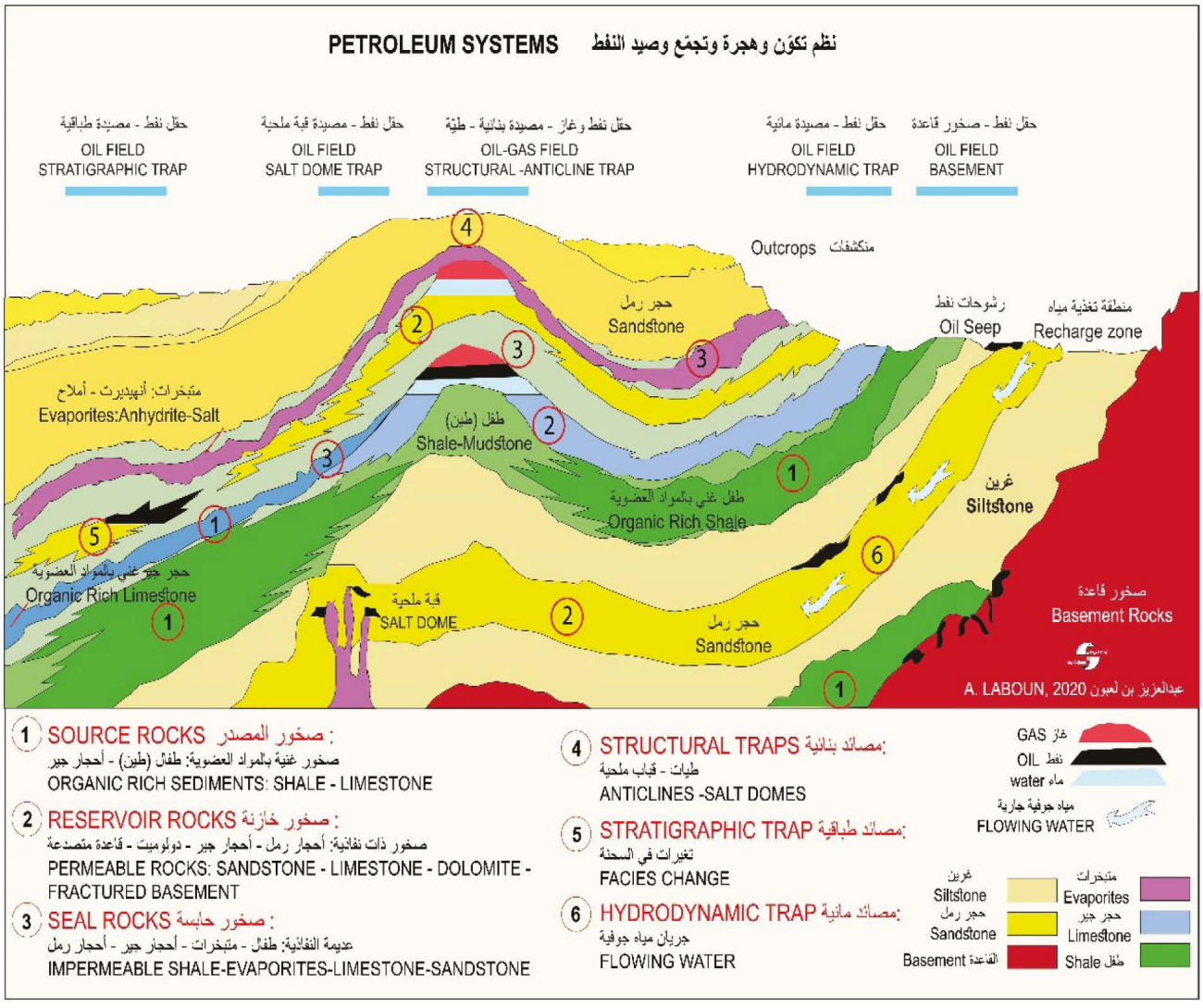
من الجدير بالذكر أن فصل النظائر للهيدروكربونات الحاوية على $C_6$ فما فوق يكون صعباً وذلك لكثرة أعداد هذه المركبات وتقارب درجة غليانها أما مكونات الجازولين فإنها تستخدم كمذيبات وعوامل استخلاص للزيوت والشحوم والاصماغ إضافة إلى استخدامها كوقود للسيارات والطائرات بينما تستخدم مكونات الكيروسين $(C_{16} - C_6)$ كمصدر للإضاءة والتدفئة.

يستخدم زيت الغاز الذي يحتوي على هيدروكربونات من $(C_{18} - C_{12})$ في محركات الديزل وكمصدر للحرارة، أما الجزء الصلب من النفط فأنه يقطر في درجات قليلة للحصول على الهيدروكربونات ثم يعرض للتقطير تحت الضغط المختزل للحصول على مزيتات ذو جودة عالية (زيوت المحركات والفازلين) الحاوية على $(C_{22} - C_{16})$ وهذه الزيوت تكون مضادة للأكسدة وذات ثبات عال تجاه الحرارة العالية والتآكل. يتم الحصول على شمع البارافين ذو الأهمية

الصناعية بواسطة البلورة من جزء المزيتات ويكون حاوياً على هيدروكربونات مشبعة تتضمن من $C_{20} - C_{40}$ وذات درجات انصهار تتراوح بين 45 – 60 م°، وتنحصر استخداماتها كبادئة لتفاعلات الأكسدة للهيدروكربونات وفي صناعة الشموع وأعواد الثقاب وفي المواد العازلة. مع تطور المحركات والآلات فقد ازدادت الحاجة إلى الوقود بشكل كبير وخاصة وقود السيارات والطائرات، الأمر الذي تطلب بحوثاً مستمرة لاكتشاف واعتماد طرق جديدة لتحويل الهيدروكربونات ذات الوزن الجزيئي العالي إلى مركبات ذات جزيئات صغيرة وبديلة للوقود (التكسير الحراري) ولاصطناع النفط من الفحم.

# النظـــام النفطي

يشـمل النظـام النفطـي كل العناصـر والعمليـات الجيولوجيـة الأساسـية لعمليـة توليـد وانتـاج النفـط كمـا هـو موضـح ادنـاه. تشـمل هـذه العناصـر التالـي:




عناصر النظام النفطي

## • صخور المصدر

تسمح عملية الترسب من دفن المواد العضوية الناتجة من موت الكائنات الحية المختلفة النباتية والحيوانية وحفظها وحجزها بعيداً عن الأكسجين، وتكون أغلبها عبارة عن طحالب وكائنات دقيقة، فتمنعها من أن تفسد، أي من أن تتأكسد. ومع مرور الزمن واستمرار الترسيب يزداد عمق المواد العضوية وبالتالي تزيد كتلة الطبقات الضاغطة من الأعلى. ويؤدي تزايد الضغط ودرجة الحرارة لملايين السنين إلى نضج المادة العضوية وتحولها إلى هيدروكربونات. وتسمي الصخور الرسوبية التي تحتوي على المادة العضوية بصخور المصدر، وغالباً ما تكون صخور طفلية أو طينية أو من أنواع معينة من الصخور الجيرية. لكي يكون الصخر مصدراً جيداً لإنتاج الهيدروكربونات، يجب أن يتميز بثلاث خصائص وهي توفر كمية كافية من المواد العضوية لا تقل عن 0.5 % من مجمل الكربون الكلي من وزن الصخر، وأن تكون قادرة على إنتاج النفط والغاز بكميات وفيرة، وأن تصل إلى مرحلة النضوج المناسبة. الخاصيتين الاولى والثانية يتحكم فيهما مكان الترسيب اما الخاصية الثالثة فتتحكم فيها التراكيب والتاريخ التكتوني للمنطقة.

### ويمكن تصنيف صخور المصدر إلى:

- **صخور المصدر المحتملة:** هي الصخور التي تحتوي على مواد عضوية بكميات كافية لتوليد الهيدروكربونات إذا ما تعرضت للنضج الحراري الكافي.
- **صخور المصدر الفعالة:** هي الصخور التي تعرضت لنضج حراري مناسب واصبحت مولدة للهيدروكربونات في الوقت الحاضر.
- **صخور المصدر قليلة الفعالية:** هي الصخور التي توقفت عن توليد

الهيدروكربونات بسبب انخفاض درجة الحرارة بسبب التكتونية او فقد جزء كبير من المادة العضوية قبل نضوجها.

- **صخور المصدر المستهلكة:** وهي الصخور التي استنفذت قدرتها على انتاج الهيدروكربونات لافتقارها للمواد العضوية او وصولها الي مرحلة النضج الحراري المتزايد.

## • صخـــور الخـــزان

صخر الخزان أو المكمن هو الصخر الذي يحتوي في تركيبها على فراغات (مسامات) أو شقوق متصلة ببعضها أو فجوات تسمح بانتقال واختزان الموائع داخلها.

**وتقسم الصخور الخازنة إلى نوعين رئيسين هما:**

- **الصخور الخازنة الفتاتية:** وتتمثل بالحجر الرملي والكونجلوميرات، حيث يعتبر الحجر الرملي أفضل الصخور لتجمع النفط نتيجة لاحتوائه على مسامية ونفاذية عاليتين.

- **الصخور الخازنة الكربونية:** وتتمثل بالحجر الجيري والدولوميت، وغالبا ماتكون مسامية هذه الصخور ثانوية نتيجة للإذابة التي تحدث للصخور بعد الترسيب.

## • صخـــور الغطـــاء

وهي صخور غير منفذة تعمل على منع انتقال الموائع من خلاله وتتمثل بالمتبخرات والطفل والحجر الجيري الصلب، وتعتبر المتبخرات أفضل صخور الغطاء.

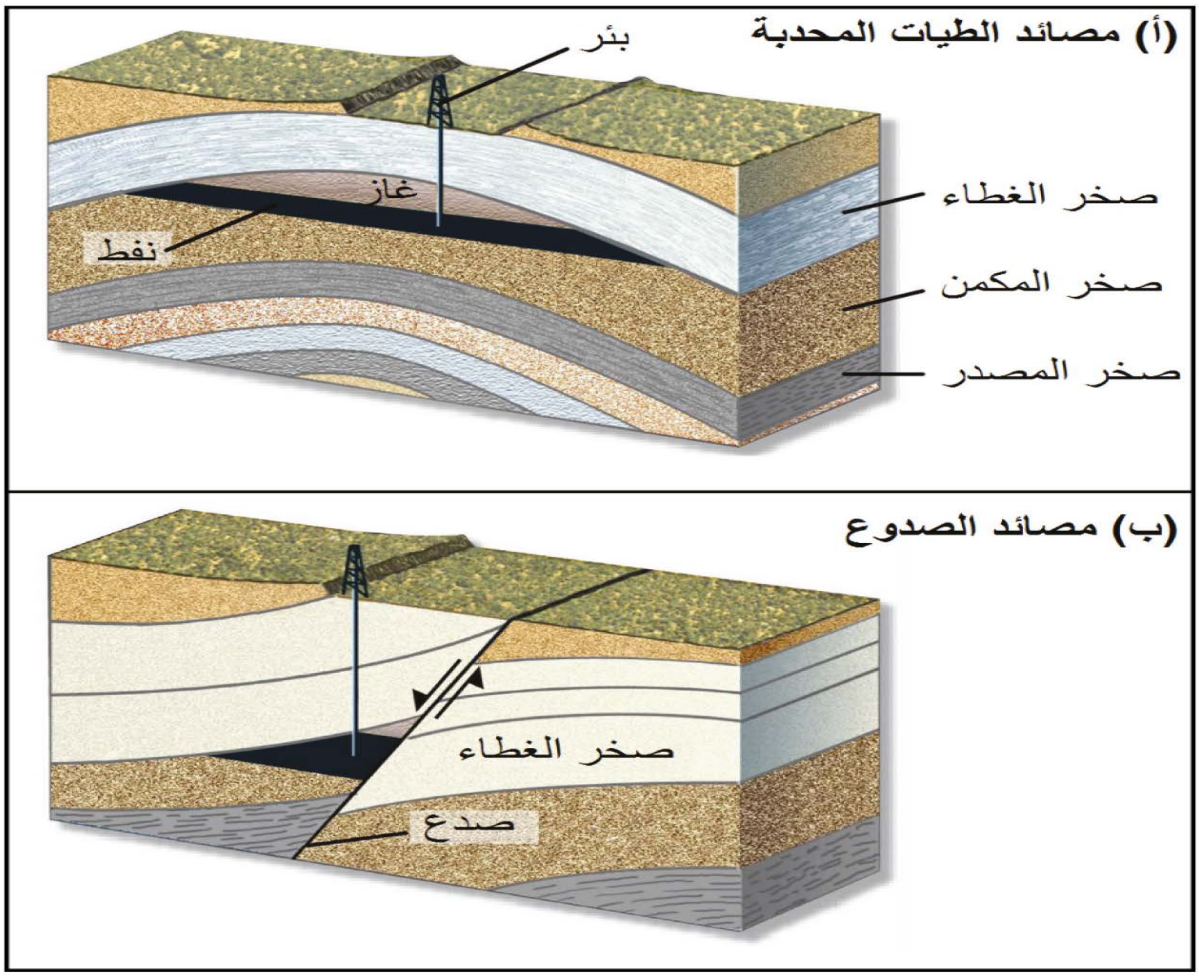
## • المصائد النفطية

المصيدة هي نسق هندسي للطبقات الرسوبية يسمح للنفط أو الغاز أو لكليهما بالتجمع فيه بكميات اقتصادية، ويحول دون هروبهما منها، ويتخذ هذا النسق الطبقي الهندسي أشكالاً عدة، لكن تظل السمة الرئيسية للمصيدة هي وجود صخر مسامي نفاذ مغطى بصخور حابسة غير منفذة. ويعد الماء عاملاً أساسياً في توجيه النفط والغاز إلى المصيدة في أغلب الحالات، مثلما يساعد في إزاحة النفط والغاز إلى فتحات الآبار في مرحلة الإنتاج، وهكذا تكون المصيدة مكان تبادل نشط للسوائل. ويسمى الجزء المنتج من مصيدة النفط بنطاق العطاء Pay zone، ويختلف سمكه من مترين في بعض حقول ولاية تكساس بالولايات المتحدة الأمريكية إلى مئات الأمتار في حقول بحر الشمال والشرق الأوسط. ومع ذلك ليس ضروريا أن تنتج كل كمية النفط في "نطاق العطاء الإجمالي"، ولذا نميز بينه وبين "العطاء الصافي" الذي يمثل السمك العمودي التراكمي للمكمن المنتج للنفط. وفي تطوير أي مكمن نفطي لابد من تحديد نسبة المنتج الصافي إلى المنتج الإجمالي في الحقل. ويمكن إنتاج النفط من خط مستوى Spill Plane حتى قرب الهامة Crest وهي أعلى نقطة في المصيدة. ومن الممكن أن تحتوي المصيدة على النفط أو الغاز أو كليهما، ويمثل سطح تماس النفط والماء Oil Water Contact-OWC أعمق مستوى لإنتاج النفط، بينما يعتبر سطح تماس الغاز والنفط Gas Oil Contact-GOC أدنى مستوى لإنتاج الغاز، ومن الضروري تحديد هذين السطحين بدقة قبل حساب احتياطي النفط والغاز الطبيعي في المكمن وتقدير معدل الإنتاج.

**وفيما يلي تصنيف مصائد النفط ذات الجدوى الاقتصادية والذي قدمه العالم سيلي عام 1985م.**

## ♦ المصائد التركيبية

هي مصائد تنشأ بفعل الحركات التكتونية التي تحدث لصخور القشرة الأرضية وتشمل مصائد الطيات المحدبة ومصائد الصدوع. يتجمع النفط في مصائد الطيات المحدبة عند القمة وتنقسم مصائد الطيات المحدبة الى نوعين. النوع الأول هو مصائد الطيات المحدبة الانضغاطية والتي تنتج من الانضغاط بفعل تقصير في القشرة الأرضية وتوجد في الغالب بجوار السلاسل الجبلية. النوع الثاني هو مصائد الطيات المحدبة المحكمة حيث يؤدي الشد في القشرة الأرضية الى تكون مرتفعات ومنخفضات في الأعماق ونتيجة للترسيب التفاضلي تترسب الطبقات مكونة طيات محدبة فوق المرتفعات. وتقوم الصدوع بدور مهم ومباشر في تكوين المصائد، حيث تعمل على وضع الطبقات غير المنفذة في طريق الطبقات المنفذة الحاملة للنفط مما يمنع من هجرته واصطياده. كما قد يكون للصدع دور غير مباشر في اصطياد النفط، بأن يشترك في ذلك مع ظواهر تركيبية أخرى، مثل الطي أو تغيير النفاذية. وقد يكون سطح تماس الغاز والنفط متصلا في المصيدة المحدبة المتأثرة ببعض الصدوع، وعندئذ يكون عنصر الاصطياد الرئيسي هو الطي، أو غير متصل فيكون الصدع هو العامل الرئيسي في تكوين المصيدة، أو تكون الطية المحدبة قد تأثرت بالصدع فانفصل التجمع النفطي بها إلى أجزاء.

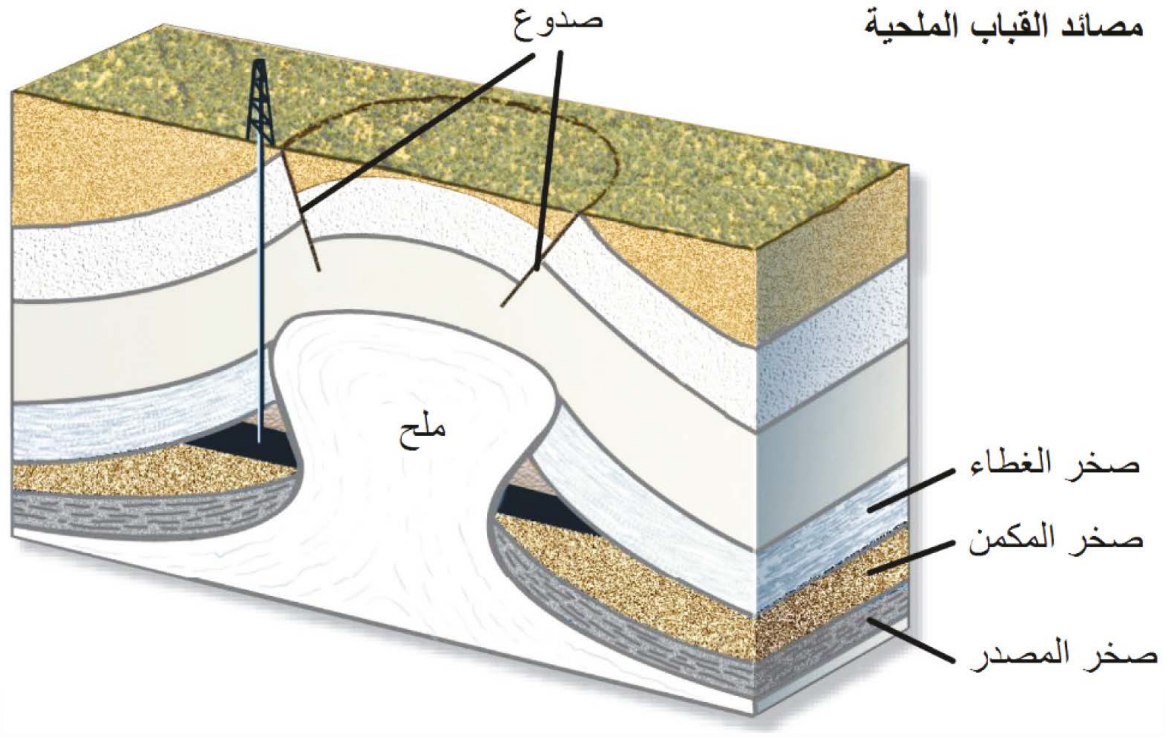



مصائد الطيات المحدبة (a) ومصائد الصدوع (b)

## ♦ المصائـــد الاقتحاميـــة

تتشكل المصائد الاقتحامية أو القبوية نتيجة حركة الرواسب الانسيابية قليلة الكثافة إلى أعلى مخترقة للصخور الأعلى كثافة التي تعلوها ومكونة قباب. تتكون المصائد الاقتحامية بشكل عام بسبب حركة الرواسب الملحية وفى بعض الأحيان بسبب حركة الطين. تتكون مصائد القباب الملحية Salt Domes نتيجة

اختلاف كثافتي الملح والطبقات الرسوبية التي تعلوها، فالملح أقل كثافة، ومن ثم يندفع إلى أعلى، ويتسبب في تقبب الطبقات الرسوبية التي تعلوه، فإذا وجد بها النفط فإنه يتحرك نحو الجوانب الخارجية للطبقة الملحية، وينحصر بين الطبقات الرسوبية من جهة والقبة الملحية من جهة أخرى. ويؤدي النمو غير المنتظم للقباب الملحية إلى تكوين مصائد متعددة متتالية ومتنوعة. وأهم أسباب تكوين مصائد القباب الملحية هي اندفاع غازات مصاحبة لنشاط بركاني، ينتج عنها ترسيب الأملاح من المحاليل المائية، ثم اندفاع الكتل الملحية إلى أعلى، أو صعود المحاليل الملحية الحارة إلى أعلى من خلال ثغرات ضعيفة في الطبقات، ثم انخفاض درجات حرارتها تدريجيا مسببة ترسيب الملح وتزايد كميته وحجمه تدريجيا نتيجة استمرار عمليات التبريد والتبلر، مما يؤدي إلى اختراق القباب الملحية للطبقات الرسوبية التي تعلوها وتوغلها فيها.




مصائد القباب الملحية

## ♦ المصائد الطباقية

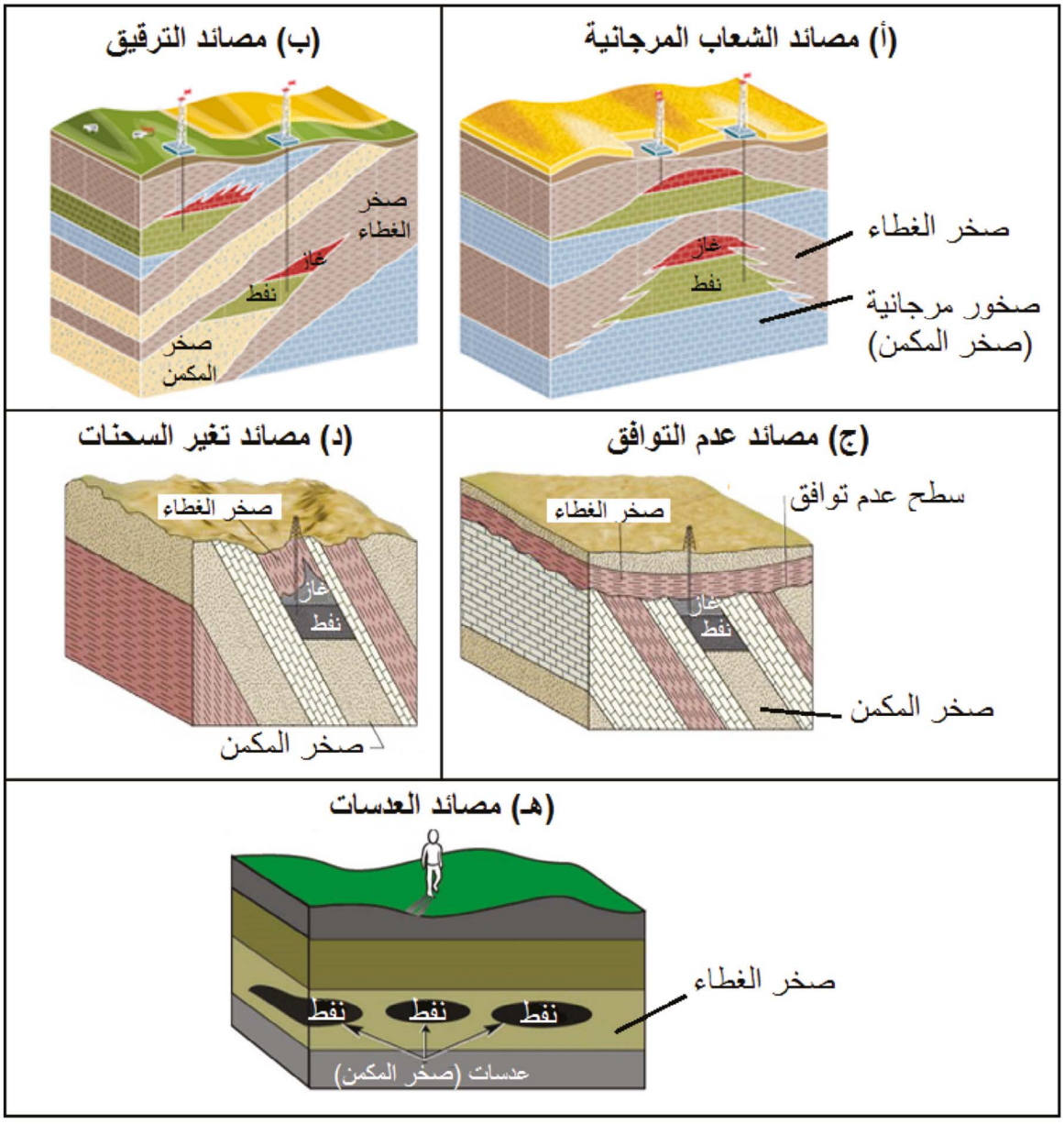
تتكون المصائد الطباقية نتيجة تغييرات جانبية من حيث المسامية والنفاذية في صخور المكمن أو عدم استمراريتها، وفي هذا النوع يكون تماس الصخور المختلفة حاداً أو تدريجيا ومتوافقا. ومن أهم المصائد الطباقية تلك التي يحاط فيها صخر المكمن المنفذ مثل الحجر الرملي بآخر غير منفذ مثل الطفل الصفحي، وبذلك يكون التغير في النفاذية أساس تكوين المصيدة. وتقسم المصائد الطباقية إلى مصائد غير مصاحبة لسطح عدم توافق، وأخرى مصاحبة لسطح عدم توافق. هناك نوعان من المصائد النفطية غير مصاحبة لسطح عدم توافق، هما المصائد الترسيبية والمصائد البين تكوينية. تشمل المصائد الترسيبية مصائد الترقيق Pinch-out، مصائد الشعب المرجانية Coral Reef، مصائد القنوات Channels، ومصائد العدسات Lenses، ومصائد الحواجز Barrier Bar. في مصائد الترقيق يتضاءل سمك قطاع سميك من صخور ذات مسامية ونفاذية عالية ويدمج في صخر طيني غير منفذ حيث يتم اصطياد النفط في الجزء المسامي والمنفذ من القطاع. وفي مصائد الشعاب المرجانية تحاط أحجار الجير المرجانية ذات المسامية والنفاذية بصخور غير منفذة. ومصائد القنوات عبارة عن وسط بيئي لنقل الرمال على شكل قنوات طويلة ذات مسامية ونفاذية عالية، يتم اصطياد النفط والغاز فيها. وتتشكل مصائد العدسات عندما توجد كتلة ضخمة من الرمل داخل قطاع من الطفلة. أما مصائد الحواجز فهي كتل رملية أو من الزلط والحصى، وتظهر غالبا بشكل جزيرة على الشاطئ، ورمالها غالباً نظيفة وجيدة التصنيف. وهناك حواجز رملية مطوقة بطين صفحي بحري، أو طين صفحي من بحيرات شاطئية، تكون مصائد نفطية.

من العمليات البين تكوينية دور السوائل في إذابة صخور المكمن لتكسبها مسامية ثانوية، أو دور المحاليل الغنية بالمعادن في عملية السمنتة Cementation،

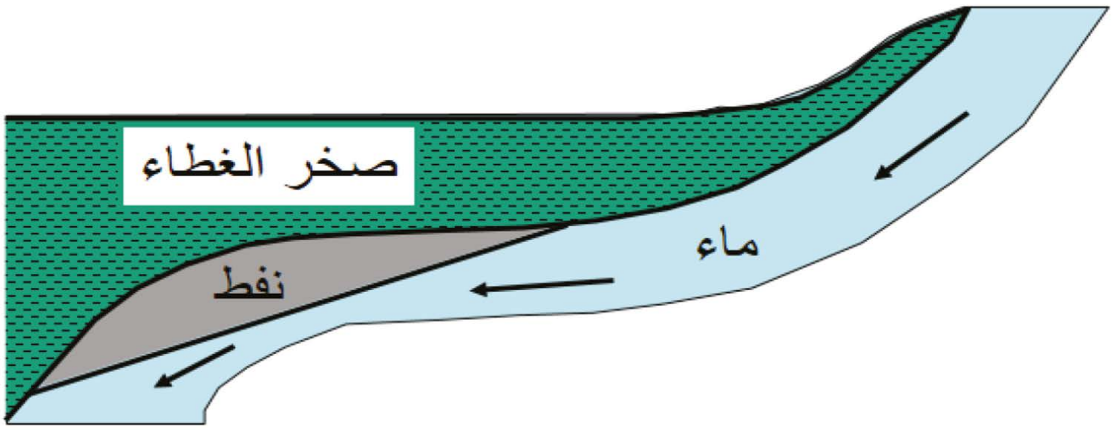
التي تكاد تؤدي إلى تدمير مسامية الخزان النفطي. ويمكن أن تؤدي هذه العمليات إلى تكوين مصيدة نفطية إذا اعترض نطاق مسمنت طريق نفط أو غاز يتحرك إلى أعلى في طبقة منفذة. كذلك يمكن اصطياد النفط أو الغاز في نطاق معين بسبب نشوء مسامية ثانوية في حيز محلي في صخور مسمنتة، وقد تتسبب عملية التدلمته Dolomitization في تكوين مصائد نفطية بين تكوينية غير منتظمة؛ لأن الدولوميت يشغل حيزا فراغيا أقل من الحجم الأصلي الذي كان يشغله الحجر الجيري. أما المصائد المصاحبة لسطح عدم توافق فتنشأ نتيجة عمليات تآكل Erosion تؤدي إلى تكوين سطح عدم توافق يفصل بين صخور منفذة وصخور غير منفذة، وعندئذ يتم تكوين مصيدة النفط في الصخور المنفذة أعلى سطح عدم التوافق أو أسفله.

## ♦ المصائد الهيدروديناميكية

في مصائد النفط الهيدروديناميكية تقوم قوة الماء بدور أساسي في منع النفط من التحرك في اتجاه أعلى الميل في الطبقات الرسوبية، إذ يعترض الماء المتحرك هيدروديناميكيا في اتجاه أسفل الميل السوائل النفطية الصاعدة إلى أعلى عندما تكون القوة الهيدروديناميكية للماء أكبر من القوة الناتجة من قابلية طفو قطرات النفط في الماء Buoyancy، وبذلك يمنع الماء تحرك النفط لأعلى، مما يؤدي اصطياده دون الحاجة إلى وجود حاجز غير منفذ.



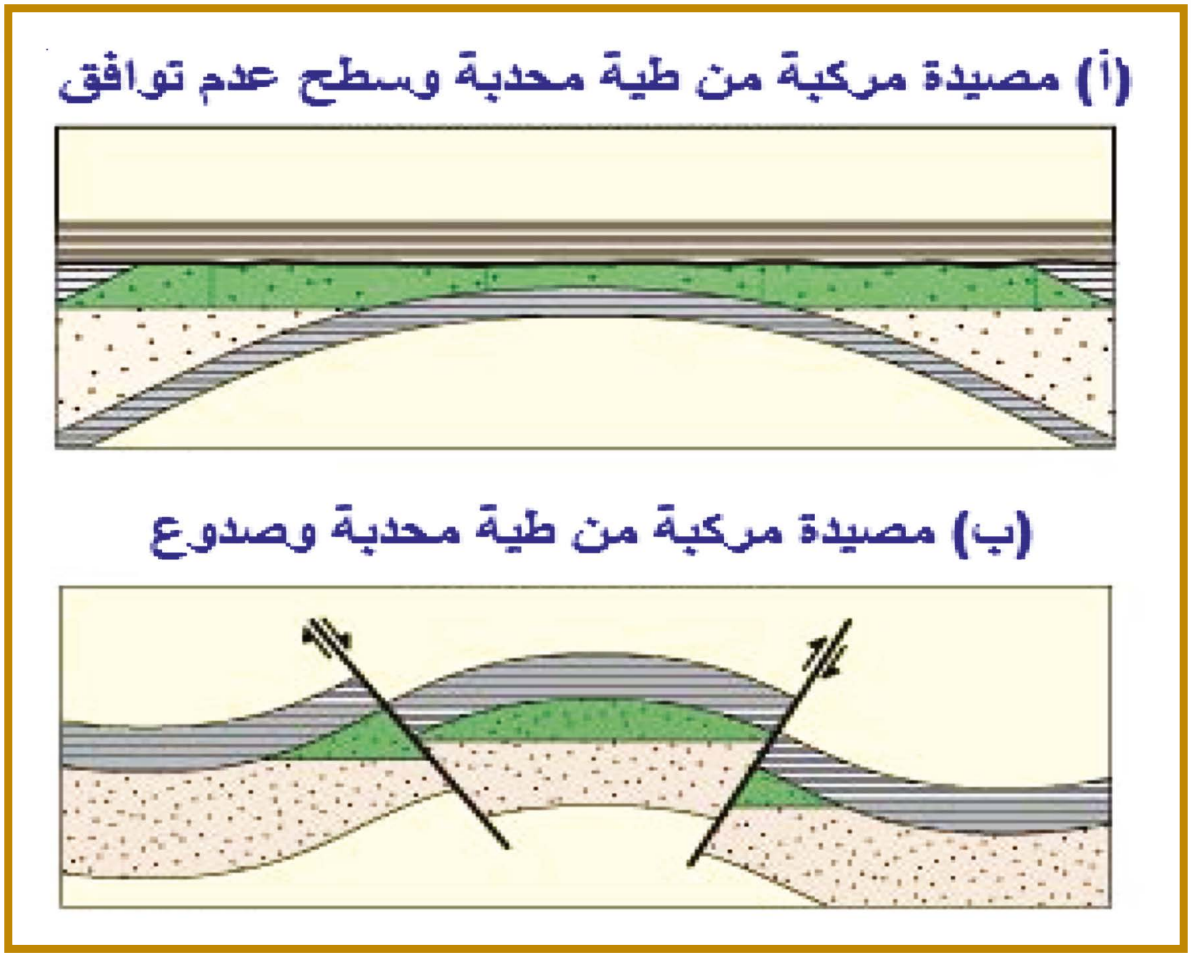

الأشكال المختلفة للمصائد الطباقية




المصائد الهيدروديناميكية

## ♦ المصائـــد المركبـــة

مصائد النفط المركبة التي تتكون من عنصر طبقي نشأ عن وجود حافة فاصلة بين طبقات منفذة وأخرى غير منفذة، وعنصر تركيبي نتج عن حركات تكتونية للقشرة الأرضية. ومن أمثلتها اصطياد النفط في مواجهة صدع Fault، وهو عنصر تركيبي في طبقة رملية أحاطت حوافها طبقة غير منفذة تمثل عنصرا طبقيا، ومصيدة طبقية مصاحبة لسطح عدم توافق تم طيها لاحقا. وتعطي المصائد المتعددة التي يواكب تكوينها نشوء القباب الملحية أمثلة لكل أنواع مصائد النفط من تركيبية أو طبقية أو مركبة.




امثلة للمصائد المركبة

## • هجـــرة النفـــط

بعد نشأة النفط والغاز في صخر المصدر (في الغالب من الطفلة)، يزحف وينزلق نحو صخر الخزان والذي في الغالب يتكون من الحجر الرملي ذو المسامية والنفاذية العالية مما يسمح للنفط السائل والغاز الطبيعي بالتحرك إلى أن يجدا حاجزا ليتراكم فيه والذي يعرف بالمصيدة، وله طبيعة هندسية تسمح بتراكم الهيدروكربون،

وتحدث هذه العملية خلال ملايين من السنين. ومن أهم الدلائل على هجرة النفط ظهوره على السطح على هيئة رشح نفطي Oil Seeps. عادة ما يذهب اعتقاد عامة الناس إلى أن النفط أو الغاز يتواجدان داخل غرفة كبيرة في باطن الأرض، مع أن صخر المكمن يكون ممتلئ بسائل نفطي أو ماء أو غاز طبيعي في مساماته كإسفنج ممتلئ. وتنقسم هجرة النفط إلى:

- **الهجرة الأولية:** وفيها ينتقل النفط مباشرة من صخر المصدر إلى صخر الخزان.
- **الهجرة الثانوية:** عندما يتحرك النفط داخل الخزان نفسه من المناطق ذات الضغط العالي إلى المناطق ذات الضغط الأقل. وبفعل التباين في الكثافة يصعد الغاز وهو الأخف الى الأعلى ويتوسط النفطُ الغازَ والماءَ لأنه أخف من الماء وأثقل من الغاز، ويترسب الماء في الأسفل إذا كان متواجداً.

**ولكي يتجمع ويتراكم النفط لابد من توافر ثلاثة عوامل وهي:**

- وجود صخور ذات مسامية عالية تسمح بتجمع كمية كبيرة ونفاذية عالية لتسمح للهيدروكربونات بالتحرك خلالها كالحجر الرملي والجيري والكونجلوميرات والحجر الجيري المسامي والتي تسمى بصخور الخزان.
- وجود صخور صماء غير مسامية تمنع حركة الهيدروكربونات وهروبها لأعلى كالطفل والمتبخرات والتي تسمى بصخور الغطاء.
- حفظ الهيدروكربونات ولكي يتم حفظها لابد أن تكون الخزانات ذات مواصفات تركيبية خاصة تمنع الهيدروكربونات في أي اتجاه (أي مستقرة تكتونياً).

# طرق استخراج النفط والغاز

## 1. التكسير الهيدروليكي

التكسير الهيدروليكي Hydraulic Fracturing، هو تقنية لتحفيز الآبار وتنطوي على تكسير التكوينات الصخرية بوساطة سائل مضغوط. تتضمن العملية الحقن عالي الضغط لـ «سائل التكسير» (الماء الذي يحوي بشكل أساسي على الرمل أو مواد دعامة أخرى معلقة بمساعدة عوامل سماكة) في حفرة البئر لخلق شقوق في التكوينات الصخرية العميقة التي يمر من خلالها الغاز الطبيعي والنفط وسوف يتدفق المحلول الملحي بحرية أكبر. وعند إزالة الضغط الهيدروليكي من البئر، فإن الحبيبات الصغيرة من دعامات التكسير الهيدروليكي (إما الرمل أو أكسيد الألومنيوم) تبقي الكسور مفتوحة.

يعود استخدام التكسير الهيدروليكي كطريقة لتحفيز آبار الصخر النفطي الضحلة إلى ستينات القرن التاسع عشر. حيث استخدمت تفجيرات الديناميت أو النتروجليسرين لزيادة إنتاج النفط والغاز الطبيعي من التكوينات الحاملة للنفط. في 24 أبريل 1865م، حصل المحارب القديم في الحرب الأهلية الأمريكية الكولونيل إدوارد إيه إل روبرتس على براءة اختراع لـ «طوربيد متفجر». وقد استخدم في ولاية بنسلفانيا ونيويورك وكنتاكي وويست فرجينيا باستخدام السائل، وكذلك النتروغليسرين المُصلّب لاحقاً. وفي وقت لاحق طُبّقت الطريقة نفسها على آبار المياه والغاز. أدخل تحفيز الآبار بالحمض، بدلاً من السوائل المتفجرة، في الثلاثينات. بسبب الحفر الحمضي، فإن الكسور لن تنغلق تماماً مما يؤدي إلى زيادة الإنتاجية.

بدأ التكسير الهيدروليكي كتجربة في عام 1947م، وتبع ذلك أول تطبيق ناجح تجارياً في عام 1950م. واعتباراً من عام 2012م، نفذ 2.5 مليون «وظيفة تكسير هيدروليكي Frac Jobs» في جميع أنحاء العالم على آبار النفط والغاز، أكثر من مليون منها داخل الولايات المتحدة.

هذه المعالجة ضرورية بشكل عام لتحقيق معدلات تدفق كافية في آبار الغاز الصخري والغاز الضيق والنفط المحكم وغاز الفحم. يمكن أن تتكون بعض الكسور الهيدروليكية بشكل طبيعي في عروق أو سدود معينة. لقد جعل الحفر والتكسير الهيدروليكي الولايات المتحدة مُصدراً رئيسياً للنفط الخام اعتباراً من عام 2019م، لكن تسرب الميثان، وهو أحد غازات الدفيئة القوية، زاد بشكل كبير. أدت زيادة إنتاج النفط والغاز من طفرة التكسير على مدار عقد من الزمان إلى انخفاض الأسعار بالنسبة للمستهلكين، مع انخفاض حصة دخل الأسرة إلى نفقات الطاقة.

## • الآثـــار الجانبيـــة

مع كثرة استخدامه؛ فإن التكسير الهيدروليكي مثير للجدل إلى حد كبير. يؤكد مؤيدوها الفوائد الاقتصادية للهيدروكربونات التي يمكن الوصول إليها على نطاق واسع، بالإضافة إلى استبدال الغاز الطبيعي بالفحم الطبيعي، الذي يحترق بشكل أكثر نظافة ويقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ($CO_2$). ويرى معارضو التكسير الهيدروليكي أن هذه التأثيرات تفوقها التأثيرات البيئية، والتي تشمل تلوث المياه الجوفية والمياه السطحية، والضوضاء وتلوث الهواء، ووقوع الزلازل، إلى جانب المخاطر الناتجة على الصحة العامة والبيئة.

لقد وجدت الأبحاث آثاراً صحية ضارة على السكان الذين يعيشون بالقرب من مواقع التكسير الهيدروليكي، بما في ذلك تأكيد المخاطر الكيميائية والجسدية والنفسية والاجتماعية مثل نتائج الحمل والولادة، والصداع النصفي، والتهاب

الجيوب الأنفية المزمن، والتعب الشديد، وتفاقم الربو والضغط النفسي. مطلوب الالتزام بإجراءات التنظيم والسلامة لتجنب المزيد من الآثار السلبية.

يوجد قدر كبير من عدم اليقين بشأن حجم تسرب الميثان المرتبط بالتكسير الهيدروليكي، وحتى بعض الأدلة على أن التسرب قد يلغي فوائد انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بالنسبة إلى أنواع الوقود الأحفوري الأخرى. على سبيل المثال، يسلط تقرير صادر عن صندوق الدفاع البيئي (EDF) الضوء على هذه المشكلة، مع التركيز على معدل التسرب في ولاية بنسلفانيا أثناء الاختبارات والتحليلات المكثفة التي عُثر عليها بما يقرب من 10 %، أو أكثر من خمسة أضعاف الأرقام المبلغ عنها. يعتبر معدل التسرب هذا ممثلاً لصناعة التكسير الهيدروليكي في الولايات المتحدة بشكل عام.

## • استخدامات التكسير الهيدروليكي

يعود التكسير الهيدروليكي للنفط الصخري Shales إلى عام 1965م على الأقل، عندما بدأ بعض المشغلين في حقل الغاز الكبير ساندي في شرق كنتاكي وجنوب غرب فيرجينيا بتكسير أوهايو شيل وكليفلاند شيل هيدروليكياً باستخدام فتحات صغيرة نسبياً. زادت وظائف التكسير الهيدروليكي بشكل عام من الإنتاج، خاصة من الآبار ذات العائد المنخفض.

في عام 1976م، بدأت حكومة الولايات المتحدة مشروع الغاز الصخري الشرقي، والذي تضمن العديد من المشروعات الإيضاحية للتكسير الهيدروليكي بين القطاعين العام والخاص. خلال الفترة نفسها، تلقى معهد أبحاث الغاز، وهو اتحاد أبحاث في صناعة الغاز، الموافقة على البحث والتمويل من اللجنة الفيدرالية لتنظيم الطاقة. في عام 1997م، قام نيك شتاينسبرغر، مهندس شركة ميتشل للطاقة (حالياً جزء من ديفون إنيرجي)، بتطبيق تقنية تكسير المياه الزلقة، باستخدام المزيد من المياه

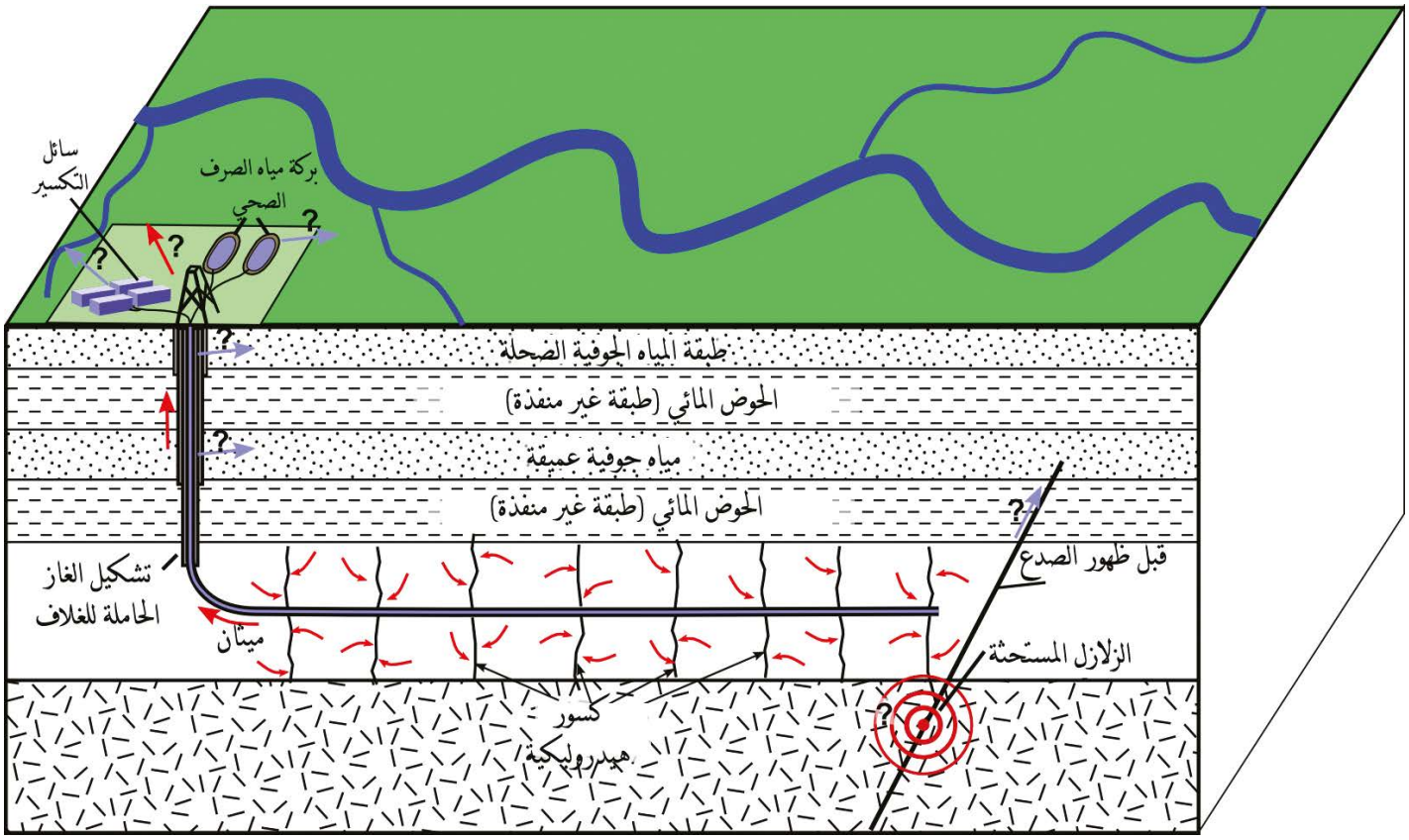
وضغط المضخة أعلى من تقنيات التكسير السابقة، والتي كانت تستخدم في شرق تكساس في بارنيت شيل في شمال تكساس.

في عام 1998م، أثبتت التقنية الجديدة نجاحها عند أول 90 يوماً من إنتاج الغاز من البئر المسمى S.H. تجاوز غريفين Griffin رقم 3 إنتاج أي من الآبار السابقة للشركة. جعلت تقنية الإكمال الجديدة استخراج الغاز اقتصادياً على نطاق واسع في بارنيت شيل Barnett Shale، وطبق لاحقاً على الصخور الصخرية الأخرى، بما في ذلك إيغل فورد Eagle Ford وباكن شيل Bakken Shale. لقد أطلق على جورج بي ميتشل لقب «أبو التكسير» بسبب دوره في تطبيقها في الصخر النفطي. حيث حفر أول بئر أفقي في بارنيت شيل في عام 1991م، ولكن لم يجر القيام به على نطاق واسع في بارنيت حتى جرى إثبات إمكانية استخلاص الغاز اقتصادياً من الآبار الرأسية في بارنيت. اعتباراً من عام 2013م، طبق التكسير الهيدروليكي الضخم على نطاق تجاري على الصخر النفطي في الولايات المتحدة وكندا والصين. العديد من البلدان الأخرى تخطط لاستخدام التكسير الهيدروليكي.

## • الزلازل المستحثة الناجمة عن التكسير الهيدروليكي

تحدث الزيادات في النشاط الزلزالي بعد التكسير الهيدروليكي على طول الصدوع الخاملة أو غير المعروفة سابقاً بسبب الحقن العميق للتخلص من تدفق التكسير الهيدروليكي (منتج ثانوي للآبار المكسورة هيدروليكياً)، ومحلول ملحي ناتج (منتج ثانوي لكل من النفط والغاز المكسور وغير المكسور) عن الآبار. لهذه الأسباب، يخضع التكسير الهيدروليكي للتدقيق الدولي، وهو مقيد في بعض البلدان، ومحظور تماماً في بلدان أخرى. يقوم الاتحاد الأوروبي بصياغة لوائح من شأنها أن تسمح بالتطبيق الخاضع للرقابة للتكسير الهيدروليكي. بالنسبة للتطبيقات الأكثر تقدماً، تُستخدم المراقبة الزلزالية الدقيقة Microseismic Monitoring أحياناً لتقدير حجم واتجاه الكسور المستحثة. يتم قياس النشاط

الزلزالية الدقيقة عن طريق وضع مجموعة من الجيوفونات في حفرة بئر قريبة. من خلال تعيين موقع أي أحداث زلزالية صغيرة مرتبطة بالكسر المتزايد، يجري استنتاج الهندسة التقريبية للكسر. توفر مصفوفات مقياس الميل المنتشرة على سطح البئر أو أسفله تقنية أخرى لمراقبة الإجهاد.




يشبه رسم الخرائط الزلزالية الدقيقة لعملية التكسير الهيدروليكي إلى حد بعيد علم الزلازل من الناحية الجيوفيزيائية. في علم الزلازل، تسجل مقاييس الزلازل المنتشرة على سطح الأرض أو بالقرب منه موجات S وموجات P التي تطلق أثناء حدث زلزال.

تسمح هذه المراقبة بتقدير الحركة على طول مستوى الصدع وموقعه في خريطة باطن الأرض. التكسير الهيدروليكي، زيادة إجهاد التكوين المتناسب مع ضغط التكسير الصافي، بالإضافة إلى زيادة ضغط المسام بسبب التسرب.

يجري إنشاء ضغوط الشد قبل طرف الكسر، مما يؤدي إلى توليد كميات كبيرة من إجهاد القص. تتحد الزيادات في ضغط المياه المسامية وفي إجهاد التكوين وتؤثر على نقاط الضعف بالقرب من الكسر الهيدروليكي، مثل الكسور الطبيعية والمفاصل وطبقات الفراش.

الأساليب المختلفة لها مزايا وأخطاء موقع مختلفة. تعتمد دقة رسم خرائط الأحداث الزلزالية الدقيقة على نسبة الإشارة إلى الضوضاء وتوزيع المستشعرات. يجري تحسين دقة الأحداث التي تقع عن طريق الانعكاس الزلزالي من خلال أجهزة الاستشعار الموضوعة في عدد من سموت البئر المرصودة. في موقع مجموعة قاع البئر، وتتحسّن دقة الأحداث من خلال الاقتراب من البئر المرصود (نسبة إشارة إلى ضوضاء عالية). صارت مراقبة الأحداث الزلزالية الدقيقة الناتجة عن تحفيز الخزان جانباً رئيسياً في تقييم الكسور الهيدروليكية، وتحسينها. الهدف الرئيسي من مراقبة الكسر الهيدروليكي هو التوصيف الكامل لبنية الكسر المستحث وتوزيع الموصلية داخل التكوين.

يساعد التحليل الجيوميكانيكي، مثل فهم خصائص مواد التكوينات، والظروف في الموقع، والهندسة، في المراقبة من خلال توفير تعريف أفضل للبيئة التي تنتشر فيها شبكة التصدع. المهمة اللاحقة هي معرفة موقع مادة الدعم داخل الكسر وتوزيع موصلية الكسر. يمكن مراقبة ذلك باستخدام أنواع متعددة من التقنيات لتطوير نموذج يمكننا أخيراً من التنبؤ بدقة بأداء البئر.

## • التأثير البيئي للتكسير الهيدروليكي

يرتبط التأثير البيئي للتكسير الهيدروليكي باستخدام الأراضي واستهلاك المياه، وانبعاثات الهواء، بما في ذلك انبعاثات الميثان، ومحلول ملحي وتسرب مائع التكسير، وتلوث المياه، وتلوث الضوضاء، والصحة. يعد تلوث المياه والهواء من أكبر المخاطر التي تهدد صحة الإنسان من جراء التكسير الهيدروليكي. حددت الأبحاث أن التكسير الهيدروليكي يؤثر سلباً على صحة الإنسان ويؤدي إلى تغير المناخ.

تشتمل سوائل التكسير الهيدروليكي على مواد داعمة ومواد أخرى، والتي تشتمل على مواد كيميائية معروفة بأنها سامة، بالإضافة إلى مواد كيميائية غير معروفة قد تكون سامة. في الولايات المتحدة، يمكن معاملة هذه المواد المضافة كأسرار تجارية من قبل الشركات التي تستخدمها. أدى نقص المعرفة بمواد كيميائية معينة إلى تعقيد الجهود المبذولة لتطوير سياسات إدارة المخاطر ودراسة الآثار الصحية. يمكن أن يكون استخدام المياه عن طريق التكسير الهيدروليكي مشكلة في المناطق التي تعاني من نقص المياه. قد تتلوث المياه السطحية من خلال الانسكاب وحفر النفايات التي جرى بناؤها وصيانتها بشكل غير صحيح، في الولايات القضائية التي يُسمح فيها بذلك.

علاوة على ذلك، يمكن أن تتلوث المياه الجوفية إذا كانت سوائل التكسير وسوائل التكوين قادرة على الهروب أثناء التكسير الهيدروليكي. ومع ذلك، فإن احتمالية تلوث المياه الجوفية من انتقال مائع التكسير إلى أعلى ضئيلة جداً، حتى في فترة طويلة الأجل. يجري إدارة المياه المنتجة، وهي المياه التي تعود إلى السطح بعد التكسير الهيدروليكي، عن طريق الحقن تحت الأرض، ومعالجة مياه الصرف الصحي البلدية والتجارية، وإعادة استخدامها في الآبار

المستقبلية. هناك احتمال أن يتسرب الميثان إلى المياه الجوفية والهواء، مع أن تسرب غاز الميثان يمثل مشكلة أكبر في الآبار القديمة منه في تلك التي جرى بناؤها بموجب تشريعات أحدث.

ذكرنا سابقاً أن التكسير الهيدروليكي يتسبب في حدوث الزلازل المستحثة والتي تسمى الأحداث الزلزالية الدقيقة. حجم هذه الأحداث صغير جداً بحيث لا يمكن اكتشافه على السطح، حيث يكون حجمه من M-3 إلى M-1 عادةً. ومع ذلك، فإن آبار التخلص من السوائل (التي غالباً ما تستخدم في الولايات المتحدة للتخلص من النفايات الملوثة من العديد من الصناعات) كانت مسؤولة عن الزلازل حتى M 5.6 في أوكلاهوما وولايات أخرى.

تعمل الحكومات في جميع أنحاء العالم على تطوير أطر تنظيمية لتقييم وإدارة المخاطر البيئية والصحية المرتبطة بها، والعمل تحت ضغط من الصناعة من ناحية، ومن مجموعات مكافحة التكسير الهيدروليكي من ناحية أخرى. في بعض البلدان مثل فرنسا يفضل النهج الاحترازي وحظر التكسير الهيدروليكي. يستند الإطار التنظيمي للمملكة المتحدة إلى استنتاج مفاده أن المخاطر المرتبطة بالتكسير الهيدروليكي يمكن التحكم فيها إذا نفذت في ظل تنظيم فعال وإذا نفذت أفضل الممارسات التشغيلية. لقد اقترح مؤلفو الدراسات الوصفية أنه من أجل تجنب المزيد من الآثار السلبية، من الضروري زيادة الالتزام بالتنظيم وإجراءات السلامة.

## 2. الصخر النفطي

الصخر النفطي Oil Shale هو صخر رسوبي غني بالمواد العضوية دقيق الحبيبات يحوي على الكيروجين Kerogen (خليط صلب من المركبات الكيميائية العضوية) يمكن من خلاله إنتاج الهيدروكربونات السائلة. بالإضافة إلى الكيروجين، فإن التركيب العام للصخر النفطي يشكل مادة غير عضوية وقار.

نتوء من الصخر النفطي الأوردوفيشي (kukersite)، شمال إستونيا

بناءً على بيئة الترسيب الخاصة بهم، يتم تصنيف الصخر النفطي على أنه صخور نفطية بحرية وبحيرية وأرضية. تختلف الصخر النفطي عن الصخور الحاملة للنفط، ورواسب الصخر النفطي التي تحوي على النفط (النفط الضيق) الذي يجري إنتاجه أحياناً من الآبار المحفورة.

من الأمثلة على الصخر النفطي هي تشكيل باكن، بيير شيل، تشكيل نيوبرارا، وتشكيل إيغل فورد. وفقاً لذلك، لا ينبغي الخلط بين الصخر النفطي المنتج من الصخر النفطي والنفط الضيق، والذي يُطلق عليه أيضاً اسم الصخر النفطي.

تحدث رواسب الصخر النفطي في جميع أنحاء العالم، بما في ذلك الرواسب الرئيسية في الولايات المتحدة. حددت تقديرات عام 2016م للودائع العالمية إجمالي موارد العالم من الصخر النفطي بما يعادل 6.05 تريليون برميل (962 بليون متر مكعب) من النفط في المكان. اكتسب الصخر النفطي الاهتمام كمصدر وفير محتمل للنفط. ومع ذلك، فإن المحاولات المختلفة لتطوير رواسب الصخر النفطي حققت نجاحاً محدوداً. تمتلك إستونيا والصين فقط صناعات صخرية نفطية راسخة، وتستخدم البرازيل وألمانيا وروسيا الصخر النفطي إلى حد ما يمكن حرق الصخر النفطي مباشرة في الأفران كوقود منخفض الدرجة لتوليد الطاقة وتدفئة المناطق أو استخدامه كمادة خام في معالجة المواد الكيميائية ومواد البناء. يؤدي تسخين الصخر النفطي إلى درجة حرارة عالية بدرجة كافية إلى أن ينتج عن العملية الكيميائية للتحلل الحراري بخار. عند تبريد البخار، يُفصل النفط السائل غير التقليدي، المسمى بالصخر النفطي، عن غاز الصخر النفطي القابل للاحتراق.

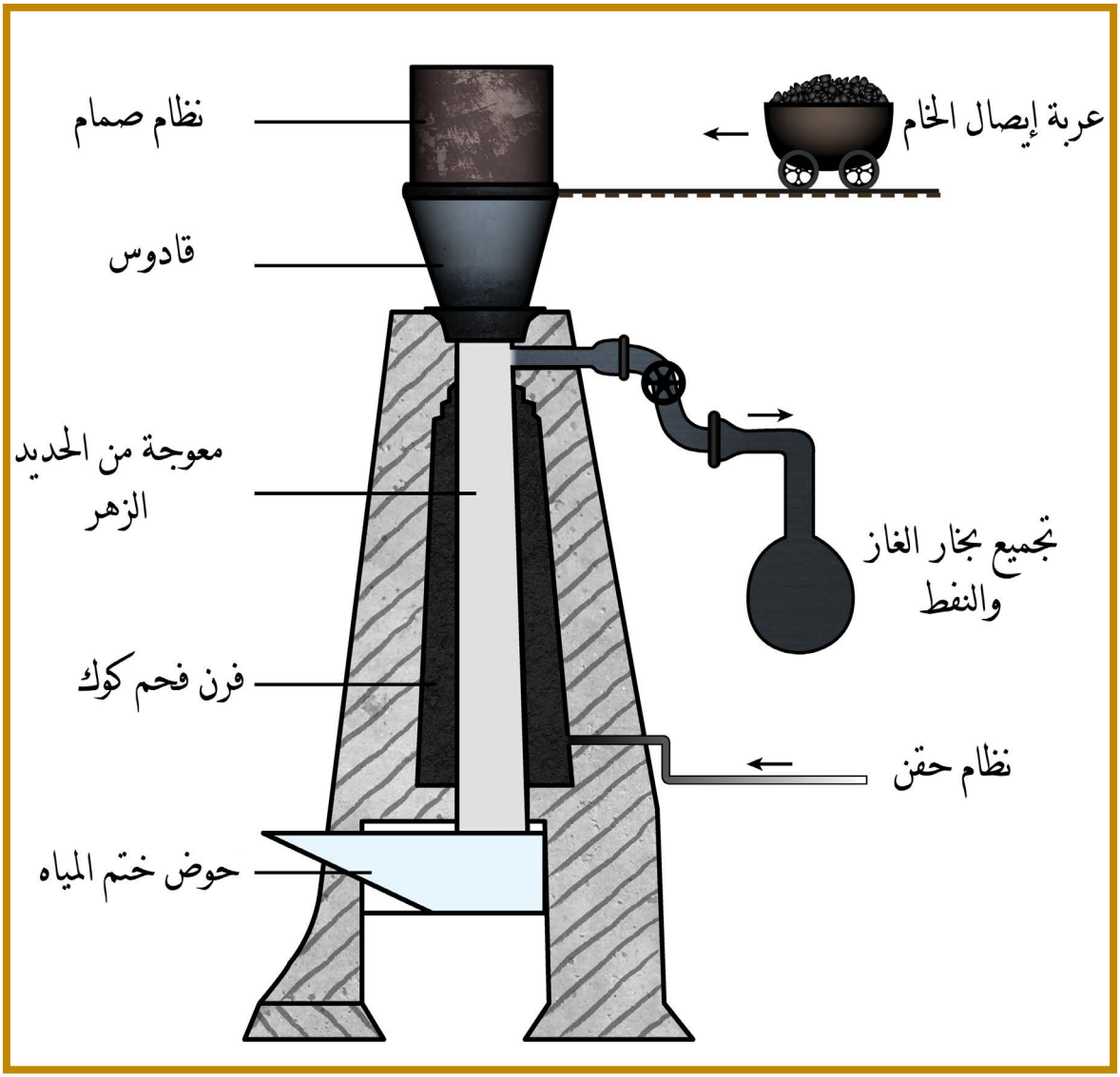
يعتبر الصخر النفطي بديلاً عن النفط الخام التقليدي؛ ومع ذلك، فإن استخراج الصخر النفطي أكثر تكلفة من إنتاج النفط الخام التقليدي من الناحية المالية ومن ناحية تأثيره البيئي. يثير تعدين ومعالجة الصخر النفطي عدداً من المخاوف البيئية، مثل استخدام الأراضي، والتخلص من النفايات، واستخدام المياه، وإدارة مياه الصرف الصحي، وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وتلوث الهواء.

## • استخراج الصخر النفطي

استخراج الصخر النفطي هو عملية صناعية لإنتاج النفط غير التقليدي. تحول هذه العملية الكيروجين في الصخر النفطي إلى نفط صخري عن طريق الانحلال الحراري أو الهدرجة. يستخدم الصخر النفطي الناتج كنفط وقود جرى ترقيته لتلبية مواصفات مواد التكرير عن طريق إضافة الهيدروجين وإزالة شوائب الكبريت والنيتروجين.

عادة ما يجري استخراج الصخر النفطي فوق الأرض (معالجة خارج الموقع) عن طريق تعدين الصخر النفطي ثم معالجته في منشآت المعالجة. تقوم التقنيات الحديثة الأخرى بالمعالجة تحت الأرض (في الموقع أو في الموقع) عن طريق تطبيق الحرارة واستخراج النفط عبر آبار النفط. يرجع أقدم وصف للعملية إلى القرن العاشر للميلاد. وفي عام 1684م، منحت بريطانيا العظمى أول براءة اختراع رسمية لعملية الاستخراج. انتشرت صناعات الاستخراج والابتكارات على نطاق واسع خلال القرن التاسع عشر. تقلصت الصناعة في منتصف القرن العشرين بعد اكتشاف احتياطيات كبيرة من النفط التقليدي، لكن ارتفاع أسعار النفط في بداية القرن الحادي والعشرين أدى إلى تجدد الاهتمام، مصحوباً بتطوير واختبار تقنيات جديدة.

اعتباراً من عام 2010م، تعمل الصناعات الاستخراجية الرئيسية طويلة الأمد في إستونيا والبرازيل والصين. عادة ما تتطلب جدواها الاقتصادية الافتقار إلى النفط الخام المتاح محلياً. أدت قضايا أمن الطاقة الوطنية أيضاً دوراً في تطويرها. يطرح منتقدو استخراج الصخر النفطي أسئلة حول قضايا الإدارة البيئية، مثل التخلص من النفايات، والاستخدام المكثف للمياه، وإدارة مياه الصرف الصحي، وتلوث الهواء.




كانت معوجة ألكسندر سي كيرك، التي استخدمت في منتصف القرن التاسع عشر إلى أواخره، واحدة من أولى المعالجات العمودية للصخر النفطي. تصميمه نموذجي من المعالجات المستخدمة في نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين.

## • تصنيف تقنيات استخراج الصخر النفطي

أنشأ محللو الصناعة عدة تصنيفات للتقنيات المستخدمة لاستخراج الصخر النفطي من الصخر النفطي.

### ▪ حسب مبادئ العملية

بناءً على معالجة الصخر النفطي الخام بالحرارة والمذيبات، تصنف الطرق على أنها انحلال حراري أو هدرجة.

### ▪ حسب الموقع

يعتبر التمييز المستخدم بشكل متكرر ما إذا كانت المعالجة تجري فوق الأرض أو تحتها، ويصنف التقنيات على نطاق واسع على أنها خارج الموقع (مزاحة) أو في الموقع (في المكان). في المعالجة خارج الموقع، والمعروفة أيضاً باسم معوجة فوق الأرض، يستخرج الصخر النفطي إما تحت الأرض أو على السطح ثم ينقل إلى منشأة معالجة. على النقيض من ذلك، فإن المعالجة في الموقع تحول الكيروجين في حين لا يزال في شكل رواسب الصخر النفطي، وبعد ذلك يستخرج عبر آبار النفط، حيث يرفع بطريقة النفط الخام التقليدي نفسها. على عكس المعالجة خارج الموقع، فهي لا تنطوي على التعدين أو التخلص من الصخر النفطي المستهلك فوق الأرض حيث يبقى الصخر النفطي المستهلك تحت الأرض.

لكن هناك مزايا وعيوب مرتبطة بالعمليات، والمتطلبات، والمنتجات والجودة، والآثار البيئية المرتبطة بتطبيق التقنيات في الموقع مقابل نهج معوجة السطح حيث:

- ❖ يجري تقليل مناولة المواد بشكل كبير حيث يتصل فقط بالمحتوى العضوي للصخر النفطي، وليس الجسم الخام بكامله، وينتج على السطح. لا توجد

أعباء زائدة للتعدين، ولا يوجد تعدين تحت السطح قليل أو معدوم، ولا يوجد صخر نفطي مستنفد يمكن التخلص منه.

- في الرواسب العميقة والسميكة، حيث تكون الأساليب الموضعية أكثر قابلية للتطبيق، يمكن الاتصال بالمزيد من المورد وتسخينه، مع أنه سيجري استرداد القليل من المنتجات.
- يتخلص إلى حد كبير من متطلبات المياه للتعدين والاستصلاح والتحكم في الغبار والتخلص من الصخر النفطي المستهلك.
- يمكن تحسين كفاءات الطاقة الصافية للعملية المتكاملة – من الوصول إلى الموارد واستعادتها، من خلال إعادة التدوير والارتقاء – إلى التخلص من النفايات مقارنة ببعض عمليات التعدين السطحي وعمليات إعادة التشكيل.
- انبعاثات المعايير يمكن تقليل ملوثات الهواء بشكل كبير.
- اعتماداً على مصدر طاقة التدفئة، يمكن أيضاً تقليل انبعاثات الكربون في دورة الحياة.
- ستقلل التأثيرات السطحية على موائل الحياة البرية، بما في ذلك تلك الناجمة عن الضوضاء، بسبب نقص نشاط التعدين، أو متطلبات تخزين الحمولة الزائدة والصخر النفطي والصخر النفطي المستهلك.
- يمكن تجنب التأثيرات المحتملة على المياه السطحية والجوفية للسائل المرتشح الناتج عن الأعباء الزائدة والصخر النفطي والصخر النفطي المستهلك.

## ▪ طريقة التسخين

يمكن تصنيف طريقة نقل الحرارة من منتجات الاحتراق إلى الصخر النفطي على أنها مباشرة أو غير مباشرة. في حين أن الطرق التي تسمح لمنتجات الاحتراق بالاتصال بالصخر النفطي داخل المعوجة تصنف على أنها مباشرة، فإن الطرق التي تحرق المواد خارج المعوجة لتسخين مادة أخرى تلامس الصخر النفطي توصف بأنها غير مباشرة.

## ▪ طريقة حامل الحرارة

استناداً إلى المواد المستخدمة لتوصيل الطاقة الحرارية إلى الصخر النفطي، صنفت تقنيات المعالجة إلى ناقل حرارة الغاز، وناقل الحرارة الصلب، والتوصيل الجداري، والسائل التفاعلي، وطرق التسخين الحجمي. يمكن تصنيف طرق ناقل الحرارة على أنها مباشرة أو غير مباشرة.

## ▪ حسب حجم جزيئات الصخر النفطي الخام

يمكن تمييز تقنيات المعالجة المختلفة خارج الموقع عن طريق حجم جزيئات الصخر النفطي التي يجري تغذيتها في المعالجات. كقاعدة عامة، تعالج تقنيات ناقل الحرارة الغازي كتل الصخر النفطي التي يتراوح قطرها من 10 إلى 100 ملم، بينما تعالج تقنيات ناقل الحرارة الصلب وتوصيل الجدار الغرامات التي تكون جزيئات قطرها أقل من 10 ملم.

## ▪ عن طريق معوجة التوجه

تُصنف تقنيات «خارج الموقع» أحياناً على أنها رأسية أو أفقية. عادة ما تكون المعوجات العمودية عبارة عن أفران عمودية حيث تتحرك طبقة من الصخر النفطي من أعلى إلى أسفل بوساطة الجاذبية. عادةً ما تكون المعوجات

الأفقية عبارة عن براميل أو براغي دوارة أفقية حيث يتحرك الصخر النفطي من طرف إلى آخر. كقاعدة عامة، تقوم عمليات التجعيد الرأسية بمعالجة الكتل باستخدام ناقل حرارة غاز، بينما تقوم عمليات التجعيد الأفقية بمعالجة الغرامات باستخدام ناقل حرارة صلب.

### ▪ من خلال تعقيد التكنولوجيا

عادة ما تصنف التقنيات في الموقع إما على أنها عمليات حقيقية في الموقع أو عمليات معدلة في الموقع. لا تتضمن العمليات الحقيقية في الموقع التعدين أو طحن الصخر النفطي. تتضمن العمليات المعدلة في الموقع حفر وتكسير الرواسب النفطية المستهدفة لإنشاء فراغات في الرواسب. تتيح الفراغات تدفقاً أفضل للغازات والسوائل من خلال الرواسب، ومن ثم زيادة حجم ونوعية الصخر النفطي المنتج.

## • التأثير البيئي للصخر النفطي

يشمل التأثير البيئي لصناعة الصخر النفطي النظر في قضايا مثل استخدام الأراضي، وإدارة النفايات، وتلوث المياه والهواء الناجم عن استخراج ومعالجة الصخر النفطي. يتسبب التعدين السطحي لرواسب الصخر النفطي في الآثار البيئية المعتادة للتعدين في الأماكن المفتوحة. بالإضافة إلى ذلك، ينتج عن الاحتراق والمعالجة الحرارية نفايات يجب التخلص منها وانبعاثات ضارة في الغلاف الجوي، بما في ذلك ثاني أكسيد الكربون، أحد غازات الدفيئة الرئيسية. قد تقلل عمليات التحويل التجريبية في الموقع وتقنيات احتجاز الكربون وتخزينه من بعض هذه المخاوف في المستقبل، ولكنها قد تثير مخاوف أخرى، مثل تلوث المياه الجوفية.

غالباً ما يمثل الصخر النفطي المستنفد مشكلة التخلص منه.

# طــرق الاستكشاف والتنقــيب عن النفط

لا توجـد مناطـق محـددة أو صخـور معينـة، أو أعمـاق متقاربـة، أو عصـور جيولوجيـة محـددة يوجد فيهـا النفـط وإن كنـا نعـرف أن النفـط قـد تكون واختـزن واحتجـز في طبقـات يتـراوح أعمارهـا التكوينيـة بـين حقبة الحياة العتيقـة Paleozoic والعصـور السـفلى لحقبـة الحيـاة المتوسـطة، وأن الاستكشـاف والإنتـاج النفطـي قـد امتـد إلـى الحقبـة الحديثـة Cenozoic. ومـن ثـم يتطلـب دراسـة طبقـات الصخـور تحـت سـطح الأرض للعثـور علـى النفـط وتراكيبهـا الجيولوجيـة، بحثـا عـن الأحـواض الرسـوبية والمكامـن النفطيـة المحتملـة فيهـا، سـواء علـى اليابسـة، أم تحـت سـطح البحـر، بـل وتحـت الجليـد في شـمال الكـرة الأرضيـة وجنوبهـا. ويتطلـب التنقيـب عـن النفـط اسـتثمارات ماديـة كبيـرة، وخبـرات تكنولوجيـة متطـورة، وتمويـلا مسـتمرا لخطـط الاستكشـاف، وتكامـل عناصـر تعديـن النفـط وصناعتـه، ونقلـه وتسـويقه. وهـدف التنقيـب الواضـح هـو البحـث عـن مكامـن تجمـع النفـط باسـتخدام مختلـف أنـواع المسـح، والكشـف جويـاً وأرضيـاً وجوفيـاً، ويعتبـر الرشـح النفطـي مؤشـراً إيجابيـاً لتحديـد أغلـب مناطـق التنقيـب، إلـى جانـب البحـث عـن النفـط في مصائـد بنائيـة معينـة كالطيـات المحدبـة والقبـاب.

تشـمل تقنيـات التنقيـب المسـح الجيولوجـي الطبقـي، الـذي تسـتخدم فيـه أدوات الاستشـعار عـن بعـد كالصـور الجويـة الراداريـة والتصويـر بالأقمـار الصناعيـة، إلـى جانـب الدراسـات الميدانيـة بهـدف تحديـد العناصـر الجيولوجيـة الرئيسـية في مناطـق معينـة، وأنـواع صخورهـا، وامتدادهـا السـطحي وتراكيبهـا المتنوعـة، ورسـم خرائـط جيولوجيـة لهـا، وتقديـر احتمـالات تكون النفـط في طبقـات رسـوبية معينـة، وترتيبهـا وأعماقهـا وسـمك الطبقـات الخازنـة المحتملـة، وبعـض خصائـص المصائـد النفطية. ثم تأتي بعد ذلك مرحلة المسح الجيوفيزيائي باستخدام الطرق السيزمية

والجاذبية والمغناطيسية والمقاومة الكهربية، والاستقطاب المستحث، والجهد الذاتي والموجات الكهرومغناطيسية لتحديد أهم الخواص الطبيعية للصخور، مثل الكثافة والمسامية والمرونة والسعة الكهربية والصفات المغناطيسية. وباستكمال الدراسات الكيميائية للصخور، يمكن معرفة مدى احتوائها على المواد العضوية المولدة للنفط، وكذلك التعرف على وجود مؤشرات وجود خزانات نفطية كبرى، مثل وجود صخور مسامية ترتفع بها نسبة الكربونات، وتتحلل موادها بسرعة تحت تأثير عوامل التجوية الكيميائية من رطوبة وجفاف وتجوية عضوية بصفة خاصة. الجيولوجيا ـ إذاً من خلال مشاهدات الصخور والآبار، والجيوفيزياء بطرقها العديدة تقدم اليوم وسائل عملية لدراسة تكوين باطن الأرض وتركيبه، ومع ذلك لا تستطيع جميع الدراسات الجيولوجية والجيوفيزيائية والجيوكيميائية أن تحدد بدقة مواقع تجمعات النفط والغاز مهما كانت شمولية تلك الدراسات، إذ لابد من الحفر، فهو العامل الحاسم في استكشاف النفط، ويرتبط النجاح فيه بالتحديد الدقيق لمواقع الآبار، وتقدير العمق المحتمل لوجود النفط في الطبقة أو الطبقات، وكفاءة برمجة الحفر ونظم معلوماته، للتعرف على الطبقات تحت السطحية في أثنائه وتقدير السمك والعمق لكل منهما.

## • المسح الجيولوجي الطبقي

تم اكتشاف أول بئر للنفط في الولايات المتحدة الأمريكية في ولاية فرجينيا عام 1806م، وتم حفر أول بئر متكامل في مدينة تيتوس فيل Titusville بولاية بنسلفانيا، وتلى ذلك اكتشاف أول حقل بترولي بدون البدء بشواهد الرشح، وبالاعتماد على الدراسات الجيولوجية الميدانية في مقاطعة كوشينج في أوكلاهوما بالولايات المتحدة الأمريكية من خلال الحفر في طية محدبة. في أوائل القرن العشرين كانت مناطق التنقيب عن النفط هي التي تظهر فيها شواهد نفطية مثل البقع البتيومينية، وتسربات الغازات، وبعض الصخور الأسفلتية التي تكشفها

عوامل التعرية. ثم بدأ الاعتماد على أجهزة قياس المغناطيسية الأرضية لتحديد الاختلافات الصغيرة أو الطفيفة في المجالات المغناطيسية للتراكيب الصخرية حتى يمكن الاستدلال على بنية الطبقات ومعرفة نوعيات التراكيب الجيولوجية للصخور الرسوبية، وإنشاء خرائط خطوط الكنتور تحت السطحية، وتحديد مناطق الثنيات أو الطيات الصخرية المحدبة والمقعرة، وسمك بعض الطبقات الرسوبية فيها. وبتطور تكنولوجيات التنقيب عن النفط يجري حاليا قياس المغناطيسية الأرضية عن طريق المسح الجوي، الذي يتيح تغطية مساحات كبيرة، والوصول إلى مناطق صعبة طبوغرافيا، والتي لا يسهل استخدام طرق النقل الأخرى فيها.

يعتبر التصوير الطيفي بالأقمار الصناعية ومنها سلسلة لاند سات، التي أطلق أولها عام 1972م، من أحدث طرق المسح الجيولوجي (استخدمت صور أقمار لاند سات لحوض أناداركو Anadarco Basin الممتد بين ولايتي أوكلاهوما وتكساس لتحديد 59 حقلا نفطيا منتجاً، كما استخدمت صور لاندسات في خمسة حقول في العالم العربي هي حقل الغوار السعودي، وحقل البرقان الكويتي، وحقل بوزرغان العراقي، وحقل المسلة الليبي، وحقل البرمة التونسي.)، لدراسة ثروات الأرض المعدنية والنفطية، ويمكن بواسطتها تحديد مناطق تسرب النفط إلى السطح، وأماكن الصدوع والطيات واستراتيجرافية الإقليم. ويمكن تدقيق المعلومات المرجحة عن التراكيب الجيولوجية بواسطة أنظمة التصوير الراداري المحمولة بواسطة الأقمار الصناعية، والتي تعمل ليلاً ونهاراً ولاتتأثر بالسحب وتتيح تحديد الأحواض الرسوبية والاختيار السليم لمواقع المسح الجيوفيزيقي التالي للمسح الجيولوجي.

تتكامل أعمال التصوير والاستشعار عن بعد مع الدراسات الجيولوجية الميدانية على الأرض، ومع الاستعانة بالصور الجوية وتطوير الخرائط الجيولوجية

من حيث التراكيب ونوعيات الصخور وأعمارها المختلفة، والتضاريس واتجاهات ميول الطبقات، والطيات والفوالق. وترسم خرائط وقطاعات عرضية لامتداد الصخور الظاهرة على سطح الأرض وتحته، كما يتم تجميع العينات من مختلف الصخور لتحليلها، وبذلك تتهيأ قاعدة من المعلومات لاستكمال أعمال استكشاف النفط. وفي العمل الميداني يرصد الرشح النفطي الذي قد يتخذ شكل طبقة نفطية رقيقة فوق سطح عين أو بحيرة أو نهر، أو صورة تسربات بسيطة من الصخور المسامية السطحية المتشققة، كما قد يبدو في صورة بحيرة صغيرة من القار. وقد تخرج المواد الأسفلتية على شكل تجمعات لدنة وأغشية رقيقة فوق صخور سطح الأرض، مثل ما يوجد في إقليم بوريسلان غرب أوكرانيا Ukraine.

يشمل المسح الجيولوجي الطبقي الأولى استخدام مقياس الجاذبية الأرضية Gravimeter للتعرف على مواقع الصخور وكثافاتها، واستنتاج بعض المعلومات عن التراكيب الجيولوجية للمكامن والمصائد النفطية.

## • المسح الجيوفيزيائي

يعتبر المسح الجيوفيزيائي الأداة العملية لاستكمال المعلومات المفيدة وتدقيقها عن بنية الطبقات وتراكيب المكامن النفطية، وللحصول عليها في المناطق صعبة التضاريس كالمناطق البحرية، والصحاري، والصحاري الجليدية القطبية، ومناطق البراكين. وقد أوجدت الحاسبات الآلية قدرات أفضل في معالجة المعلومات الجيوفيزيائية، مثلما تطورت استخدامات الفضاء في الكشف عن الثروات النفطية والمعدنية. وتشمل الطرق الجيوفيزيائية الشائعة الاستخدام المسح السيزمي الذي يسمى أحيانا بالزلزالي، والجاذبية، والمغناطيسية، والطرق الكهربية، ثم الطرق الأقل استخداما وهي قياس الإشعاع والحرارة عند أو بالقرب من سطح الأرض أو في الجو. وإذا كانت الطرق السيزمية والجاذبية هي

أساسا أدوات للبحث عن النفط، فإن الطرق الكهربية تستخدم عادة للكشف عن المعادن، غير أن معظم العلماء الروسيين والفرنسيين يستخدمون الطرق الكهربية والمغناطيسية معاً في البحث عن النفط والمعادن.سيتم اعطاء مختصر كيفية الإستفادة من كل طريقة جيوفيزيقية في البحث عن النفط، إلا أنه سيتم تخصيص الفصل التالي لشرح تقنية الإستشعار عن بعد بشكل أوضح.

## الطريقة السيزمية

يعد المسح السيزمي آداة عملية لتحديد التكوين الجيولوجي تحت سطح الأرض، ويعتمد على تفجير شحنة صغيرة من المتفجرات قريبة من السطح، تنتج عنها صدمة آلية أو هزة أو موجة سيزمية، من نوع ريلي Rayleigh أو لف Love، وهذه الموجة تعود إلى السطح بعد انعكاسها من الأوجه الفاصلة بين الطبقات ذات الخواص الطبيعية المختلفة، وتسجل الانعكاسات بأجهزة حساسة سريعة الاستجابة لحركة الأرض Geophones & Detectors، توضع على أبعاد محددة من نقطة التفجير لتلقي الموجات الصوتية المنعكسة وقياس زمن ارتداد الموجة السيزمية. ومن المعروف أن سرعة الموجات الصوتية تعتمد على كثافة الصخور التي تمر بها. ويمكن حساب أعماق الطبقات وسمكها واستنتاج أنواعها بقياس أزمنة الانعكاس ومقارنتها، والتعرف على الظواهر التركيبية في الطبقات السفلى وبيئة الترسيب ومن ثم إنتاج خرائط تركيبية لأي مستوى جيولوجي يعطي انعكاسات للموجات الصوتية، وتحديد أماكن الطيات المحدبة والفوالق والقباب الملحية والشعب وخواصها. ويجري المسح السيزمي أيضاً في البحار باستبدال المتفجرات بشرارة كهربية ذات فولت عالي، قد يصل إلى عشرة آلاف فولت، تفرغ تحت الماء لإحداث نبض سمعي Acoustic Pulse على فترات قصيرة متتابعة لإجراء المسح السيزمي على أعماق بين 100 - 400 متر. ويمكن إجراء هذا المسح على أعماق كبيرة قد تصل إلى 2 - 2.5 كم

باستخدام قاذف صغير لخليط متفجر من غازي البروبان والأكسجين يشعل بشرارة كهربية. وطريقة الانعكاس السيزمي أنجح الطرق السيزمية المستخدمة في معرفة الطبقات القريبة من سطح الأرض، وتحديد الظواهر التركيبية التي يشتمل أنها مكامن نفطية، وبخاصة الطيات المحدبة والفوالق والقباب الملحية وبعض البنيات الاختراقية الأخرى.

أما طريقة الانكسار السيزمي فتتيح تسجيل الإشارات السيزمية على مسافات كبيرة من نقطة التفجير، والحصول على معلومات عن السرعات والأعماق الخاصة بالطبقات تحت سطحية التي تنتقل خلالها، ولقد استخدمت في الماضي في تحديد جوانب قباب الملح قبيل استخدام الطريقة الانعكاسية. ومع أن طريقة الانكسار لاتعطي معلومات دقيقة عن التراكيب الصخرية، وهي أقل استخداما في استكشاف النفط حاليا، إلا أنها مصدر جيد للمعلومات عن سرعة انتشار الموجات في طبقات الانكسارالسيزمي، وبالتالي التحديد التقريبي لمواقع وأعماق طبقات صخرية أو تكوينات جيولوجية معينة. ومن المعروف أن سرعة انتشار الموجات السيزمية تبلغ نحو 5500 قدم/ ثانية في الرواسب الفتاتية، وترتفع إلى أكثر من 23000 قدم/ ثانية في بعض الصخور النارية، وبذلك يسهل تحديد عمق الحوض الرسوبي وشكله برسم خريطة صخور القاعدة التي تتراكم عليها الصخور الرسوبية.

## طريقة الجاذبية

تعتمد طريقة البحث بالجاذبية، في حدود الأميال الأولى القليلة من سطح الأرض، على قياس التغييرات الصغيرة في جذب الصخور للأجسام والكتل فوق سطحها، إذ تختلف قوى الجذب من مكان لآخر طبقا لاختلاف كثافات الصخور تحت سطح الأرض، لأن الجاذبية تتناسب طرديا مع الكتل الجاذبة، وعكسيا مع مربع المسافة إليها. وإذا كانت الطبقات الأعلى كثافة مقوسة إلى أعلى في تركيب

مرتفع مثل الطية المحدبة فإن مجال الجاذبية الأرضية يكون فوق محور الطية أكبر منه على طول أجنابها، كما أن القبة الملحية، الأقل كثافة من الصخور التي اخترقتها، يمكن إكتشافها من القيمة الصغيرة للجاذبية المقاسة فوقها بالمقارنة بقيمة الجاذبية على أي من الجانبين. ولابد لقياس التغير الطفيف في قيمة الجاذبية من مكان لآخر من أجهزة ذات حساسية عالية، لدرجة أنها تسجل التغيرات في الجاذبية لجزء في المليون من عجلة الجاذبية الأرضية، وتسمى الجرافيمترات Gravimeters، وهي أداة رسم خريطة تغيرات الجاذبية في منطقة البحث عن النفط التي يمكن من خلالها ترجيح وجود تراكيب جيولوجية معينة مثل الفوالق والطيات، أو تداخل صخور القاعدة ذات الكثافة العالية في صخور رسوبية ذات كثافة أقل. وبصفة عامة يستفاد من طريقة الجاذبية في تحديد الأحواض الرسوبية، وامتدادها وسمكها، باعتبار أن كثافة صخور القاعدة أعلى من كثافة الطبقات المترسبة فوقها، وكذا في تحديد أماكن القباب الملحية، وشعاب الحجر الجيري Limestone Reefs، والطيات المحدبة ثم في تعيين الحدود الفاصلة بين الكتل الصخرية ذات الكثافات المختلفة. ومع ذلك يجب أن نسلم بأن الصخور الخازنة ليست متجانسة في خواصها مما يقتضي استخدام طرق أخرى للمسح الجيوفيزيائي لتكوين صورة متكاملة ودقيقة للخزان النفطي من خلال استكمال بالمسح السيزمي والحفر الاستكشافي. وقد استخدمت طريقة الجاذبية في تحديد أماكن القباب الملحية في ساحل خليج المكسيك بالولايات المتحدة الأمريكية، وفي الكشف عن التراكيب المحدبة في وسط القارة الأمريكية التي تعد مكامن محتملة للسوائل الهيدروكربونية.

## الطريقة المغناطيسية

يستخدم المسح المغناطيسي لقياس التغير في شدة المجال المغناطيسي للأرض من مكان لآخر بسبب اختلاف التراكيب الجيولوجية والتغيرات الطبوغرافية لأسطح صخور القاعدة والتأثيرية المغناطيسية Magnetic Susceptibility لهذه

الصخور، أو الصخور النارية أو المتحولة التي تحتوي في العادة على نسب أعلى من معدن المجنتيت Magnetite ذي الخواص المغناطيسية، أو الصخور القريبة من سطح الأرض. وتستخدم المغناطومترات Magnetometers في المسح المغناطيسي على الأرض، ومن الطائرة أو السفن وبخاصة لتحديد سمك الطبقات الرسوبية الخازنة للنفط أو المعادن المغناطيسية. وحديثاً تستخدم الأقمار الصناعية في رسم الخرائط الكنتورية للتغيرات في شدة المجال المغناطيسي لتحديد التراكيب الجيولوجية في مناطق المسح المغناطيسي، وبخاصة أماكن الطيات والصدوع في القشرة الأرضية المرجح وجود تجمعات النفط بها، وحساب أعماق صخور القاعدة بما يساعد في تقدير سمك وامتداد الطبقات الرسوبية وامتدادها، وكذا التعرف على تداخلات الصخور النارية بين هذه الطبقات الرسوبية. وقد ساعدت الطريقة المغناطيسية على اكتشاف حقول نفطية عديدة في المملكة العربية السعودية، ومنها حقول الحوطة والدلم عام 1989م، والرغيب والنعيم والحلوة والهزمية والغينة في المنطقة الوسطى عام 1990م، ثم حقل مدين على الساحل الشمالي للبحر الأحمر عام 1993م.

## الطريقة الكهربائية

تعتمد هذه الطريقة على اختلاف قياسات المقاومة النوعية الكهربية بين شتى أنواع الصخور، وبخاصة بين الملح والرسوبيات، ويسهل باستخدامها تحديد عمق صخور القاعدة بفضل ارتفاع قيم المقاومة النوعية لها. وإذا كانت التباينات في الخواص الكهربية للصخور الرسوبية محدودة، فإن الصخور الجيرية الكتلية والأنهيدريت تتميز بمقاوماتها النوعية العالية. كذلك تستخدم طريقة الجهد الذاتي لإجراء قياسات على السطح بالميللي فولت للجهود الكهروكيميائية الناشئة في الأرض بالتفاعل الكيميائي الكهربي بين بعض المعادن والمحاليل ذات الخصائص الكهربية المتلامسة معها.

## • الدراســـات الجيوكيميائيـــة

تتـم هـذه الدراسـات في الطريقـة المباشـرة للبحـث عـن النفـط أثنـاء مرحلـة الحفـر الأولـى ولا سـيما إذا وجـدت شـواهد نفطيـة علـى سـطح الأرض، نتيجـة هجـرة بعـض الهيدروكربونـات مـن مكمـن للنفـط أو الغـاز الطبيعـي تحـت ضغـط مرتفـع نسـبيا وتحركهـا إلـى السـطح. وتهـدف الدراسـات الجيوكيميائيـة إلـى تحديـد الطبقـات القـادرة علـى توليـد النفـط والصخـور الخازنـة للنفـط وتحديـد أنـواع الهيدروكربونـات الموجـودة مـن نفـط أو غـاز أو مكثفـات. وتبـدأ الدراسـات الجيوكيميائيـة بالدراسـات السـطحية التـي تشـمل قيـاس كميـة الغـازات الممتصـة علـى حبيبـات التربـة أو حبيبـات الصخـور تحـت السـطحية القريبـة مـن سـطح الأرض، وقيـاس الاشـعاع الصـادر مـن التربـة Fluorescence، ومحاولـة تحديـد أنـواع البكتريـا التـي تعيـش وتنمـو مـع مختلـف أنـواع الهيدروكربونـات، وإجـراء المسـح الإشـعاعي لتتبـع هجـرة الهيدروكربونـات. وتتعـدد الدراسـات تحـت السـطحية، وتبـدأ بتحديـد كميـة الكربـون العضـوي في الصخـور والتـي تتـراوح بـين 2 %، 10 % في الصخـور المولـدة لحقـول النفـط العملاقـة، والتحليـل الغازي لسـائل الحفـر وفتاتـه (Mud Logging) كمـا تشـمل تحديـد السـحنة الحراريـة، حيـث لـون الكيروجـين في الطفـل الصفحـي يتغيـر مـن الأصفـر إلـى البنـي البرتقالـي ثـم الأسـود مـع زيـادة درجـة الحـرارة، وهـذا التغيـر اللونـي يعتبـر مـن دلائـل وجـود النفـط والغاز. وتسـاعد الدراسـات الجيوكيميائيـة علـى تقييـم أحـواض الترسـيب، وترجيـح احتمـالات تواجـد تجمعـات النفـط والغـاز التـي أسـفرت عنهـا طـرق المسـح الجيوفيزيائـي، وتقديـر أعمـاق الصخـور المولـدة والخازنـة والحابسـة، ونوعيـات المصائـد النفطيـة، وهـي تخـدم مباشـرة اختيـار أماكـن الحفـر.

## • الحفر الاستكشافي

يلي الحفر الإستكشافي المسح الجيوفيزيائي والدراسات الجيوكيميائية التي تقود إلى تحديد أنسب الأماكن التي يرجح أن تكون حقولا منتجة، ويبدأ بحفر أولي الآبار الاستطلاعية التي تسمى بئر القطة البرية Wild Cat Well، طبقا لتقدير علمي دقيق لموقع الحفر والأعماق المطلوب الوصول إليها، وأنواع الأجهزة التي تستخدم في تجويف البئر، ثم تسجل النتائج في وثيقة التسجيل البئري Well Logging، والتي تشمل تحديد أنواع وسمك الطبقات وسمكها، وتقدير أعمار الصخور طبقا للحفريات الموجودة في كل طبقة إلى جانب قياسات المقاومة الكهربية والنشاط الإشعاعي وانتشار الموجات الصوتية، والكثافة، وتستكمل بالصفات الطبيعية مثل المسامية والنفاذية، والخصائص الكيميائية. وتتم متابعة تحليل العينات الجوفية خلال حفر البئر الاستكشافي بهدف معرفة وتحديد تتابع الطبقات للصخور الرسوبية في الحقول النفطية المنتظرة. وعادة تحفر البئر الاستكشافية الأولى على قمة التركيب الجيولوجي المراد استكشافه، أو على الموقع المقدر نظريا أن يحقق أكبر إنتاج ممكن. ويراعى ما أمكن ذلك أن يكون تجويف البئر رأسيا، واختبار زاوية ميله كلما تعمق الحفر لإجراء التصحيحات المطلوبة عند الضرورة. ومع أن حفر البئر الأولي يعطي الدليل على وجود النفط، وتركيب المكمن النفطي، وأعماق الطبقات الحاوية للزيت من سطح الأرض وخواصها، إلا أن تحديد الحقل النفطي وحساب كميات النفط المنتظر إنتاجها وتقدير الاحتياطي المرجح من النفط في الحقل يتطلب حفر آبار استكشافية أخرى حول البئر الأولي. ويجري في حالات عديدة حفر «الآبار القاعية» العميقة في الأماكن الملائمة لتجمع الزيت أو الغاز لدراسة التركيب الجيولوجي والظروف الهيدرولوجية لتكوين الطبقات الرسوبية، وكذا «الآبار البارامترية» لتدقيق المعلومات عن التراكيب الجيولوجية للصخور في منطقة البحوث الاستكشافية.

## تسـجيلات الآبـار

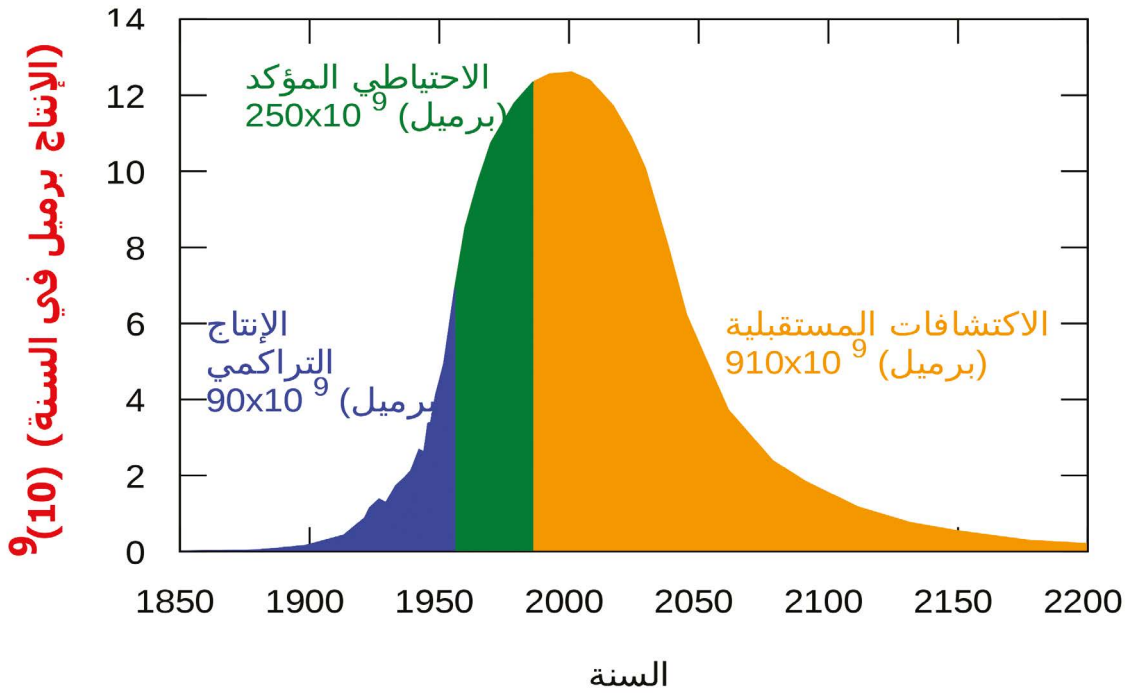
هي طريقة واسعة الاستخدام قبل حفر آبار النفط وفي أثناء الحفر وبعده، لتحديد الخواص البتروفيزيائية المختلفة للطبقات تحت سطح الأرض، من خلال إنزال أجهزة قياس متنوعة في الآبار لتحديد المقاومة النوعية الكهربية، والجهد الذاتي، والسرعة الصوتية، والكثافة، والخواص المغناطيسية، وإطلاق أشعة وفوتونات جاما الطبيعية، أو توليد أشعة جاما استجابة لقذف النيوترونات. والتسجيلات الكهربية تتيح قياس المقاومة النوعية للصخور، ورسم الحدود بين الطبقات، وتحديد مناطق تدفق السوائل ودراسة المياه الجوفية وتحديد ملوحتها، وبذلك يسهل تعيين الطبقات المنفذة للسوائل والأسطح والحواف التي تحدها. والطرق الكهرومغناطيسية تكشف اختلاف الخواص التأثيرية للصخور تحت سطح الأرض. وقد استخدمت طرق المقاومة النوعية والكهرومغناطيسية الأرضية في روسيا لإعداد خرائط الطبقات الرسوبية في مراحل الاستكشاف النفطي المبكرة، وفي فرنسا استخدمت الطرق الكهربية في البحث عن المعادن الصلبة، وتتبع الطاقة الحرارية الأرضية، أما تسجيل النشاط الإشعاعي الطبيعي للصخور فيجري باستخدام أجهزة كشف إشعاعي متنوعة أيضا في الآبار. كذلك يستخدم مصدر لإشعاع النيوترونات، مثل خليط من البريليوم والراديوم، ويستقبل الإشعاع المنطلق من الصخور وقياس درجة امتصاص النيوترونات بواسطة أيونات الهيدروجين الموجودة في النفط أو الماء أو الغاز. وتفيد دراسة النشاط الإشعاعي للصخور في تعرف التراكيب الصخرية، ومدى احتوائها على سوائل وأنواع تلك السوائل ووجود الغازات الطبيعية ومسامية الصخور، كما تستخدم أشعة جاما في الكشف عن الطفلة الحجرية الزيتية Oil Shales. كذلك فإن المسح الإشعاعي من أفضل طرق تعيين وتقييم رواسب المعادن المشعة تحت سطح الأرض، سواء التي تحتوي على اليورانيوم أو الثوريوم. كما تجري تسجيلات الانتشار الصوتي لقياس سرعة سريان الموجات الصوتية في كل طبقة من الطبقات الصخرية على حدة، وتحديد الاختلاف بينها في المقاومة الصوتية Acoustic Impedance ، مما يساعد في معرفة مسامية الصخور تحت السطحية.

# ذروة عصر النفط

ذروة النفط Oil Peak هي النقطة الزمنية التي يجري فيها الوصول إلى الحد الأقصى لمعدل استخراج النفط، وبعد ذلك من المتوقع أن يدخل معدل الإنتاج في الانخفاض النهائي. يعتقد الكثيرون أننا وصلنا إلى الذروة أو اقتربنا منها، الأمر الذي وضعنا في النصف الثاني من عصر النفط. بعض التقديرات، بافتراض معدلات الاستهلاك الحالية، ستستمر احتياطيات النفط الحالية حتى عام 2040م على الأقل. في عام 2004م، قدرت منظمة أوبك، مع استثمارات كبيرة، أنها ستضاعف إنتاج النفط تقريباً بحلول عام 2025م.

في الواقع يتبع كل إنتاج النفط منحنى جرسي، سواء في حقل فردي أو على الكوكب ككل. عند منحدر المنحني، تكون تكاليف الإنتاج أقل بكثير من تكلفة المنحدر عندما يتطلب الأمر جهداً إضافياً (نفقات) لاستخراج النفط من الخزانات التي يتم تفريغها. ببساطة: النفط وفير ورخيص من جهة، نادر ومكلف من جهة أخرى. تتزامن ذروة المنحني مع النقطة التي استنفد فيها النفط العالمي 50 %. «ذروة النفط» هو المصطلح الصناعي لأعلى المنحنى. بمجرد تجاوز الذروة، يبدأ إنتاج النفط في الانخفاض بينما تبدأ التكلفة في الارتفاع. من الناحية العملية والمبالغة في التبسيط إلى حد كبير، هذا يعني أنه إذا كان عام 2000م هو عام ذروة النفط، فإن إنتاج النفط في جميع أنحاء العالم في عام 2020م سيكون هو نفسه كما كان في عام 1980م.

ومع ذلك، كان عدد سكان العالم في عام 2020م أكبر بكثير (مرتين تقريباً) وأكثر تصنيعاً بكثير مما كان عليه في عام 1980م. ومن ثم، فإن الطلب العالمي على النفط سيتجاوز الإنتاج العالمي للنفط بهامش كبير. كلما زاد الطلب على النفط عن إنتاج النفط، ارتفع السعر في النهاية، السؤال ليس «متى سينفد النفط لدينا؟» بل بالأحرى، «متى سينفد النفط الرخيص؟»



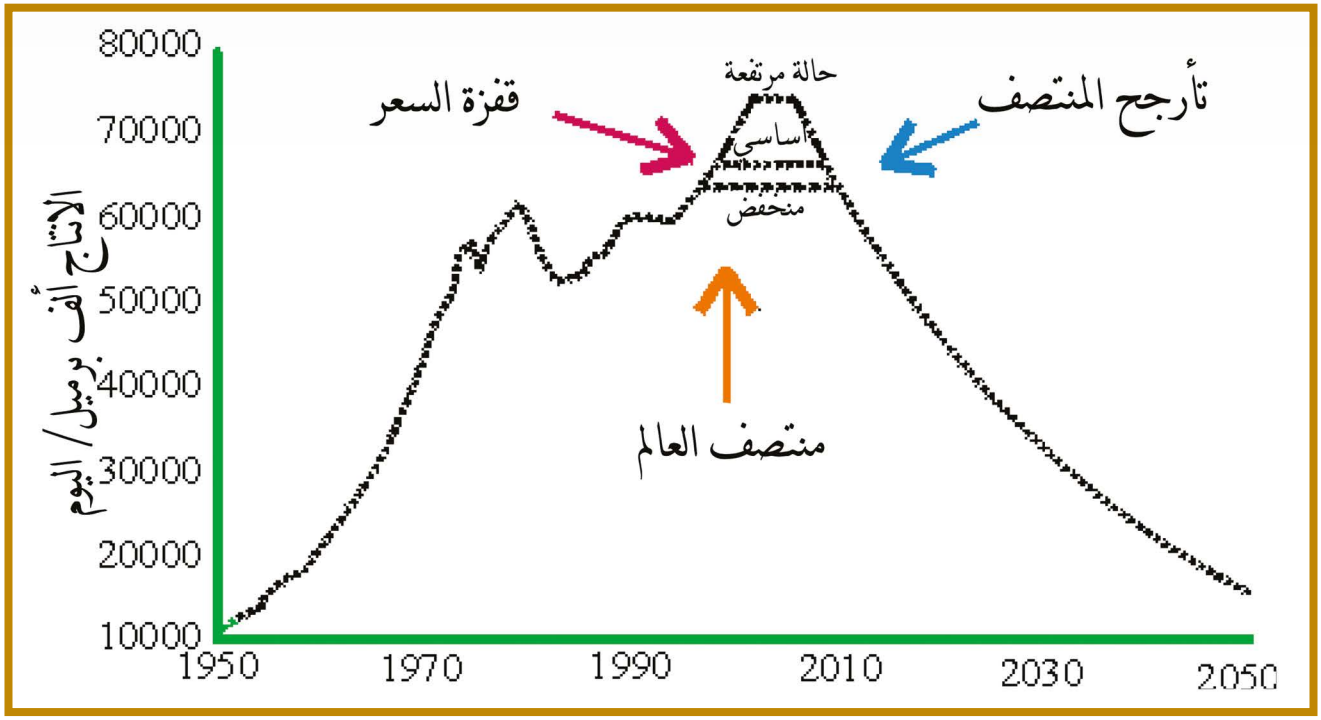

**توزيع إنتاج النفط العالمي لعام 1956، والذي يُظهر البيانات التاريخية والإنتاج المستقبلي، اقترحه إم كينغ هوبرت، بلغت ذروة إنتاجه 12.5 بليون برميل سنوياً في نحو عام 2000. اعتباراً من عام 2016، كان إنتاج العالم من النفط 29.4 بليون برميل لكل عام (80.6 طن / يوم)، مع تخمة نفطية بين عامي 2014 و2018.**

في حين أن الاستخدام المحلي للنفط يعود إلى قرون عديدة، فإن صناعة النفط حديثة المنشأ. وضعها الحالي كمكون رئيسي في السياسة والمجتمع والتكنولوجيا له جذوره في صناعة الكيروسين في أواخر القرن التاسع عشر. كان استخدام محرك الاحتراق الداخلي للسيارات والشاحنات بعد عام 1900م عاملاً حاسماً في النمو الهائل للصناعة في الولايات المتحدة وروسيا والشرق الأوسط. عندما حل وقود الديزل محل المحركات البخارية في السفن الحربية، صار التحكم في

إمدادات النفط عاملاً في الاستراتيجية العسكرية وأدى دوراً رئيسياً في الحرب العالمية الثانية. في القرن العشرين، أدت قضايا تلوث الهواء إلى تنظيم حكومي. في أوائل القرن الحادي والعشرين، جعلت القضايا البيئية المتعلقة بالاحترار العالمي من النفط والغاز (بالإضافة إلى الفحم) صناعة مثيرة للجدل سياسياً. طبعاً ليس من الصعب فهم مفهوم (ذروة النفط). يمكن تعريف ذروة النفط على أنها «النقطة الحرجة التي لا تستطيع عندها الخزانات إنتاج كميات متزايدة من النفط ... «ذروة النفط» هي النقطة التي نصل عندها إلى الحد الأقصى من الإنتاج؛ بعد ذلك، بغض النظر عن عدد الآبار التي يجري حفرها في بلدٍ ما، يبدأ الإنتاج في الانخفاض». في سياق هذا التحليل، تشير ذروة النفط إلى إنتاج النفط العالمي. لا ينبغي الخلط بين ذروة النفط والنقطة التي استنفد فيها العالم احتياطياته النفطية. بدلاً من ذلك، تكون ذروة النفط عندما يكون العالم في ذروة الإنتاج، عندما يتوفر المزيد من النفط أكثر من أي وقت في التاريخ.

لقد بلغ إنتاج النفط في 60 دولة ذروته بالفعل، وبلغت ذروته في 10 دول من أصل 20 دولة تنتج نحو 85 % من نفط العالم. عندما يبلغ إنتاج النفط العالمي ذروته، أو يصل إلى ذروته، أو سيصل إلى ذروته، فقد أثار جدلاً كبيراً بين الوكالات الحكومية والعلماء والمطلعين على الصناعة وخبراء الطاقة. وتشير أكثر التقديرات تفاؤلاً إلى حد كبير إلى أن الفترة 2020-2035م ستكون العام الذي يبلغ فيه إنتاج النفط ذروته في جميع أنحاء العالم. بشكل عام، تأتي هذه التقديرات من وكالات حكومية مثل هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية أو شركات النفط أو الاقتصاديين الذين لا يفهمون ديناميكيات استنفاد الموارد. حتى لو كان المتفائلون على صواب، فإننا سنقوم بكشط قاع برميل النفط خلال عمر معظم أولئك الذين هم في منتصف العمر اليوم.

كان هناك تقدير أكثر واقعية بين الأعوام 2004-2010م. للأسف، لم نعرف أننا وصلنا إلى الذروة إلا بعد مرور 3-4 سنوات على الحقيقة. حتى عند منحدر المنحنى، يختلف إنتاج النفط قليلاً من سنة إلى أخرى. من المحتمل أن يكون إنتاج النفط في جميع أنحاء العالم قد بلغ ذروته في عام 2000م حيث انخفض الإنتاج كل عام منذ ذلك الحين. لقد اعترفت صناعة الطاقة بهدوء بخطورة الوضع. على سبيل المثال، في مقال نُشر مؤخراً على الصفحة الرئيسية لشركة Exxon-Mobil Exploration، صرح رئيس الشركة جون طومسون: «في عام 2015م، سنحتاج إلى إيجاد وتطوير وإنتاج كمية جديدة من النفط والغاز تساوي ثمانية من كل 10 براميل تنتج اليوم. بالإضافة إلى ذلك، من المتوقع أن تكون التكلفة المرتبطة بتوفير هذا النفط والغاز الإضافي أكثر بكثير مما تنفقه الصناعة حالياً. الأمر المروع بالقدر نفسه هو حقيقة أن العديد من الآفاق الواعدة بعيدة كل البعد عن الأسواق الرئيسية، بعضها في مناطق تفتقر حتى إلى البنية التحتية الأساسية. البعض الآخر في المناخات القاسية، مثل القطب الشمالي، التي تمثل تحديات تقنية غير عادية».



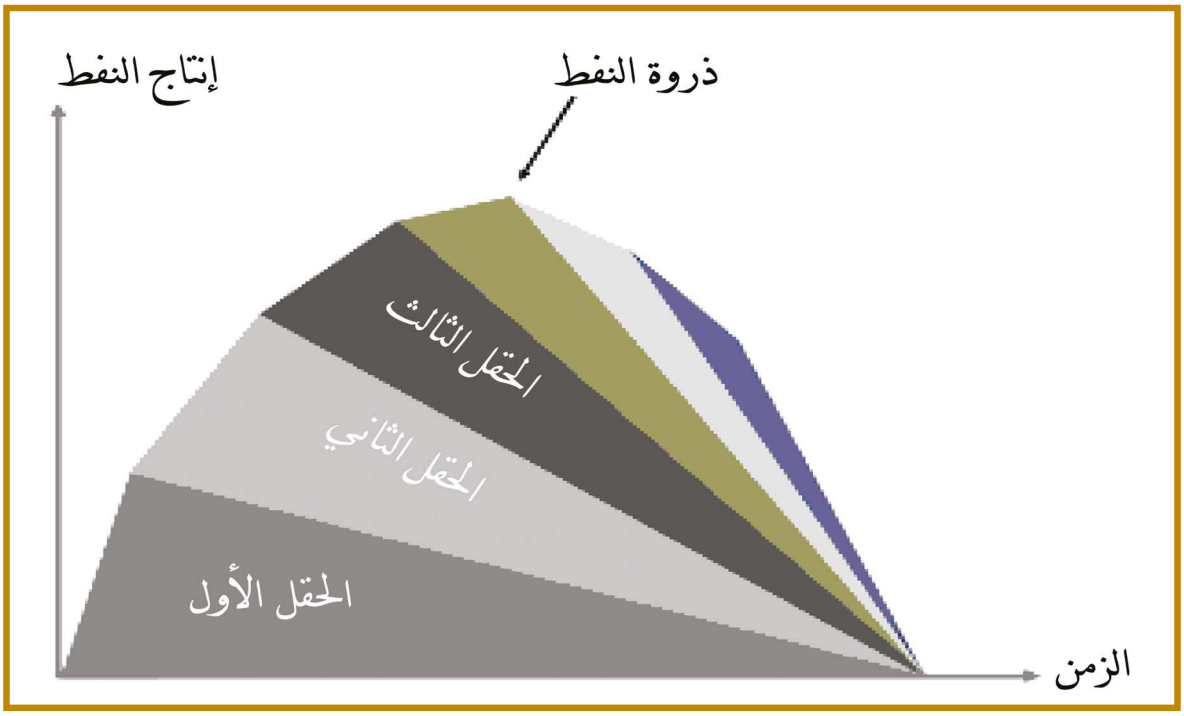

إنتاج النفط العالمي بين عامي 1950-2050.

## • ذروة هـــوبـــرت

كان الدكتور إم كينغ هوبرت عالم جيوفيزيائي أمريكي يعمل في مختبر أبحاث شل في هيوستن عندما أدرك أن إنتاج النفط يميل إلى اتباع منحنى على شكل جرس. باستخدام تقدير للنفط القابل للاستخراج في نهاية المطاف في الولايات المتحدة، توقع في عام 1956م أن إنتاج النفط الأمريكي سيبلغ ذروته نحو عام 1970م.

في البداية سخر العلماء من توقعات هوبرت، ولكن عندما صار واضحاً أن تحليله والتنبؤ المقابل كان صحيحاً، صارت منهجيته فيما بعد معياراً مهماً لتشكيل منحنيات إنتاج النفط. إن افتراضات ذروة النفط للدكتور هوبرت

بسيطة. يقدم مركز تحليل نضوب النفط ملخصاً موجزاً لهذه الافتراضات: تظهر تجربة التشغيل من عشرات الآلاف من حقول النفط أن معدل الإنتاج يرتفع دائماً إلى الذروة ثم يبدأ في الانخفاض عندما يستخرج نحو نصف النفط القابل للاستخراج. نظراً لأن إجمالي ثروات العالم من النفط محدودة وغير قابلة للتجديد، في الوقت المناسب، حيث تصير الاكتشافات الجديدة غير كافية لتعويض النضوب الطبيعي للاحتياطيات الحالية، سيصل إجمالي الإنتاج إلى أقصى حد له ويبدأ في الانخفاض. ويبدو نمط الإنتاج هذا موضحاً في الرسم البياني الآتي:




نمط الإنتاج النموذجي في منطقة نفطية

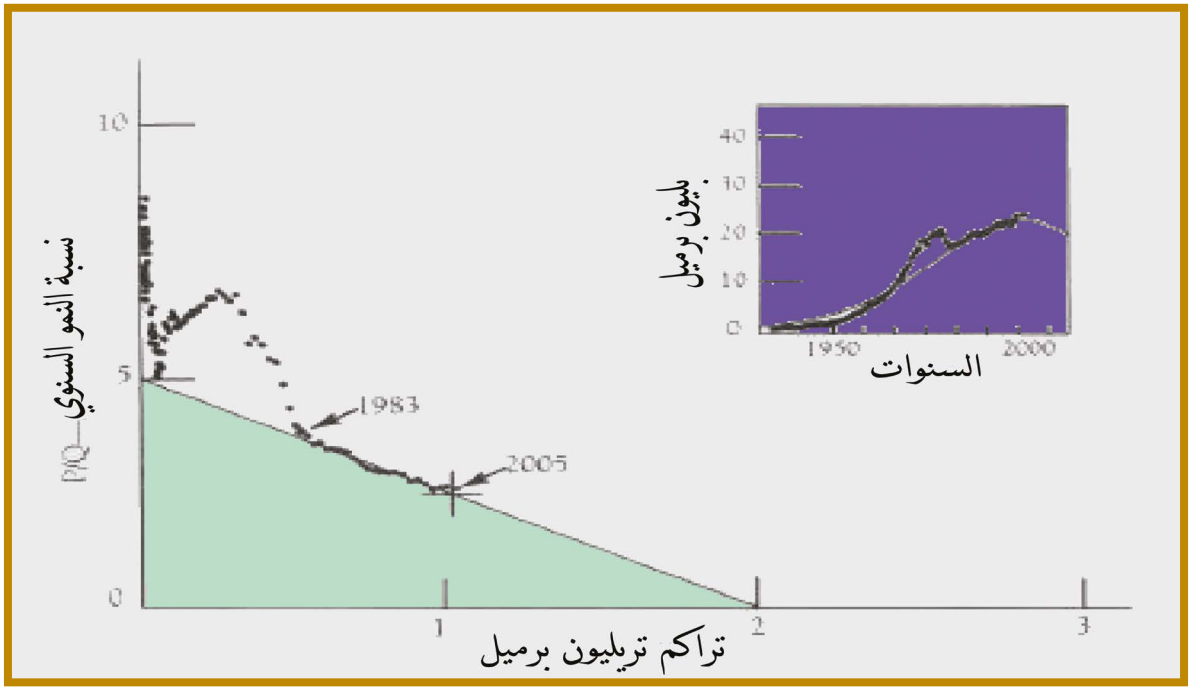
قام الدكتور كينيث ديفيس Deffeyes، الجيولوجي والمستشار السابق للنفط والتعدين والذي عمل في وقت ما مع الدكتور هوبرت، بتحليل منهجية هوبرت. وجد أوجه تشابه مذهلة بين معادلات هوبرت وتلك المستخدمة في النماذج

البيولوجية. والمثال على نموذج بيولوجي بسيط هو نمو الحشائش في قطعة أرض مهجورة. في البداية تكون الحشائش متباعدة وتتضاعف أضعافا مضاعفة. يعتمد معدل توسعها على المساحة الخالية المتبقية في الدفعة، ومع ذلك، فبمجرد أن تبدأ الحشائش في التنافس مع بعضها بعضاً على الموارد، فإن المعدل الذي تظهر به الحشائش الجديدة يتضاءل ثم يبدأ في الانخفاض بشكل كبير. في النهاية ستتوقف الأعشاب الضارة عن الانتشار وتصل إلى عدد ثابت عند النقطة التي يتم فيها الوصول إلى القدرة الاستيعابية للقطعة المهجورة. يمكن التفكير في ذروة النفط بمصطلحات مشابهة للنموذج البيولوجي في الاتجاه المعاكس. إجمالي النفط المتوقع استرداده يماثل العدد الثابت للأعشاب في القدرة الاستيعابية للمجموعة (باستثناء أنه يجب أن تنمو الأعشاب الضارة تحت الأرض). يجري اكتشاف حقول النفط الأكبر والأسهل لاستخراجها بسرعة ثم حفرها. يحدث ارتفاع كبير في الإنتاج في وقت مبكر وينضب النفط بوتيرة سريعة. ومع ذلك، عندما يصير العثور على النفط أكثر صعوبة ويصبح الاسترداد أكثر صعوبة، يصل معدل النضوب إلى نقطة الذروة ثم يبدأ في الانخفاض بشكل كبير. تقديرات وصول ذروة النفط. وجد الباحث كينيث ديفيس Deffeyes أن منحنياً لوجستياً بسيطاً يعتمد على المعادلة:

$$P = a\,(1-Q / Qt)\,Q$$

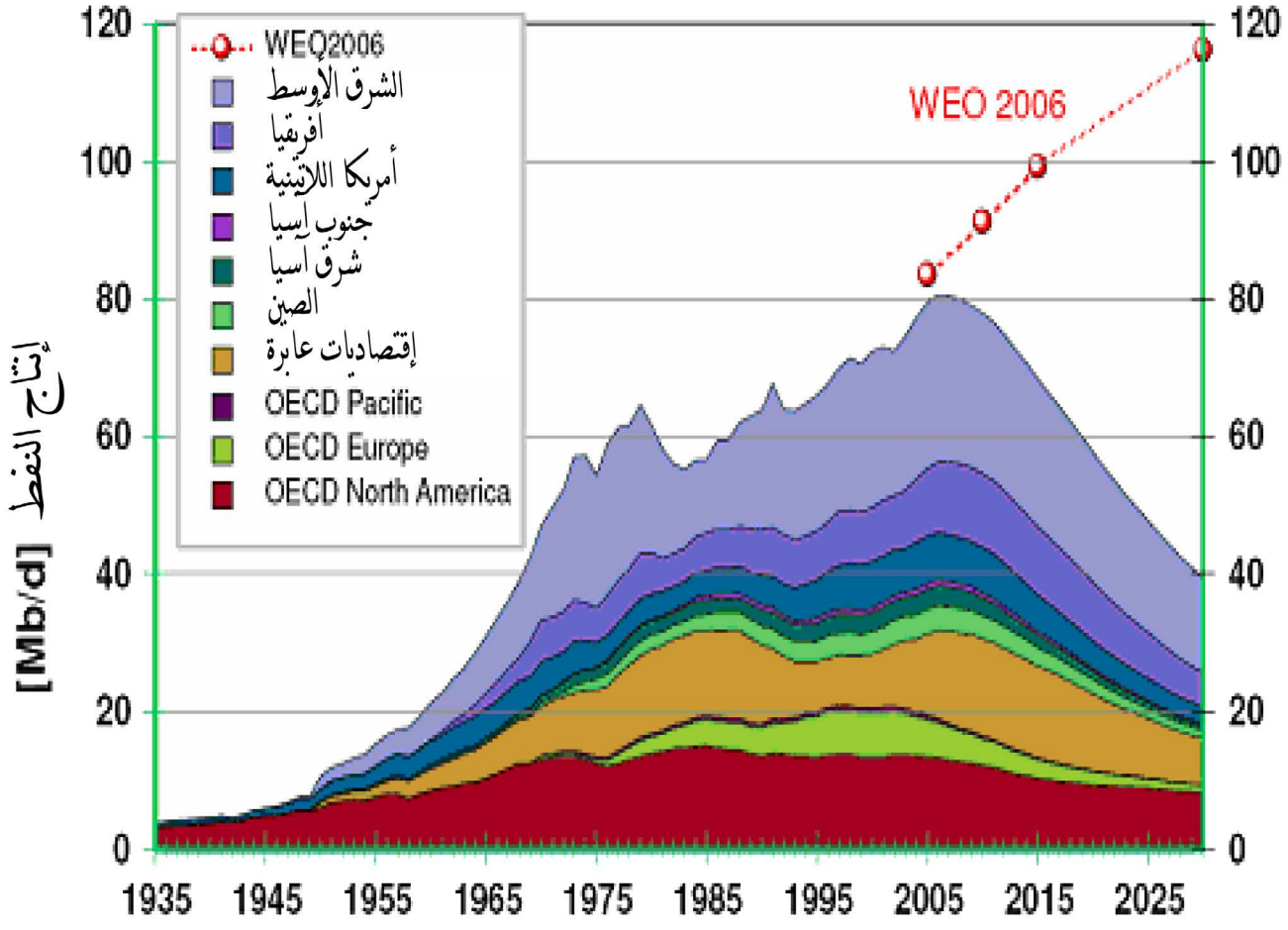
هو أفضل تطابق مع منهجية هوبرت للعثور على ذروة النفط. حيث تشير P إلى الإنتاج في سنة معينة، وQ هي الإنتاج التراكمي حتى تلك السنة المحددة، وتمثل a معدل إنتاج النفط السنوي معبراً عنه كجزء صغير من الإنتاج التراكمي، و Qt يساوي إجمالي كمية النفط المتوقع أن يكون مستخرج. أهم جزء في المعادلة هو الجزء الموجود بين القوسين (1-Q / Qt)، الذي يجعل المعادلة تعتمد على جزء النفط الكلي المتبقي للإنتاج. استخدم ديفيس هذه التقنية لطريقة هوبرت لتحديد ذروة إنتاج النفط في العالم. استخدم الانحدار الخطي الأنسب لتحديد

الإنتاج العالمي التراكمي النهائي البالغ 2 تريليون برميل، والذي يمنحه هو رقم أقل من تلك التي أبلغ عنها المتفائلون مثل هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية. ومع ذلك، فإن 2 تريليون برميل تقع في نطاق 10 % من تقديرات العديد من المحللين. رسم ديفيس رسماً بيانياً P / Q مقابل Q لإنتاج النفط العالمي ووصل إلى استنتاج مذهل: من المحتمل أن يكون إنتاج النفط العالمي قد بلغ ذروته في نهاية عام 2005م. يوضح الرسم البياني أدناه إنتاج النفط العالمي مع الذروة المشار إليها بوساطة الشعيرات المتقاطعة. الرسم البياني الداخلي هو البيانات المعروضة نفسها مثل الإنتاج مقابل الزمن ويظهر المنحنى على شكل جرس الذي يتطور عند رسم إنتاج النفط.




لقد أكملت مجموعة مراقبة الطاقة، وهي مجموعة ألمانية غير هادفة للربح من العلماء الأوروبيين وعدد قليل من البرلمانيين، نظرة شاملة على الوقت الذي من المحتمل أن يصل فيه إنتاج النفط العالمي إلى الذروة. أشارت نتائجهم إلى أن

ذروة النفط حدثت في عام 2006م، على غرار النتيجة التي توصل إليها ديفيس. واستند اعتقادهم بأن ذروة النفط قد حدثت بالفعل على افتراضات متشائمة فيما يتعلق بإمكانية الحفر في المياه العميقة والبحرية إلى جانب توقع حدوث انخفاضات أكثر أهمية في إنتاج النفط من الشرق الأوسط. يوضح الشكل الآتي أدناه توقعات إنتاج EWG، بما في ذلك السطر الذي يعرض توقعات وكالة الطاقة الدولية لعام 2006م.




إنتـــاج النفـــط العالمـــي

وجدت وكالة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA) أن تقديرات ذروة النفط هذه متشائمة جداً. لقد أجروا دراسة عام 2004م لسيناريوهات مختلفة لإمدادات النفط العالمية طويلة الأجل بناءً على تقديرات احتياطي هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية.

تستخدم دراسة (EIA) تقييم الأثر البيئي شكلين وظيفيين للتنبؤ بإنتاج النفط:

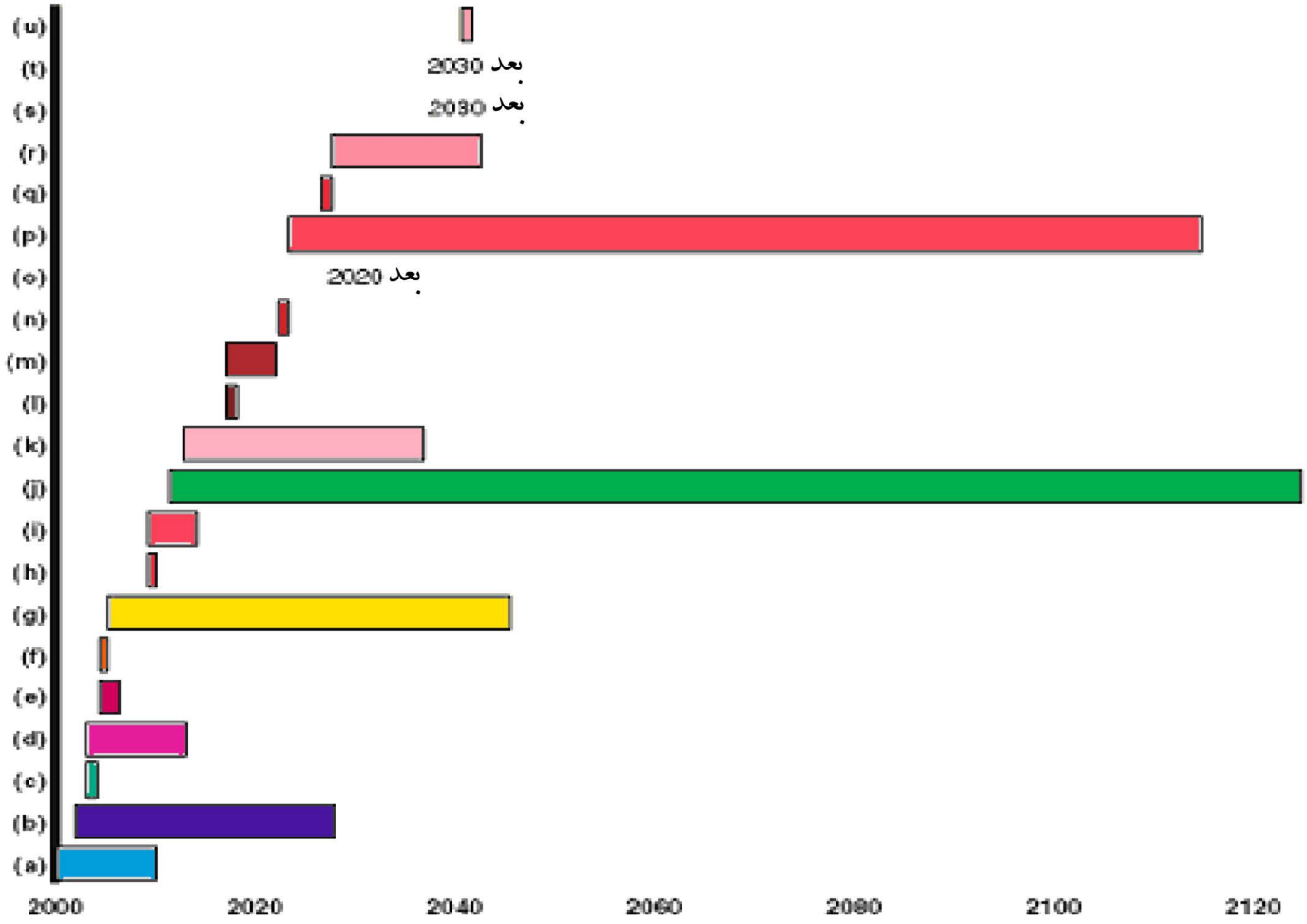
- **نسبة نمو ثابتة حتى ذروة الإنتاج.**
- **نسبة ثابتة للاحتياطيات إلى الإنتاج قدرها 10 % للانخفاض بعد الذروة.**

وقد اختارت (EIA) عدم استخدام المنحنى اللوجستي لأنها شعرت أن وظيفة واحدة لا يمكن أن تمثل بدقة الإنتاج العالمي.

أدت نتائج تحليلهم إلى أن وكالة معلومات الطاقة تقول إنهم لا يعتقدون أن ذروة النفط ستحدث في المستقبل القريب. ومع ذلك، أوضح تقييم الأثر البيئي اعتقاده أن الاستعدادات لذروة النفط يجب أن تبدأ حالياً: «بالنظر إلى الفترات الزمنية الطويلة المطلوبة لاختراق كبير لتقنيات الطاقة الجديدة في السوق الشامل، فإن هذه النتيجة لا تبرر بأي حال من الأحوال الرضا عن جانب العرض، والبحث والتطوير في جانب الطلب».

نظر مكتب المحاسبة الحكومية في الولايات المتحدة في العديد من دراسات ذروة النفط الرئيسية في تقريره «عدم اليقين بشأن إمدادات النفط المستقبلية يجعل من المهم تطوير استراتيجية لمعالجة الذروة والانخفاض في إنتاج النفط». كما وجد هذا المكتب أن معظم الدراسات أشارت إلى أن إنتاج النفط العالمي قد بلغ ذروته بالفعل أو أنه سيبلغ ذروته في وقت ما بين الوقت الحالي وعام 2040م.

في ضوء هذه التقديرات، توصلوا إلى استنتاج مفاده أن التحضير لذروة النفط كان ضرورياً ويجب أن يبدأ على الفور. يجري تضمين الشكل الآتي أدناه تمثيل مرئي لتقديرات ذروة النفط التي راجعها مكتب المحاسبة الحكومية.




توقعـــات الوصـــول إلى ذروة النفـــط

## التحديات التي تواجه الطاقة الغير متجددة

التأثير الأكثر وضوحاً لذروة النفط هو سعر برميل النفط الخام. يتحدد سعر السلعة من خلال ندرتها النسبية. عندما يتجاوز الطلب على النفط المعروض المتاح، كما هو الحال حالياً، يرتفع سعر النفط. إن السعر الحقيقي للنفط حالياً أعلى من أي وقت مضى. وجد تقرير لوكالة الطاقة الدولية (IEA) حول تأثير ارتفاع أسعار النفط أن ارتفاع أسعار النفط من المرجح أن يتسبب في تراجع نمو الناتج المحلي الإجمالي في جميع أنحاء العالم، وارتفاع مستويات البطالة، ومشكلات عجز الميزانية في البلدان المستوردة للنفط، وضغوط التضخم المزعزعة للاستقرار في البلدان النامية. وهي البلدان التي تعاني من تداعيات هذه الآثار. ستؤدي ذروة النفط إلى تفاقم هذه المشكلات (أو تساهم حالياً في حدوثها)، وسيكون لها أيضاً العديد من التأثيرات الأخرى الواسعة الانتشار.

### • الأسعار العالمية

عندما ترتفع أسعار النفط الخام، ستتأثر أسعار السلع التي تستخدم البتروكيماويات كمادة وسيطة. نظراً لانتشار البتروكيماويات، فإن العديد من مصنعي السلع الاستهلاكية سيتعرضون لضغوط لرفع الأسعار استجابة لارتفاع التكاليف. شهد الأسفلت، وهو منتج ثانوي لتكرير النفط الخام، ارتفاعاً مزدوجاً في الأسعار مؤخراً. من المحتمل أن تتسبب ذروة النفط في استمرار ارتفاع الأسعار للعديد من السلع التي تنتج باستخدام البتروكيماويات.

كما ستتأثر أسعار المواد الغذائية سلباً بذروة النفط. كان المدخلان الزراعيان اللذان شهدا أكبر ارتفاع في الأسعار للمزارعين في العامين الماضيين هما الأسمدة

القائمة على النفط والديزل للمعدات الزراعية، مع معدلات زيادة تصل إلى 45 % و 37 % على التوالي.

تبقى تكاليف الطاقة المرتفعة هي العامل الأكبر الذي يدفع التغيرات في الصناعة الزراعية وستستمر في قيادة زيادات الأسعار في قطاع الأغذية. بالإضافة إلى ذلك، فإن الطلب العالمي النهم على النفط قد خلق بالفعل نعمة للوقود الاصطناعي مثل الإيثانول، وستصير المنافسة بين الغذاء للاستهلاك والغذاء للوقود أكثر حدة خلال ذروة النفط ومن المرجح أن تؤدي إلى مزيد من الزيادات في أسعار المواد الغذائية. وجد العاملون في صندوق النقد الدولي (IMF) أن سياسة الوقود الحيوي في البلدان الصناعية كانت المحرك الرئيسي للزيادات الأخيرة في أسعار الغذاء العالمية. يتخصص المزيد من الأراضي الزراعية كل عام للغذاء من أجل الوقود، وسيكون الحافز للقيام بذلك أكبر في مواجهة احتياطيات النفط المتضائلة، مما يؤدي إلى تفاقم أزمة الغذاء العالمية الحالية.

## • النقل الحديث

ستؤدي ذروة النفط إلى زيادة تكلفة وقود النقل بسبب ارتفاع أسعار النفط الخام، مع أن أسعار الوقود ستبقى تختلف من بلد إلى آخر اعتماداً على الضرائب التي تفرضها الحكومات أو أي دعم للأسعار قد يكون ساري المفعول. أدى الارتفاع الحالي في أسعار الوقود في جميع أنحاء العالم إلى احتجاجات واسعة النطاق من قبل الجماعات الأكثر تضرراً، مثل سائقي الشاحنات المستقلين. بعض البلدان التي تشهد احتجاجات كبيرة على الوقود تشمل فرنسا والبرتغال وإسبانيا والهند وماليزيا ونيبال وكوريا الجنوبية وتايلاند. ستسهم ذروة النفط في زيادة الاضطرابات الأهلية في العديد من البلدان في جميع أنحاء العالم.

ستؤدي ذروة النفط إلى مزيد من الحفظ في قطاع النقل، وخاصة من قبل الأفراد. في الولايات المتحدة، أكبر مستخدم للوقود في العالم، أدى ارتفاع أسعار الوقود بالفعل إلى زيادة استخدام وسائل النقل العام. بلغ استخدام النقل الجماعي أعلى مستوى له منذ 50 عاماً. ومع ذلك، لم تكن الزيادة في عدد الركاب إيجابية تماماً؛ لقد دفع بعض أنظمة النقل العام إلى أقصى حدودها وأدى انخفاض استخدام الوقود إلى انخفاض عائدات ضريبة الوقود التي تستخدمها الحكومات للبنية التحتية. علامة أخرى على الحفظ بسبب ارتفاع أسعار الوقود في الولايات المتحدة كانت نهاية علاقة حب أمريكا لسيارة الدفع الرباعي. انخفضت مبيعات سيارات الدفع الرباعي بشكل كبير، واستمرت قيم إعادة بيع سيارات الدفع الرباعي في التدهور، ومبيعات السيارات الأصغر في ارتفاع. بالإضافة إلى التحول بعيداً عن سيارات الدفع الرباعي، يستفيد العديد من الأفراد في الولايات المتحدة من ترتيبات العمل المرنة مع أصحاب العمل مثل العمل عن بُعد، وقد بدأ البعض حتى في البحث عن وظائف أقرب إلى المنزل. سوف تتسارع هذه الاتجاهات خلال ذروة النفط.

ستتأثر العديد من الشركات بزيادة تكاليف النقل بسبب ذروة النفط. لقد تأثر صانعو السيارات الأمريكيون، مع اعتمادهم الكبير على مبيعات سيارات الدفع الرباعي، سلباً بالفعل بسبب ارتفاع أسعار الوقود ومن المحتمل أن يواجهوا المزيد من الآثار السلبية ما لم ينجحوا في تنويع مزيج منتجاتهم لتشمل المزيد من المركبات والهجينة ذات الكفاءة في استهلاك الوقود. ستتأثر شركات الطيران أيضاً بشكل خطير بذروة النفط. تشير التقديرات إلى أن كل دولار زيادة في النفط تؤدي إلى زيادة قدرها 465 مليون دولار في تكاليف النقل لصناعة الطيران في الولايات المتحدة. هناك صناعة أخرى أقل وضوحا تتأثر بذروة النفط وهي تجارة التجزئة.

## • الشؤون الدولية

كتب الدكتور مايكل كلير، أستاذ دراسات السلام والأمن العالمي في كلية هامبشاير، ثلاثة كتب عن الآثار الجيوسياسية للطاقة. يتوقع كلير اتجاهات مشؤومة للشؤون الدولية مع ندرة الموارد. ويستشهد بخمس قوى جيوسياسية رئيسية ستغير الوضع العالمي الحالي وستكون لكل من هذه القوى نتائج مهمة خلال ذروة النفط:

- سيؤدي استخدام الطاقة المتزايد من القوى الاقتصادية الناشئة مثل الصين إلى دفع التنافس الشديد على الموارد بين القوى الغربية الراسخة والقوى الصاعدة في العالم النامي. نظراً لأن الشركات الغربية كانت ناجحة جداً في عقد صفقات شراء الطاقة والموارد، ستشعر القوى الناشئة أنه ليس لديها خيار سوى تعزيز التوسع في شركات الطاقة المملوكة للدولة وعقد تحالفات استراتيجية.

- إمدادات الطاقة الأولية لن تكون كافية لتلبية المستويات المرتفعة من الطلب. ستكون العواقب نقصاً عالمياً واستمرار ارتفاع الأسعار، مما يسبب مشقة للأفراد في كل مكان وخاصة أولئك الذين يعيشون في العالم النامي.

- لن تتوفر بدائل الطاقة فوراً في الوقت المناسب لتجنب تعديل مؤلم بعيداً عن الوقود الأحفوري لأن مئات البلايين من الدولارات من الاستثمارات المطلوبة للقيام بذلك لن تُنفق. في عام 2004م، قدرت وزارة الطاقة الأمريكية (DOE) أن 86 % من الطاقة العالمية ستتوفر بوساطة الوقود الأحفوري. كانت توقعات وزارة الطاقة حتى عام 2030م تحوي على الوقود الأحفوري الذي يمثل الحصة نفسها من الطاقة العالمية. سيؤدي هذا الاعتماد على

الوقود الأحفوري إلى تعزيز الحفر والتعدين في المناطق الحساسة بيئياً، وجعل أهداف الحد من ثاني أكسيد الكربون لتجنب تغير المناخ صعبة التحقيق، وقد يجعل من الضروري توسيع الاستكشاف والإنتاج في المناطق غير المستقرة سياسياً في العالم.

- ستعاني الدول المستوردة للطاقة مثل الولايات المتحدة ودول أوروبا من فقدان القوة والثروة التي ستنقلها إلى الدول المصدرة للطاقة مثل المملكة العربية السعودية وإيران وفنزويلا وروسيا. الدليل على هذا الاتجاه واضح بالفعل. المملكة العربية السعودية تتنعم بأموال النفط ولله الحمد، وعادت روسيا إلى الظهور كقوة قوية في العلاقات الدولية بسبب احتياطياتها الهائلة من الطاقة، وتستخدم فنزويلا جزءاً من عائداتها النفطية كأداة جيوسياسية، وتمكنت إيران من مواصلة تخصيب اليورانيوم رغم العقوبات الغربية.

- ستزداد بلا شك إمكانية انتهاج سياسة خارجية عدوانية. من أجل الحصول على صفقات أفضل في مجال الطاقة، زادت القوى الكبرى مثل الولايات المتحدة والصين وروسيا صفقات الأسلحة إلى الدول المنتجة للنفط، مما زاد من زعزعة استقرار المناطق المضطربة في العالم مثل إفريقيا والشرق الأوسط. جرى الاستشهاد بغزو العراق، البلد الذي يتمتع باحتياطيات هائلة من النفط، كمثال على استخدام القوة العسكرية التي قد تكون أكثر انتشاراً في عالم يعاني من ضغوط الطاقة. ستسبب ذروة النفط ضغوطاً على الدول التي تعاني من عجز في الطاقة لاستعراض قوتها الاقتصادية والعسكرية في محاولة لانتزاع الإمدادات الثمينة من الدول الغنية بالنفط أو التغلب على المنافسين في الصراع الجيوسياسي على النفط الشحيح.

## • الحفظ والكفاءة

يجب تشجيع وتحفيز تدابير الحفظ، بالإضافة إلى ذلك، يجب تنفيذ معايير أكثر صرامة لتعزيز المزيد من الحفاظ على الطاقة مثل قوانين البناء الصارمة والكفاءة التدريجية للأجهزة الرئيسية لأن حلول ذروة النفط ستتطلب بالتأكيد استخدامًا أكبر للكهرباء. ومع ذلك، فإن كفاءة الطاقة وحدها لن تكون كافية لمواجهة تحديات ذروة النفط. سيحتاج المستهلكون إلى تعديل أنماط حياتهم حيث يصبح النفط أكثر ندرة وتكلفة.

## • الحلول الدولية

نظرًا لأن النفط هو سوق عالمي، فإن ذروة النفط هي ظاهرة عالمية. لذلك اقترح جوردون براون، رئيس الوزراء البريطاني الحالي، معالجة المشكلة من خلال الوسائل الدولية. بالتأكيد سيكون التنسيق بين العالم المتقدم والعالم النامي ضرورياً، وخلال فترة انخفاض إنتاج النفط العالمي، سيكون الانفتاح من جانب دول أوبك فيما يتعلق بالاحتياطيات الفعلية وإمكانات الإنتاج مفيدًا عند وضع خطط ذروة الحد من النفط. لا يختلف عن مشروعات الفضاء الدولية الحالية وأهداف تغير المناخ، فإن مخاوف ذروة النفط تتطلب التنسيق والتعاون الدوليين.

# نهايـــة عصـــر النفـــط

تشـهد المملكـة مشـهداً جديـداً للطاقـة يتغيـر بشـكل كبيـر. وافقـت الولايـات المتحـدة والصـين علـى أهـداف ثنائيـة لخفـض الكربـون. يعـد عـام 2014م رسـمياً حاليـاً أكثـر الأعـوام سـخونة في تاريـخ البشـرية، وهـو رقـم قياسـي يـكاد يكـون مسـتحيلاً بـدون وجـود ظاهـرة النينـو (ظاهـرة مناخيـة عالميـة، حيـث يؤثـر تغيـر الحـرارة في أحد المحيطات على الجو بمنطقة أخرى بعيدة). وفي 7 يناير 2014م، كشـف تقريـر نُشـر في مجلـة Nature عـن معادلـة تغيـر المنـاخ للوقـود الأحفـوري مـن خـلال اسـتنتاج أنـه لتحقيـق أي شـيء أفضـل مـن جرعـة 50/50 للحفـاظ علـى الاحتبـاس الحـراري أقـل مـن درجتـين مئويتـين (الحـد الأقصـى المقبـول علـى نطـاق واسـع لتجنـب تغيـر المنـاخ الكارثـي) يجـب أن يبقـى 82 % مـن الاحتياطيـات الأحفوريـة في الأرض.

يضـع هـذا التقريـر أرقامـاً ثابتـة علـى النسـب المئويـة للوقـود الأحفـوري الـذي يجـب أن «يبقـى في الأرض» ويدعـو إلـى عـدم ضـخ 38 % مـن احتياطيـات النفـط المؤكدة في الشـرق الأوسـط من الأرض. وتمثل نسـبة 38 % نحـو 260 بليـون برميـل مـن النفـط - بمـا يعـادل عشـرات التريليونـات مـن الـدولارات - معظمهـا غيـر موجـود في الاحتياطيـات السـعودية. لقـد فتحـت المملكـة بشـكل فعـال الصمـام الموجـود علـى فقاعـة أصـول الكربـون وقفـزت لتكـون أول مـن يبـدأ السـباق حتـى نهايـة عصـر الهيدروكربونـات مـن خـلال ميزتهـا العظيمـة: تكلفـة إنتـاج منخفضـة جداً بحيث يمكنها بيع خامها بشكل أسرع وتأمل ألا تجد نفسها في نهاية عصر النفـط تمتلـك احتياطيـات هائلـة لا قيمـة لهـا وغيـر قابلـة للحـرق.

## • تداعيات جانبية

لقد قيل الكثير من العواقب الاقتصادية الكارثية لروسيا وإيران وفنزويلا والدول الأخرى المصدرة للنفط بسبب انخفاض أسعار النفط، فضلاً عن الأضرار العميقة التي لحقت باقتصاداتها والاضطرابات السياسية الوشيكة. في هذه الأثناء في الولايات المتحدة، كان هناك تحليل لا نهاية له للتأثير (أو عدم التأثير) على إنتاج النفط المتصاعد في البلاد والتكهنات حول السعر الذي سيبدأ عنده الإنتاج الأمريكي في الانخفاض. الأقل توثيقاً هو التأثير على الوصول إلى رأس المال لعمليات الحفر (وبالنظر إلى الاقتصاد الكارثي لفحم أمريكا الشمالية، وربما استخراج الوقود الأحفوري على نطاق واسع). يتطلب التنقيب عن النفط كميات ضخمة من رأس المال مع شهية كبيرة للمخاطر، حيث يمكن أن يؤدي عدم اليقين في الإنتاج وتقلب السوق إلى تقويض قيمة الاستثمارات. في طفرة الإنتاج الحالية، كانت تقلبات السوق أقل من قيمتها بشكل كبير.

ستستمر أوبك في الاجتماع وتبرز نفسها ككارتل يمكنه السيطرة على أسواق النفط، لكن هذا الزمن قد ولى. كان الكارتل يعتمد على المملكة العربية السعودية في استخدام موقعه المتأرجح الضخم للتحكم في القدرة الفائضة في السوق. مع عدم اهتمام السعوديين بهذا الدور، تلاشى تأثير الكارتل. لقد كان التأثير المباشر لأسواق النفط والتداعيات الجيوسياسية العناوين الرئيسية لعام 2015م، ولكن هناك قصة أكبر بكثير لتتكشف، إنها فقاعة أصول الكربون التي تنكمش. تتأثر قيمة كل فئة أصول بشكل فعال على الأرض بافتراض أن الاقتصاد المعتمد على الوقود الأحفوري سيستمر لفترة طويلة بحيث يمكن تجاهل أي تغيير محتمل في قيم الأصول في المستقبل. لكن هذا الافتراض خاطئ.

يعمل الاقتصاد الصناعي العالمي على افتراض توافر الطاقة الرخيصة نسبياً، سواء في شكل كهرباء أو وقود سائل. إذا تغير شكل مصادر الطاقة هذه أو توفرها أو تكلفتها، فسيؤدي ذلك إلى تغيير جوهري في تكلفة استخدام وإنتاج كل الأصول الأخرى على وجه الأرض تقريباً. وسيؤدي ذلك بالضرورة إلى تغيير قيمة كل واحد من تلك الأصول. ستكون هناك تأثيرات إيجابية وسلبية على حد سواء، وسيوفر فهم هذا التغيير، من حيث النطاق والسرعة، نظرة ثاقبة على أحد أكبر تحولات الثروة التي حدثت على الإطلاق.

## • هل سينفد النفط؟

في القرن العشرين، كانت هناك ثلاث دورات رئيسية على الأقل من كارثة النفط: بدأت الأولى خلال الحرب العالمية الأولى وانتهت بفائض نفطي هائل في عام 1930م. اندلعت الثانية في الولايات المتحدة خلال الحرب العالمية الثانية، ونفيت بعد ذلك بسنوات قليلة بسبب زيادة الإنتاج النفطي المتزايد في العالم حتى نهاية الستينات؛ جاءت الدورة النهائية مع بداية السبعينات، وبلغت ذروتها في الصدمتين النفطيتين، وعادت بشكل كبير بفعل الصدمة النفطية المعاكسة عام 1986م.

ومع ذلك، فشلت التجارب السابقة في التحذير من مثل هذه المخاوف، ولم تؤد فيضانات النفط السابقة بعد مراحل الندرة الواضحة إلى غرس الحكمة في حكم المحللين، بينما فشل انهيار الأسعار بعد الارتفاع الصاروخي في أسعار النفط في تعليم القاعدة الأساسية التي تحكم هذا السوق الغريب: عدم موثوقيتها. لذلك لا ينبغي أن يكون مفاجئاً أنه في فجر الألفية الجديدة، اكتسبت موجة جديدة من المتشائمين في نهاية المطاف، الذين يتوقعون حقبة وشيكة من ندرة النفط، زخماً، مع تزايد عدد الكتب والمقالات الصحفية التي تعكس رؤيتهم الرهيبة.

مثل المد المتصاعد، أدى تضخيم وسائل الإعلام لأي صوت يتنبأ بإفلاس الأرض النفطي الحتمي إلى إزالة أي معارضة منطقية لهذه الفكرة غير المثبتة، مما يجعل النقاش العام حول النفط يبدو هادئاً فقط في أقصى الحدود، ويهيمن عليه نثر غني بالصيغ التفضيلية، الأشباح ونظريات المؤامرة. ومع ذلك، سيكون من الخطأ التقليل من شأن المخاوف من عالم يفتقر إلى الخام، بالنظر إلى الحدة التي لمسناها في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين والمخاوف الخطيرة التي تنتشر في العالم.

علاوة على ذلك، فإن الهبات الفعالة لموارد نفط كوكبنا هي قضية مركزية في أي تحليل يتعلق بمستقبل الطاقة وتداعياتها السياسية والاقتصادية التي يعد التعامل معها ضرورة. في محاولة لتبديد معضلات النفط الكبرى التي تلوح في الأفق في السنوات القادمة، سنبدأ بهذا الموضوع. بالنسبة لجميع أولئك الذين ليسوا على دراية بأمور النفط، فإن التحذير الأولي ضروري. صارت رؤى يوم القيامة النفطية اليوم أكثر غموضاً وإقناعاً للمراقب العرضي من خلال الاستخدام المكثف للنماذج الإحصائية والاحتمالية الرسمية التي يبدو أنها تخترق الألغاز التي لم تحل في باطن الأرض.

لكن في الحقيقة لم يفعلوا ذلك. حتى في أيامنا هذه، لا أحد يعرف عدد الكنوز التي تحتفظ بها باطن الأرض في أعماقها، ولم تبتكر طريقة مقبولة إما لتقييمها أو لحساب مدى إمكانية استرداد النفط في المستقبل من الخزانات المعروفة بالفعل. بعبارات بسيطة، فإن البحث عن الرقم النهائي حول ثروة الأرض من النفط يشبه البحث عن الكأس المقدسة، اندفاع لا ينتهي مع ادعاء العديد من الأشخاص أنهم اكتشفوا ما يبقى في الواقع لغزا.

بعد هذا التوضيح، يمكننا أن نبدأ مسيرتنا عبر معضلات النفط الحالية

من خلال دراسة حجج المتشائمين النفطيون. مهما كانت تنبؤاتهم، فجميعهم لديهم قاسم مشترك أو أفضل شعار: ما يسمى بنموذج هوبرت. امتثالاً لقاعدة تجريبية تبعها مهندسو النفط الأوائل، لاحظ هوبرت منحنى الإنتاج بمرور الوقت في مقاطعة نفطية معروفة ناتجاً عن بدء التشغيل المتتالي للحقول المكتشفة في المنطقة: بدءًا من الصفر، ينمو الإنتاج بمرور الوقت حتى يصل إلى ذروته عندما يستخرج نصف الموارد الحالية القابلة للاسترداد، وهو ما يسمى نقطة منتصف النضوب.

في هذه المرحلة وفقاً لهوبرت يميل الإنتاج إلى الانخفاض بمعدل نموه نفسه بعبارة أخرى، قد يمثل الارتفاع المتماثل وسلوك الانخفاض في إنتاج النفط بمنحنى الجرس: توضح المنطقة الواقعة أسفل المنحنى الإنتاج التراكمي لمقاطعة نفطية، أو «الموارد النهائية القابلة للاسترداد» (URR) التي تحتفظ بها. ينتج شكل منحنى هوبرت عن مجموعة مواقع إنتاج النفط من الحقول الفردية على التوالي، بعد الاكتشافات من الحقول الرئيسية والتي تُنقل إلى الأقمار الصناعية. نتيجة لذلك، يؤكد هوبرت أنه إذا جرى استكشاف حوض النفط بشكل كافٍ، فمن الممكن التنبؤ بشكل معقول بالوقت الذي سيحقق فيه ذروة الإنتاج ومتى سينفد النفط.

# التأثير البيئي للطاقة الغير متجددة

مصادر الطاقة الأربعة غير المتجددة: الفحم والنفط والغاز الطبيعي والطاقة النووية. الفحم والنفط والغاز الطبيعي، يشار إليها بالوقود الأحفوري. تم إنشاء الوقود الأحفوري من بقايا النباتات والحيوانات الميتة. المادة المصدر قابلة للتجديد (إنها الكتلة الحيوية!)، ولكن نظرًا لأن تكوينها يستغرق ملايين السنين، فلا يتم تجديدها خلال فترة زمنية «قصيرة»، لذا فهي غير قابلة للتجديد.

هذه الموارد موجودة في الطبيعة، ولكنها تختفي مع استخدامها. وفقا لدراسة حديثة نشرت في مجلة نيتشر العلمية، سوف تنضب احتياطيات النفط بحلول عام 2043م. وينطبق الشيء نفسه على الفحم والغاز الطبيعي فالتاريخ الذي لن يكون لدينا فيه هذا الوقود الأحفوري يقترب بسرعة. ولكن السبب الذي يدفعنا إلى البحث بشكل عاجل عن مصادر جديدة للطاقة لا يرجع إلى نفاد هذه الموارد، بل إلى التأثير البيئي الخطير الذي تخلفه الطاقات غير المتجددة على كوكبنا.

## • انبعاثات غازات الدفيئة

يمثل الوقود الأحفوري 80 % من الطلب العالمي الحالي على الطاقة الأولية، ونظام الطاقة هو مصدر ما يقرب من ثلثي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في جميع أنحاء العالم.

يشمل مفهوم غازات الدفيئة انبعاث غازات ثاني أكسيد الكربون وغاز الميثان، واللذان يُعدان المصدر الأكثر تأثيرًا وضررًا على البيئة وتقلبات المناخ، ولعل أهم المصادر وأكثرها تلويثًا هي الغازات المنبعثة من احتراق الوقود والفحم الحجري، وعلى النقيض من ذلك يعد الغاز الطبيعي أقل مصادر انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون عند مقارنته بباقي أشكال الوقود الأحفوري.

## • البقــع والانسكابات النفطيــة

الانسكابات للمواد البترولية شهد العالم في الآونة الأخيرة على العديد من حوادث التسربات النفطية، وانسكابات النواقل البحرية التي سببت أضرارًا بالغة بالأحياء البحرية والنظم البيئية المجاورة لها من شواطئ وعوائل مرجانية وأسماك. تعد البقع النفطية من أخطر الكوارث وأكثرها شيوعًا. واحدة من أكثر المناطق المتضررة على هذا الكوكب هي منطقة الأمازون.

## • النفايــات المشــعة

عندما يتعلق الأمر بالطاقة النووية، فمن الضروري التعامل مع النفايات المشعة بشكل صحيح. هذه نفايات لا يمكن إعادة تدويرها ويجب تخزينها بشكل آمن للغاية لأنها يمكن أن تولد نشاطًا إشعاعيًا لقرون وحتى آلاف السنين. يجب إدارة النفايات النووية من خلال ضمان أقصى قدر من الأمان، لأن النشاط الإشعاعي ضار بصحة الناس والكوكب. يعتبر النشاط الإشعاعي المنبعث بكميات كبيرة قاتلاً ويمكن أن يسبب أيضًا تشوهات وأمراض لدى الأشخاص الذين يعيشون في المنطقة على مدى عدة أجيال.

## • آثارهــا على صحــة الإنســان

إن تلوث الهواء الناجم عن حرق الوقود الأحفوري يسبب 4.5 مليون حالة وفاة في جميع أنحاء العالم كل عام، وفقا لدراسة أجرتها منظمة السلام الأخضر ومركز أبحاث الطاقة والهواء النظيف (CREA). ناهيك عن أنه وفقا لتقديرات منظمة الصحة العالمية، فإن نحو 4.2 مليون حالة وفاة مبكرة تحدث سنويا نتيجة التعرض لجزيئات معدنية مرتبطة بحرق الوقود الأحفوري

## • تلوث الهواء

ينتج تلوث الهواء عن احتراق الوقود الأحفوري بالإضافة إلى انبعاث غاز ثاني أكسيد الكبريت وأكسيد النيتروجين مترافقًا مع بعض الأجسام صغيرة الحجم، كما وتُعد محطات الطاقة التي تختص بحرق الفحم من أهم المصادر الملوثة للهواء وذلك بسبب انبعاثات الزئبق الناجمة عنها.

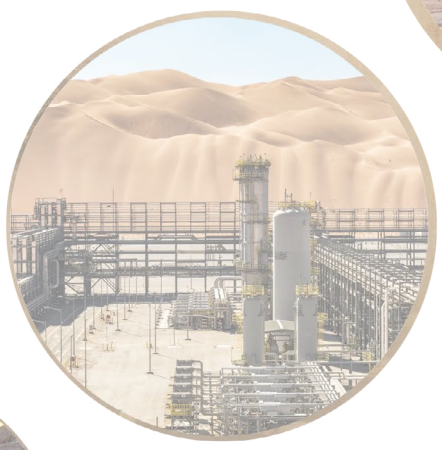
## • الأمطار الحمضية وتلوث المياه

المطر الحمضي هو أحد عواقب تلوث الهواء. ويحدث ذلك عندما تتلامس الانبعاثات الملوثة من المصانع أو السيارات أو مراجل التدفئة المركزية مع الرطوبة الجوية. وتنتج هذه الانبعاثات عن حرق الوقود الأحفوري، وتؤدي إلى تحمض التربة والبحيرات والبحار.

تؤثر ملوثات الهواء المختلفة بدورة المياه في الطبيعة ومدى نقاوته، إذ يتسبب دخول العديد من الملوثات إلى مجال الغلاف الجوي مثل الكبريت والمواد الكيميائية المنبعثة من المصانع والغازات والمواد العالقة في تحول الأمطار النقية إلى أمطار حامضية، ويؤدي هذا المطر الحمضي إلى تآكل الآلات ويعطل النظم البيئية المحلية، كما يُغير من حموضة البحيرات والجداول التي يمكن أن تكون ضارة جدًا بالأسماك والكائنات المائية الأخرى؛ كما أنه يضر بالأشجار وبالتالي يضعف النظم الإيكولوجية للغابات.

## • التعدين وتلوث الأرض

تتسبب عمليات التعدين السطحي في تلوث التربة وموت النباتات والكائنات الحية التي تسكنها، حيث يكمن الهدف من عمليات التعدين استخراج مصادر الطاقة غير المتجددة، وبعد الانتهاء من عمليات الاستخراج؛ يتم إلقاء كميات كبيرة من الصخور والأتربة الناتجة من التعدين السطحي في مواقع أخرى مثل الوديان القريبة، وهذا يؤثر بشكل سلبي على النظم البيئية بالإضافة إلى تسرب المواد الكيميائية التي تلوث الأرض والمياه الجوفية.



# الفصل الثامن

## مستقبل الطاقة في عالمنا

- الطاقة المتجددة والغير متجددة
- دور الذكاء الاصطناعي في صناعة الطاقة
- وسائل تخزين الطاقة
- الاستثمار في الطاقة
- إيجابيات وسلبيات مصادر الطاقة
- العرض والطلب على الطاقة
- الحفاظ على الطاقة وكفاءتها
- تطوير واستدامة الطاقة

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

# مستقبل الطاقة في عالمنا

## مُقَدِّمَة

تقف الطاقة المتجددة على النقيض من الوقود الأحفوري، الذي يتم استخدامه بسرعة أكبر بكثير من تجديده. وتنتشر موارد الطاقة المتجددة وفرص كبيرة لكفاءة استخدام الطاقة في مناطق جغرافية واسعة، على عكس مصادر الطاقة الأخرى التي تتركز في عدد محدود من البلدان. ومن شأن النشر السريع للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة، والتنويع التكنولوجي لمصادر الطاقة، أن يؤدي إلى تحقيق أمن الطاقة وفوائد اقتصادية كبيرة. وأصبحت الطاقة الشمسية وطاقة الرياح أرخص بكثير. وفي بعض الحالات، سيكون الانتقال إلى هذه المصادر أقل تكلفة بدلاً من الاستمرار في استخدام أنواع الوقود الأحفوري الحالية وغير الفعالة.

من الصعب التنبؤ بالمستقبل، أن قطاع الطاقة بحلول عام 2024م سيبدو مختلفًا بشكل كبير عما هو عليه اليوم. وفي حين ستستمر الشركات في إنتاج الوقود الأحفوري، فإن مصادر الطاقة المتجددة يمكن أن تمثل ما يقرب من 70 % من مزيج الطاقة في العالم، في حين ستنبعث كمية أقل من الكربون في الهواء بنسبة 80 % تقريبًا. سوف يرتفع الطلب العالمي على الطاقة بنحو 28 % من الآن وحتى عام 2040م، ولكن هواءنا يجب أن يكون أنظف وكوكبنا أكثر صحة. إن الوصول إلى هذه النقطة لن يكون سهلا. في الوقت الحالي، أحد التحديات الكبيرة التي تواجه الصناعة هو إزالة الكربون من إنتاج الطاقة، إما عن طريق إدخال المزيد من مصادر الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة العالمي، أو إنتاج الوقود الأحفوري بطريقة أكثر كفاءة

من الناحية البيئية، أو تقليل كمية الكربون في الهواء. ومن أجل الانتقال إلى كوكب خالٍ من الكربون ويعمل بالطاقة المتجددة بحلول عام 2040م، يجب على الشركات والأوساط الأكاديمية ومراكز الأبحاث تركيز جهودهم والبحث عن طرق أكثر إبداعًا لتسريع هذه العملية.

يخلص مؤشر تحول الطاقة، الذي يقيس أداء 120 دولة بشأن أداء أنظمة الطاقة الحالية ومدى جاهزية بيئتها التمكينية، إلى أنه على الرغم من إحراز تقدم واسع في مجال الطاقة النظيفة والمستدامة، إلا أن هناك تحديات ناشئة أمام التحول والوصول إلى الطاقة بأسعار معقولة والتنمية الاقتصادية المستدامة بسبب تحويل البلدان تركيزها إلى أمن الطاقة. إن تسريع نشر مصادر الطاقة المتجددة يمكن أن يعزز حصولها على الطاقة وأمنها، ويقلل الاعتماد على الوقود الأحفوري، ويحقق أهداف خفض الانبعاثات الصفرية إلى الصفر.

إن التحول اليوم إلى الطاقة النظيفة يحدث في جميع أنحاء العالم ولا يمكن إيقافه. هناك فوائد هائلة معروضة، بما في ذلك الفرص الصناعية، وزيادة أمن الطاقة، والهواء النظيف، والوصول الشامل إلى الطاقة، ومناخ أكثر أمانًا للجميع. ومع الأخذ في الاعتبار الضغوط والتقلبات المستمرة في أسواق الطاقة التقليدية اليوم، فإن الادعاءات بأن النفط والغاز يمثلان خيارات آمنة أو آمنة لمستقبل الطاقة والمناخ في العالم تبدو أضعف من أي وقت مضى.

عموما تشير آفاق الاقتصاد العالمي الحالية الى استراتيجية عالمية لوضع العالم على المسار الصحيح بحلول عام 2030م وتتلخص في خمس ركائز أساسية: مضاعفة القدرة العالمية المتجددة ثلاث مرات؛ ومضاعفة معدل التحسينات في كفاءة استخدام الطاقة؛ وخفض انبعاثات غاز الميثان الناتجة عن عمليات الوقود الأحفوري بنسبة 75 %؛ وآليات تمويل مبتكرة وواسعة النطاق لزيادة استثمارات

الطاقة النظيفة إلى ثلاثة أضعاف في الاقتصادات الناشئة والنامية؛ واتخاذ التدابير اللازمة لضمان التخفيض المنظم في استخدام الوقود الأحفوري.

تعد مصادر الطاقة المتجددة ضرورية للطاقة المستدامة، لأنها تعزز بشكل عام أمن الطاقة وتنبعث منها غازات دفيئة أقل بكثير من الوقود الأحفوري. تثير مشاريع الطاقة المتجددة في بعض الأحيان مخاوف كبيرة بشأن الاستدامة، مثل المخاطر التي يتعرض لها التنوع البيولوجي عندما يتم تحويل المناطق ذات القيمة البيئية العالية إلى إنتاج الطاقة الحيوية أو مزارع الرياح أو الطاقة الشمسية. الطاقة الكهرومائية هي أكبر مصدر للكهرباء المتجددة بينما تنمو الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بسرعة. تعد الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح البرية أرخص أشكال قدرات توليد الطاقة الجديدة في معظم البلدان.

تشمل أهداف الأمم المتحدة لعام 2030م تحقيق زيادة كبيرة في نسبة الطاقة المتجددة في إمدادات الطاقة العالمية. وفقاً للوكالة الدولية للطاقة، أصبحت مصادر الطاقة المتجددة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية الآن مصدراً شائعاً للكهرباء، حيث تشكل 70 % من كل الاستثمارات الجديدة في توليد الطاقة على مستوى العالم. وتتوقع الوكالة أن تصبح مصادر الطاقة المتجددة مصدر الطاقة الرئيسي لتوليد الكهرباء على مستوى العالم في السنوات الثلاث المقبلة، متجاوزة الفحم.

# الطاقة المتجددة والغير متجددة

يتم إنتاج الطاقة المتجددة من مصادر طبيعية يمكن تجديدها بمرور الوقت. غالبًا ما تعتبر مصادر الطاقة المتجددة حلاً أكثر استدامة من الطاقة الغير متجددة لأنها لا تنتج ملوثات وغازات دفيئة ضارة بالكوكب. هناك العديد من مصادر الطاقة المتجددة، ولكل منها فوائدها الخاصة. تشمل بعض المصادر الرئيسية للطاقة المتجددة ما يلي: الشمس، الرياح، الكتلة الحيوية، الطاقة الكهرومائية، الحرارة الأرضية، طاقة من البحار.

الفرق الأكثر أهمية بين الموارد المتجددة وغير المتجددة هو أن الطاقة الغير متجددة تأتي من موارد محدودة سوف تستنزف في نهاية المطاف. فهي تعتبر أقل استدامة وضررا على الكوكب، حيث تكون الطاقة الغير متجددة مسؤولة عن إنتاج الملوثات مثل الغازات الدفيئة. كما هو الحال مع الطاقة المتجددة، هناك أنواع مختلفة من مصادر الطاقة الغير متجددة. وتشمل ما يلي: الفحم، الزيت، الغاز طبيعي، الطاقة النووية.

## • مميزات الطاقة المتجددة

- الطاقة المتجددة تكافح تغير المناخ. لا تنبعث منها الغازات الدفيئة، التي تعد السبب الرئيسي لتغير المناخ. تساعد مصادر الطاقة المتجددة، بما في ذلك طاقة الرياح والطاقة الشمسية، على تقليل كمية ثاني أكسيد الكربون والملوثات الضارة الأخرى في الغلاف الجوي.
- تؤثر مصادر الطاقة المتجددة بشكل إيجابي على البيئة لأنها تساعد على إبطاء اضطراب الحياة النباتية والحيوانية، وارتفاع منسوب مياه البحر، والظروف الجوية القاسية، وغيرها من الآثار المرتبطة بتغير المناخ. حتى

أن معظم التقارير ذكرت أنه بحلول عام 2030م يجب علينا أن نتحول إلى مصادر الطاقة المتجددة لتعويض 50 % من مصادر الطاقة لدينا لمساعدة الكوكب على الوصول إلى صافي الصفر بحلول عام 2050م.

- مصادر الطاقة المتجددة لا تنضب لأنها تنشأ من الموارد الطبيعية والعمليات التي تتجدد باستمرار. على سبيل المثال، الشمس والرياح ودورة المياه ونفايات الكتلة الحيوية كلها عناصر تستخدم لإنتاج الطاقة المتجددة. يمكن استخدام مصادر الطاقة هذه مرارًا وتكرارًا دون استنزافها، مما يجعلها مفيدة للغاية وموثوقة على الإطلاق.
- وعلى عكس مصادر الطاقة الغير متجددة مثل الوقود الأحفوري، والتي تعتبر محدودة، يمكن استخدام مصادر الطاقة المتجددة لتلبية احتياجاتنا من الطاقة في المستقبل المنظور، مما يجعلها جزءًا أساسيًا من حل أزمة المناخ العالمية.
- إن صناعة الطاقة المتجددة آخذة في النمو. ومع هذا النمو تأتي الحاجة إلى المواهب لتولي وظائف الطاقة المتجددة لإنجاز المشاريع والحفاظ على الجهود نحو مستقبل صافي الصفر. وفي عام 2022م، وصلت وظائف الطاقة المتجددة إلى 12.7 مليون وظيفة في جميع أنحاء العالم، وتوقعت الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (إيرينا) أن يرتفع هذا العدد إلى 43 مليون وظيفة في مجال الطاقة المتجددة بحلول عام 2050م.
- تعد الفوائد الاقتصادية للطاقة المتجددة مهمة أيضًا، ليس فقط من خلال توفير الفرص للمواهب داخل الصناعة لكسب دخل صحي. يمكن للطاقة المتجددة أيضًا توفير أموال الشركات والمستهلكين. على سبيل المثال، مع انخفاض تكلفة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، أصبحت الطاقة المتجددة قادرة على المنافسة مع الطاقة الغير متجددة، وفي بعض الحالات، أصبحت أرخص. على المدى الطويل، تتمتع الطاقة المتجددة بالقدرة على تثبيت أسعار الطاقة لسكان العالم.

## • عيوب الطاقة المتجددة

- على الرغم من أن الطاقة المتجددة توفر فوائد كبيرة لسكان العالم، إلا أن هناك بعض العيوب التي يجب أن نكون على دراية بها.

- الطاقة المتجددة ليست متاحة دائمًا على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع لأنها تعتمد على الموارد الطبيعية. على سبيل المثال، إذا كان الطقس سيئًا والشمس غير مشرقة، فإن الألواح الشمسية الكهروضوئية الموجودة على أسطح المنازل والتي تولد الكهرباء من ضوء الشمس لا يمكن أن تعمل، مما يؤدي إلى اضطرار أصحاب المنازل إلى العودة إلى البدائل التقليدية غير المتجددة.

- إذا لم تكن قوة الرياح قوية بما فيه الكفاية، فإن مزارع الرياح البرية والبحرية التي تولد الطاقة المتجددة لا يمكن أن تعمل على النحو الأمثل. بالإضافة إلى ذلك، بالنسبة للطاقة الكهرومائية، إذا لم تكن مستويات المياه قوية بما فيه الكفاية أو كان هناك جفاف، فسيؤثر ذلك على الطاقة المنتجة. سيأخذ الخبراء في الاعتبار جغرافية مشاريع الطاقة المتجددة ويختارون المناطق التي تكون فيها فرصة توليد الطاقة أكبر. ومع ذلك، بما أن الطبيعة قد تكون في بعض الأحيان غير قابلة للتنبؤ بها، فقد يحدث هذا التحدي.

- هناك حاجة إلى مساحة كبيرة لمشاريع الطاقة. إن المساحة اللازمة لهذه المشاريع كبيرة وليست دائمًا قابلة للتطبيق أو متاحة للاستخدام في كل دولة. على سبيل المثال، يمكن للبلدان التي تشرق فيها الشمس بانتظام أن تستفيد من الطاقة الشمسية. ومع ذلك، قد يفوتون فرصة إنتاج مصدر الطاقة المتجددة هذا إذا كانت ظروف التضاريس غير مناسبة أو إذا كانت البنى التحتية الأخرى تشغل المساحة بالفعل.

- مصادر الطاقة المتجددة لا تتوفر دائمًا عندما نحتاج إليها بسبب المساحة المحدودة لتخزين الطاقة المنتجة من خلال مصادر الطاقة المتجددة. على الرغم من أن العديد من التقنيات يمكنها تخزين الطاقة المتجددة، إلا أن جميعها لها عيوبها. على سبيل المثال، البطاريات باهظة الثمن ولها عمر محدود. وفي الوقت نفسه، تعتبر الطاقة الكهرومائية المخزنة بالضخ وسيلة أكثر كفاءة لتخزين الطاقة، ولكنها تتطلب تضاريس مناسبة غير متوفرة في جميع أنحاء العالم.

- التكاليف الأولية لمنشآت الطاقة المتجددة مرتفعة وذلك لأن تقنيات الطاقة المتجددة لا تزال في مراحلها الأولى من التطور. ولذلك فإن تكلفة المعدات والتركيب أعلى مما ستكون عليه بالنسبة للتقنيات الأكثر نضجا المتاحة للوقود الأحفوري. على سبيل المثال، يتكلف إنتاج ميجاوات واحد من الكهرباء عن طريق توربينات الرياح ما يقرب من مليون دولار، وهو ما يكفي لتزويد نحو ألف منزل بالطاقة سنويا.

## • مميزات الطاقة الغير متجددة

- 80 % من الطاقة في العالم تأتي من مصادر غير متجددة، مما يجعلها شيئًا لا نزال نعتمد عليه بشدة. تتمتع الطاقة الغير متجددة ببعض الفوائد، بما في ذلك فعاليتها من حيث التكلفة، والقدرة على إنتاج المزيد من الطاقة، وكيف يمكن توفيرها في جميع أنحاء العالم. فيما يلي ثلاث مزايا للطاقة غير المتجددة.

- الطاقة الغير متجددة أرخص وتحظى بإعانات كبيرة. حاليا أرخص وأكثر فعالية من حيث التكلفة من الطاقة المتجددة. أحد الأسباب الرئيسية هو

أن الموارد غير المتجددة، مثل النفط والفحم والغاز، أكثر وفرة من مصادر الطاقة المتجددة، مما يعني أنه من الأسهل العثور عليها واستخراجها، مما يقلل من تكلفة الإنتاج.

- لقد كانت مصادر الطاقة الغير متجددة موجودة لفترة أطول من مصادر الطاقة المتجددة، مما يعني وجود المزيد من البنية التحتية لدعم استخدامها. وتعمل هذه البنية التحتية، مثل خطوط الأنابيب ومحطات الطاقة، على خفض تكلفة توصيل الطاقة الغير متجددة للمستهلكين.

- يتم توليد المزيد من الطاقة من خلال المصادر غير المتجددة. يمكن لمصادر الطاقة الغير متجددة أن تولد طاقة أكثر من مصادر الطاقة المتجددة لأنها أكثر تركيزا، مما يعني أنها تحتوي على طاقة أكبر لكل وحدة مساحة. على سبيل المثال، تتمتع الطاقة المنتجة بالفحم والغاز الطبيعي بكفاءة أكبر بنسبة 40 % و60 % على التوالي، مقارنة بالطاقة الشمسية التي تنتجها الألواح الشمسية، والتي لا يمكن أن تصل إلا إلى ما بين 15 % و20 %. سبب آخر وراء إنتاج الطاقة الغير متجددة طاقة أكثر من المصادر المتجددة هو سهولة الحصول عليها. على سبيل المثال، يمكن استخراج الفحم وحرقه مباشرة لتوليد الكهرباء، في حين تتطلب الطاقة الشمسية وطاقة الرياح أنظمة معقدة لجمع الطاقة وتخزينها.

- يتم توفير الطاقة الغير متجددة إلى أي مكان تقريبًا وفي أي وقت مصادر الطاقة الغير متجددة وفيرة ومتاحة على نطاق أوسع على مستوى العالم من الطاقة المتجددة. وهذا مفيد بشكل خاص للبلدان التي لم يصل إليها إنتاج الطاقة المتجددة بعد أو لم يعد واردًا فيها. على سبيل المثال، من غير المرجح أن تنتج دولة ذات إمدادات مياه غير متسقة الطاقة الكهرومائية.

- يمكن لمصادر الطاقة الغير متجددة توليد الطاقة 24 ساعة يوميا، سبعة أيام في الأسبوع، سواء من خلال محطات توليد الكهرباء أو خطوط الأنابيب أو وسائل النقل المختلفة. ويمكن إنتاج الطاقة الغير متجددة بغض النظر عن الظروف الجوية، على عكس إنتاج الطاقة المتجددة التي تعتمد بشكل كبير على الموارد الطبيعية.

## • عيوب الطاقة الغير متجددة

- الطاقة الغير متجددة تدمر الكوكب. مصادر الطاقة الغير متجددة تدمر الكوكب بعدة طرق. بمجرد حرق الوقود الأحفوري، يتم إطلاق الغازات الدفيئة في الغلاف الجوي للأرض، مما يساهم في تغير المناخ. يعد الوقود الأحفوري غير المتجدد مسؤولاً عن أكثر من 75 % من انبعاثات الغازات الدفيئة في العالم ونحو 90 % من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. تؤثر هذه الانبعاثات سلبًا على الكوكب، حيث تساهم في ارتفاع منسوب مياه البحر، وذوبان القمم الجليدية، والظواهر الجوية المتطرفة.

- لا تطرح مصادر الطاقة الغير متجددة مشاكل تتعلق بالاحتباس الحراري فحسب، بل إنها مسؤولة أيضًا عن تلويث الهواء والماء. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي تعدين الفحم إلى تلويث إمدادات المياه بالمعادن الثقيلة، ويمكن أن تؤدي الانسكابات النفطية إلى تدمير الحياة البحرية والمجتمعات الساحلية.

- الطاقة الغير متجددة ضارة بصحتنا. في حين أن مصادر الطاقة الغير متجددة ضارة بالكوكب، فإن العيب الآخر للطاقة الغير متجددة هو أنها تضر بصحة سكان العالم. عندما يتم حرق هذا الوقود، فإنه يطلق الملوثات في الهواء، بما في ذلك ثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين وأول أكسيد

الكربون. يمكن أن تساهم هذه الملوثات في مشاكل صحية مختلفة، بما في ذلك مشاكل الجهاز التنفسي وأمراض القلب والسكتة الدماغية والسرطان والوفاة المبكرة.

- مصادر الطاقة الغير متجددة لن تبقى موجودة إلى الأبد. أحد العيوب الأخيرة للطاقة غير المتجددة هو أنها محدودة ولن تكون تحت تصرفنا إلى الأبد. تتشكل مصادر الطاقة الغير متجددة على مدى ملايين السنين من بقايا الحيوانات والنباتات، ومن هنا جاءت كلمة أحفوري في الوقود الأحفوري، ولا يمكن استبدالها بمجرد نفادها.

وفيما يلي نورد إيجابيات وسلبيات جميع مصادر الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، الطاقة الكهرومائية، الطاقة الحيوية، الطاقة الحرارية الأرضية، وطاقة البحار، والهيدروجين الأخضر، الطاقة النووية)، والطاقة الغير متجددة وتشمل: (الوقود الأحفوري، التكسير الهيدروليكي، والنفط الصخري).

# إيجابيات وسلبيات مصادر الطاقة

نظراً لأن البشر يستهلكون المزيد من الكهرباء والطاقة، سنحتاج إلى مزيج من الطاقة المتجددة والنظيفة لتدفئة منازلنا وإضاءة مكاتبنا وتزويد مدننا وبلداتنا بالطاقة. لا يوجد مصدر طاقة متجددة واحد يمكنه توفير طاقة كافية بمفرده. لبناء مستقبل مستدام، نحتاج إلى الاستثمار في العديد من التقنيات التي يمكنها توفير الطاقة مع تقليل بصمتنا الكربونية والاعتماد على الوقود الأحفوري.

سنحاول فيما يأتي أن نقيّم فوائد وتحديات مصادر الطاقة، بما في ذلك الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وغيرها. ونحاول أن نكشف عن سلبيات وإيجابيات كل نوع من هذه المصادر. طبعاً بعض مصادر الطاقة أنظف من غيرها. ومع ذلك، لكلٍ منها له تأثير في البيئة. ستندهش عندما ترى أنه أثناء تصنيع الأجزاء، قد تلوث بعض التقنيات الخضراء وتزيد من تأثير الاحتباس الحراري أكثر من مصادر الطاقة التقليدية.

هذا يعني أننا بحاجة إلى الاستثمار في التقنيات الأقل تلويثاً، أثناء تصنيع الأجزاء والتشغيل، ودمجها مع التقنيات التي، على سبيل المثال، تلتقط ثاني أكسيد الكربون من البيئة و / أو مصدر الانبعاث. تحتاج التقنيات النظيفة أثناء عملها ولكن لها تأثير كبير في البيئة عند تصنيعها (بخاصة فيما يتعلق بانبعاث غازات الدفيئة القوية) إلى مزيد من البحث قبل اعتمادها على نطاق واسع. بالإضافة إلى ذلك، فإن إجراء تحليل شامل لما سيبدو عليه كوكبنا بعد الاعتماد الكامل لهذه التقنيات هو أمر في غاية الأهمية بالنسبة للأجيال القادمة حتى لا تترك في طريق مسدود.

## الطاقـــة البتروليـــة

إن استخراج ومعالجة واستخدام النفط غير المتجدد وأنواع الوقود الأحفوري الأخرى له تأثير بيئي شديد. هناك مشكلة خطيرة تتمثل في أن حرق النفط أو أي وقود أحفوري يحوي على الكربون يطلق ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، ومن ثم يمكن أن يساعد في تعزيز ظاهرة الاحتباس الحراري. حالياً، يمثل حرق النفط في الغالب كبنزين ووقود ديزل للنقل 43 % من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية.

### الايجابيـــات

- ✓ التقنية الناضجة.
- ✓ موثوقة.
- ✓ إمدادات كافية لمدة 42-93 سنة.
- ✓ منخفضة الكلفة.
- ✓ إنتاجية عالية من الطاقة الصافية.
- ✓ سهلة النقل داخل البلدان وفيما بينها.
- ✓ استخدام منخفض للأراضي.
- ✓ نظام توزيع فعَّال.

### السلبيـــات

- ✓ تؤدي عملية الحفر إلى تعطيل موائل الحياة البرية.
- ✓ تؤثر على المناظر الطبيعية من خلال إزالة الغطاء النباتي وزيادة التعرية مما يؤدي إلى الانهيارات الأرضية والفيضانات.
- ✓ ينبعث منها ثاني أكسيد الكربون وملوثات الهواء الأخرى.
- ✓ تنتج الميثان أثناء التكسير.

- ✓ تؤثر الانسكابات النفطية والجريان السطحي في المناطق الحضرية والتسربات الطبيعية على الحيوانات.
- ✓ تخلص غير السليم من الزيوت.
- ✓ غير متجددة.
- ✓ بحاجة إلى إيجاد بدائل في غُضون 50 عاماً.
- ✓ تحظى بإعانات حكومية كبيرة.
- ✓ التكاليف البيئية غير مشمولة في سعر السوق.
- ✓ السعر المنخفض بشكل مصطنع يشجع على الهدر ولا يشجع على البحث عن بدائل.
- ✓ يمكن أن تسبب تلوث المياه.

## ■ طاقة الصخر النفطي والرمل النفطي

الرمل النفطي، أو رمل القطران، عبارة عن خليط من الطين، والرمل، والماء، ومادة عضوية قابلة للاشتعال تسمى البيتومين - وهو زيت ثقيل سميك ولزج يحوي على نسبة عالية من الكبريت. تحفر الرمال النفطية الأقرب إلى سطح الأرض بوساطة مجارف كهربائية عملاقة وتحميلها في شاحنات منزلية تنقلها إلى محطات التطوير. هناك يجري خلطها بالماء الساخن والبخار لاستخراج البيتومين، الذي يحول إلى نفطٍ خام صناعي منخفض الكبريت ومناسب للتكرير.

### الايجابيـــات

- ✓ تكلفة معتدلة (الرمل النفطي).
- ✓ الامدادات الكبيرة المحتملة وبخاصة الرمال النفطية في كندا.
- ✓ سهولة النقل داخل البلدان وفيما بينها.
- ✓ وجود نظام توزيع فعَّال.
- ✓ جرى تطوير التقنية بشكل جيد.

### السلبيـــات

- ✓ التكلفة العالية (الصخر النفطي).
- ✓ انخفاض صافي عائد الطاقة التكاليف البيئية غير مشمولة في سعر السوق.
- ✓ كميات كبيرة من المياه اللازمة للمعالجة.
- ✓ اضطراب شديد في الأراضي.
- ✓ تلوث المياه الشديد.
- ✓ تلوث الهواء عند الاحتراق.
- ✓ انبعاثات ثاني أكسيد الكربون عند إنتاجها وحرقها.

## ■ طاقـــة الغـــاز الطبيعـــي

نظراً لمزاياها على النفط والفحم والطاقة النووية، يرى بعض المحللين أن الغاز الطبيعي هو أفضل وقود للمساعدة في الانتقال إلى تحسين كفاءة الطاقة وزيادة استخدام الطاقة المتجددة على مدار الخمسين عاماً القادمة. على سبيل المثال، يمكن تحويل السيارات لتعمل بالغاز الطبيعي بتكلفة معقولة.

## الايجابيات

- ✓ إمدادات وفيرة.
- ✓ إنتاجية عالية من الطاقة الصافية.
- ✓ منخفض الكلفة.
- ✓ تلوث هواء أقل من أنواع الوقود الأحفوري الأخرى.
- ✓ انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أقل من أنواع الوقود الأحفوري الأخرى.
- ✓ سهولة النقل عن طريق خطوط الأنابيب.
- ✓ استخدام منخفض للأراضي.
- ✓ وقود جيد لخلايا الوقود وتوربينات الغاز.

## السلبيات

- ✓ طاقة غير متجددة.
- ✓ يطلق ثاني أكسيد الكربون عند الاحتراق.
- ✓ يحظى بدعم الحكومي.
- ✓ التكاليف البيئية غير مشمولة في سعر السوق.
- ✓ يمكن أن يتسرب الميثان (أحد غازات الدفيئة) من خطوط الأنابيب.
- ✓ صعوبة التحويل من دولة إلى أخرى.
- ✓ لا يمكن شحنها عبر المحيط إلا في صورة غاز طبيعي مسال شديد الانفجار.
- ✓ في بعض الأحيان تحترق وتهدر في الآبار بسبب السعر المنخفض.

## طاقـــة الكتلـــة الحيويـــة

تتمثل إحدى المشكلات في أن حرق الكتلة الحيوية ينتج عنه ثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك، إذا كان معدل استخدام الكتلة الحيوية لا يتجاوز المعدل الذي يتجدد من خلاله نمو النبات الجديد (الذي يستهلك ثاني أكسيد الكربون)، فلا توجد زيادة صافية في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

### الايجابيـــات

- ✓ مصنوعة من مصادر مختلفة (الإيثانول، والديزل الحيوي، والكتلة الحيوية، ورقائق الخشب، والنفايات البلدية، وغيرها).
- ✓ تلوث أقل من الوقود الأحفوري أثناء الاحتراق.
- ✓ إنتاج أرخص من الوقود الأحفوري.
- ✓ مصدر طاقة متجددة.
- ✓ يمكن أن تنتجها أي دولة.

### السلبيـــات

- ✓ تشمل الانبعاثات ثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون والكبريت.
- ✓ ينتج وقود الديزل الحيوي أكسيد النيتروجين أكثر من الديزل الناتج عن البترول.
- ✓ قد يحوي الرماد من الوقود الحيوي على معادن ضارة، مثل الكادميوم والرصاص.
- ✓ كمية كبيرة من الطاقة والمياه ضرورية لزراعة المحاصيل، وإنتاج الأسمدة والمبيدات، وتحويل النباتات إلى وقود حيوي.
- ✓ أقل كفاءة من الوقود الأحفوري.

- ✓ تأتي كمية كبيرة من الطاقة المستخدمة لإنتاج الوقود الحيوي من الوقود الأحفوري.
- ✓ مع احتوائه على بصمة كربونية أقل، إلا أن الوقود الحيوي يزيد من البصمة من خلال زراعة المحاصيل وحصادها، بالإضافة إلى تدمير الغابات لزراعة المحاصيل.
- ✓ حاليًا، تكاليف الإنتاج أكثر من تكلفة الوقود الأحفوري.

## ■ طاقة الفحم

الفحم مادة رخيصة، ووفيرة، ويتوزع في معظم أنحاء الكوكب. لكن استخراج الفحم وحرقه له تأثير شديد على هواء الأرض، والماء، والأرض، والمناخ، وكذلك على صحة الإنسان. الفحم هو أكبر ملوث للهواء في الدول التي تحرق الفحم. فهو يمثل أكثر من ثلث انبعاثات ثاني أكسيد الكربون السنوية في العالم، السبب الرئيسي في زيادة الاحتباس الحراري من الأنشطة البشرية و36 % من تلك الخاصة بالولايات المتحدة. بالنسبة لعدد متزايد من العلماء والاقتصاديين، يعتبر حرق الفحم من أخطر المشكلات البيئية في القرن الحادي والعشرين.

### الايجابيات

- ✓ إنه متوفر بكثرة وغير مكلف.
- ✓ يمكن لتقنية «الفحم النظيف» إزالة المواد الضارة قبل أن تصل إلى البيئة.
- ✓ إمدادات وفيرة (225–900 سنة).
- ✓ إنتاجية عالية من الطاقة الصافية.
- ✓ تقنية متطورة.
- ✓ يمكن تقليل تلوث الهواء من خلال تحسين التقنية.

### السلبيـــات

- ✓ هناك تأثير في البيئة.
- ✓ يمكن أن يلوث الهواء والتربة والمسطحات المائية.
- ✓ ينبعث من حرق الفحم ثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت والمعادن الثقيلة السامة والكادميوم والزرنيخ والزئبق.
- ✓ «الفحم النظيف» ينطوي على تكاليف.
- ✓ مصدر الفحم محدود.
- ✓ تشمل المنتجات الثانوية لتعدين الفحم الزرنيخ وثاني أكسيد الكبريت والسيلينيوم والزئبق.
- ✓ تهديد خطير لصحة الإنسان عند الحرق.
- ✓ التكاليف البيئية غير مدرجة في سعر السوق.
- ✓ إعانات حكومية كبيرة.
- ✓ ارتفاع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون عند إنتاجه وحرقه.

## ■ الطاقـــة الحراريـــة الأرضيـــة

يمكن أن تقود الطاقة الحرارية الأرضية ثورة الطاقة. في حين أننا نحتاج إلى مجموعة من مناهج الطاقة المتجددة، فإن الطاقة الحرارية الأرضية لها مزايا واضحة. إنها أقل تقييداً من خلال تغيير أنماط الطقس مقارنة بمصادر الطاقة الأخرى. إنها مستدامة وتوفر الحد الأدنى من التأثير البيئي. كما أنها أكثر أماناً وخالية من المنتجات الثانوية الخطرة، بخاصة بالمقارنة مع الطاقة النووية.

## الايجابيات

- ✓ مورد قابل للتجديد.
- ✓ تبعث بعض محطات الطاقة الحرارية الأرضية مستويات منخفضة من ثاني أكسيد الكربون، وهو جزء بسيط مقارنةً بالانبعاثات التي تنطلق من محطات الوقود الأحفوري.
- ✓ عظيمة للتدفئة والتبريد.
- ✓ استخدامها لا يحرق الوقود.
- ✓ لها بصمة صغيرة على الأرض.
- ✓ مصدر طاقة موثوق ويمكن التنبؤ به.
- ✓ الطاقة الحرارية الأرضية مفعّلة دائماً ومتاحة دائماً؛ لذا فهي مصدر طاقة موثوق به في الليل، وأثناء الأيام الملبدة بالغيوم، وعندما لا يكون الجو عاصفاً.
- ✓ لها مساحة صغيرة جدّاً على الأرض ولا تسبب تلوثاً ضوضائيّاً.
- ✓ تعد محطات الطاقة الحرارية الأرضية أكثر أماناً – فلن تتعرض لانصهار نووي أو تخلق نفايات نووية تلوث الأرض.
- ✓ يمكن استخدام الطاقة الحرارية الأرضية لتلبية الاحتياجات الكبيرة والصغيرة. يمكنها أن تفعل كل شيء من ذوبان الجليد من الأرصفة وتدفئة المنازل إلى تزويد مناطق بكاملها بالطاقة.
- ✓ البنية التحتية للطاقة الحرارية الأرضية ليست محدودة؛ لأن هناك إمدادات لا نهائية من الطاقة من الأرض.
- ✓ تساعد في حل مشكلة منحني البطة.

### السلبيـــات

- ✓ في الحالات القصوى، قد تتسبب محطات الطاقة الحرارية الأرضية في حدوث زلازل.
- ✓ مستدامة فقط إذا جرى إدارة الخزانات بشكل صحيح.
- ✓ تتطلب محطات الطاقة الحرارية الأرضية استثماراً أوليّاً كبيراً، مع أنها تؤتي ثمارها على المدى الطويل.
- ✓ إن إنتاج الطاقة الحرارية الأرضية ذات درجات الحرارة العالية له احتياجات جغرافية محددة جدّاً، مع أن التقنيات الجديدة مثل EGS والحرارة الأرضية المغلقة تعمل على توسيع نطاق المواقع المحتملة.
- ✓ تتطلب الطاقة الحرارية الأرضية الحفر في الأرض للوصول إلى طاقة الأرض وتسخيرها.

## ■ الطاقـــة الكهرومائيـــة

تأتي الطاقة الكهرومائية من الماء. يستخدم على نطاق واسع وكان مصدراً للطاقة البديلة لسنوات عديدة. لكن، مثل أي مصدر للطاقة، لها إيجابيات وسلبيات:

### الايجابيـــات

- ✓ لا تلوث الماء أو الهواء.
- ✓ موثوقة ومرنة.
- ✓ الطاقة الكهرومائية هي مصدر طاقة متجدد ونظيف لا يطلق التلوث في الهواء.

- ✓ يمكن أن تساعد الطاقة الكهرومائية في تعويض متطلبات الكهرباء التقليدية خلال أوقات الذروة، مما يوفر طاقة حيوية.
- ✓ الطاقة المائية هي مصدر للطاقة أكثر استقراراً من الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح لأنها لا تعتمد على ضوء الشمس أو الرياح القوية.

## السلبيات

- ✓ قد تغير درجة حرارة وتدفق الماء.
- ✓ قد تسبب انخفاض مستوى الأكسجين المذاب في الماء.
- ✓ اضطراب موائل الأنهار وتجمعات الأسماك.
- ✓ قد تنتج غاز الميثان.
- ✓ محطات الطاقة الكهرومائية باهظة الثمن وذات بنية تحتية مكثفة عليك بناء سد وخزان وتوربينات لتوليد الطاقة، الأمر الذي يتطلب رأس مال كبير.
- ✓ هناك مواقع محدودة مناسبة للخزانات ومحطات الطاقة الكهرومائية.
- ✓ الطاقة الكهرومائية لها بعض الآثار الضارة على البيئة لأنها تقطع التدفق الطبيعي لنظام النهر، مما يؤدي إلى مشكلات في جودة المياه وتعطيل للحيوانات والبشر.
- ✓ نظراً لأن توليد الطاقة الكهرومائية يعتمد على مياه الأنهار، يمكن أن يحد الجفاف من كمية المياه المتاحة. مع تسارع تغير المناخ، من المحتمل أن نشهد المزيد من حالات الجفاف.

## الطاقة الشمسية

تقوم الطاقة الشمسية بتحويل الحرارة أو الضوء من الشمس لإنتاج الطاقة. لقد حظيت باهتمام كبير في السنوات الأخيرة، لذلك دعونا نستكشف إيجابيات وسلبيات الطاقة الشمسية.

### الايجابيـــات

- ✓ مصدر وفير ومتجدد ومستدام.
- ✓ لا تلوث الهواء أو الماء.
- ✓ متاحة في جميع أنحاء العالم.
- ✓ ليس لها ضجيج.
- ✓ صيانة منخفضة.
- ✓ الطاقة الشمسية منخفضة الانبعاثات. لها بصمة كربونية منخفضة جدّاً ولا تسبب ضرراً لبيئتنا.
- ✓ الطاقة الشمسية هي مصدر للطاقة المتجددة، لذلك يمكن استخدامها دون «استنفاد» المصدر الأصلي للطاقة، أي الشمس.
- ✓ يمكن إنتاج الطاقة الشمسية واستخدامها في المناطق النائية غير المتصلة بشبكات الطاقة.
- ✓ لا تحوي الألواح الشمسية على أجزاء متحركة ومن ثم لا تصدر ضوضاء (لا تلوث بالضجيج).
- ✓ على المدى الطويل، تقلل الطاقة الشمسية من فواتير الكهرباء.

## السلبيات

- ✓ استثمارات مقدمة عالية.
- ✓ متقطعة.
- ✓ ينتج عن إنتاج الألواح الشمسية سداسي فلورو الإيثان (C2F6) وثلاثي فلوريد النيتروجين (NF3) وسداسي فلوريد الكبريت (SF6)، وهي غازات دفيئة شديدة القوة (استناداً إلى أفق زمني مدته 100 عام، فإن قدرتها على احتجاز الحرارة الزائدة في الغلاف الجوي بمرور الوقت تقريباً 12200؛ 17200؛ و22800 مرة أكثر من ثاني أكسيد الكربون، على التوالي).
- ✓ تتطلب بعض الخلايا الشمسية مواد باهظة الثمن ونادرة، مثل: النحاس الإنديوم الغاليوم سيلينيد (CIGS) والكادميوم تيلورايد (CdTe)
- ✓ تتطلب مساحة كبيرة.
- ✓ تعتمد الطاقة الشمسية على الشمس، لذلك لا يمكن إنتاج الطاقة الشمسية في الليل أو في الأيام الملبدة بالغيوم.
- ✓ إن تخزين الطاقة الشمسية أمر مكلف.
- ✓ تتطلب الطاقة الشمسية مساحة كبيرة؛ هناك حاجة إلى العديد من الألواح الشمسية لالتقاط طاقة كافية لتوفير الطاقة التي نحتاجها.
- ✓ هناك تكلفة كبيرة لشراء الألواح الشمسية.
- ✓ تنتج أقل قدر من الطاقة عندما يحتاج الناس إلى أكبر قدر من الطاقة، في الليل وفي الأيام الملبدة بالغيوم. وهذا ما يسمى بمشكلة منحنى البطة.

## الطاقـــة النوويـــة

مـع انخفـاض عـدد المحطـات النوويـة الجديـدة في السـنوات الأخيـرة، لا تـزال الطاقـة النوويـة توفـر نحـو 20 % مـن الكهربـاء في الولايـات المتحـدة. فيمـا يلـي إيجابيـات وسـلبيات الطاقـة النوويـة:

### الايجابيـــات

- ✓ انبعاثات الكربون ضئيلة.
- ✓ أكثر كفاءة وموثوقية من الوقود الأحفوري.
- ✓ تكلفة تشغيل منخفضة.
- ✓ تنتج الطاقة النووية قدراً كبيراً من الطاقة الناتجة، ويمكن أن تساعد في تقليل الطلب على شبكتنا الكهربائية.
- ✓ بالمقارنة مع طاقة الرياح والطاقة الشمسية، تشغل الطاقة النووية جزءاً أصغر نسبيّاً من الأرض. تشغل مزارع الرياح مساحة أكبر بمقدار 360 ضعفاً، وتستخدم المزارع الشمسية الكبيرة 75 ضعفاً.
- ✓ يطلق الوقود الأحفوري التقليدي مستويات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. ثاني أكسيد الكربون هو السبب الرئيسي لتغير المناخ العالمي. في حين أن الطاقة النووية كهرباء خالية من الكربون.

### السلبيـــات

- ✓ تأثير بيئي كبير.
- ✓ تولد نفايات مشعة.

- ✓ يمكن أن تتسبب الحوادث النووية في آثار صحية خطيرة.
- ✓ ارتفاع تكاليف بدء التشغيل.
- ✓ اليورانيوم مورد محدود غير متجدد.
- ✓ استخدام كميات كبيرة من الماء لإنتاج البخار وتبريد النظام.
- ✓ قد تحوي مياه الصرف من محطات الطاقة على ملوثات.
- ✓ يمكن أن تكون الأعطال في المحطات النووية كارثية. كلنا نتذكر كارثة جزيرة ثري مايل وتشرنوبيل النووية. آثار الانهيار النووي مدمرة وطويلة الأمد.
- ✓ النفايات النووية المشعة خطر بيئي وصحي. يتطلب الأمر تقنية متقدمة للتعامل معها بشكل صحيح، وحتى عندما يجري «تعبئتها بأمان»، فلا يزال من الممكن أن تكون هناك تسريبات تتسبب في أضرار جسيمة.

## ■ طاقة الرياح

تعد طاقة الرياح من أكثر أنواع الطاقة المتجددة شيوعاً. إنها تنمو بسرعة كمصدر بديل للكهرباء، ولكن في حين أن هناك بعض الإيجابيات لطاقة الرياح، إلا أن هناك أيضاً بعض الجوانب والإيجابية والسلبية:

### الايجابيات

- ✓ مصدر طاقة نظيف.
- ✓ طاقة متجددة ومستدامة.
- ✓ الوقود مجاني ومتاح في جميع أنحاء العالم.

- ينتج تلوثًا ضئيلاً للهواء أو الماء. يعتبر تصنيع التوربينات وتركيبها خطوات العملية الوحيدة التي تنبعث منها غازات الاحتباس الحراري.
- لديها كفاءة في استخدام الفراغ.
- إمكانات كبيرة لتزويد المنازل بالطاقة.
- مصدر طاقة متجدد ونظيف. لا تضر البيئة بانبعاثات غازات الاحتباس الحراري، ولن تنفد الرياح على عكس الوقود الأحفوري الذي يتجدد ببطء.
- إن تكلفة التشغيل منخفضة نسبيّاً ولا تتطلب الكثير من الصيانة.
- يمكنها استخدام الأرض بكفاءة، على سبيل المثال، يمكن أيضاً استخدام الأرض التي تحوي على توربينات لأغراض أخرى، مثل الزراعة.

## السلبيات

- تحتاج إلى استثمارات عالية.
- لها تأثيرات بيولوجية.
- قد يكون تركيب توربينات الرياح باهظ الثمن.
- تنتج طاقة الرياح ضوضاء وتلوثاً بصرياً. يمكن أن تكون توربينات الرياح صاخبة جدّاً ولأنها تحتاج إلى أن تُبنى على ارتفاع عالٍ لالتقاط ما يكفي من الرياح، فإنها يمكن أن تعطل المناظر الطبيعية الخلَّابة بخلاف ذلك.
- تقتصر توربينات الرياح على المواقع التي تكثر فيها الرياح، لذا لا يمكن تركيبها في كل مكان. يتطلب نقل طاقة الرياح خطوط نقل مكلفة.

- ✓ طاقة الرياح لا يمكن التنبؤ بها لأنها تحتاج إلى رياح تهب. تحتاج توربينات الرياح إلى مستوى معين من سرعة الرياح لتشغيلها وإنتاج الطاقة، لذلك إذا لم تكن الرياح كافية، فلا توجد طاقة.
- ✓ للأسف، يمكن أن تضر الشفرات من توربينات الرياح وتقتل الطيور والأنواع الأخرى التي تطير بداخلها.

## ■ طاقة المد والجزر

تسخّر طاقة المد والجزر عن طريق تحويل حركة مد وجزر المياه إلى أشكال مفيدة من الطاقة، وبخاصة الكهرباء باستخدام طرائق مختلفة.

### الايجابيات

- ✓ لا تنبعث منها غازات الاحتباس الحراري.
- ✓ قابلة للتجديد.
- ✓ قابلة للتنبؤ.
- ✓ فعالة حتى عند السرعات المنخفضة.
- ✓ طويل العمر الافتراضي.
- ✓ بمثابة حماية ساحلية ضد المد والجزر الخطرة المتولدة أثناء العواصف.

### السلبيات

- ✓ يحتمل أن تكون التأثيرات البيئية مشابهة لتلك التي تحدثها السدود الكهرومائية.

- ✓ هناك قوة متقطعة حيث تتوفر الطاقة لنحو 10 ساعات كل يوم عندما يتحرك المد للداخل أو للخارج.
- ✓ هناك عدد قليل من المواقع المناسبة لقناطر المد والجزر.
- ✓ قد تؤثر في الحركة / الهجرة الطبيعية للأسماك.
- ✓ غير فعَّالة من حيث التكلفة.
- ✓ يجب أن تكون قريبة من الشاطئ.
- ✓ إنها تقنية جديدة وتتطلب مزيداً من البحث وقدراً كبيراً من التمويل.
- ✓ حالياً لا يمكنها أن تتنافس مع طاقة الوقود الأحفوري.
- ✓ يعتبر الخزان عبر مصب النهر باهظ الثمن ويؤثر في منطقة واسعة.
- ✓ تتغير البيئة في المنبع والمصب لبعض المسافة.
- ✓ تعتمد العديد من الطيور على المد والجزر في كشف السهول الطينية حتى تتمكن من إطعامها.
- ✓ مطلوب الحفاظ أنسال السمك.

## ■ طاقة الهيدروجين المستخرج من الميثان

### الايجابيات

- ✓ أرخص من طاقة الهيدروجين من التحليل الكهربائي.

### السلبيات

- ✓ ينبعث منها ثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد النيتروجين وثاني أكسيد الكبريت التي تلوث الهواء.

- ✓ قد يتسرب الميثان إلى الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى ارتفاع تأثير الاحتباس الحراري مقارنة باستخدام ثاني أكسيد الكربون.
- ✓ أقل كفاءة من حرق الميثان.

## ■ طاقة الهيدروجين المستخرج من التحليل الكهربائي

### الايجابيات

- ✓ تقنية منخفضة الكربون إذا كانت الكهرباء المستخدمة في التحليل الكهربائي تأتي من مصادر متجددة ذات انبعاثات منخفضة من ثاني أكسيد الكربون.

### السلبيات

- ✓ أقل كفاءة من البطاريات.
- ✓ تقنية عالية الكربون إذا كانت الكهرباء المستخدمة في التحليل الكهربائي تأتي من الوقود الأحفوري.
- ✓ كفاءة خلايا الوقود 40 % - 60 %.

# دور الذكاء الاصطناعي في صناعة الطاقة

يعمل الذكاء الاصطناعي (AI) المطوّر حديثًا على إعادة تشكيل قطاع الطاقة، وإحداث ثورة في كيفية توليد الطاقة وتوزيعها واستهلاكها. من إدارة الشبكات الذكية إلى التنبؤ بالطاقة المتجددة، وحتى سلامة محطات الطاقة النووية، يعمل الذكاء الاصطناعي على تغيير الطريقة التي تعمل بها صناعة الطاقة بشكل أساسي، ويدفعها نحو مستقبل أكثر كفاءة واستدامة وأمانًا. وسنتعرف فيما يأتي على أفضل عشرة تطبيقات للذكاء الاصطناعي في قطاع الطاقة، ونتعمق في الذكاء الاصطناعي في الطاقة المتجددة، وتخزين الطاقة، والشبكات الذكية، وغير ذلك الكثير.

## ■ الشبكات الذكية

يمكن أن يساعد الذكاء الاصطناعي في إدارة الشبكات الذكية، وهي شبكات إمدادات الكهرباء التي تستخدم تقنية الاتصالات الرقمية لاكتشاف التغيرات المحلية في الاستخدام والتفاعل معها. على سبيل المثال، يمكن لخوارزميات الذكاء الاصطناعي التنبؤ بأنماط الاستهلاك باستخدام البيانات التاريخية وفي الوقت الحقيقي، والتي يمكن أن تساعد المرافق على تخصيص الموارد بشكل أكثر كفاءة.

بنفس الطريقة. يمكن أن يساعد الذكاء الاصطناعي أيضًا في تحسين تخصيص الموارد. على سبيل المثال، خلال الفترات المفاجئة لارتفاع الطلب، يمكن للذكاء الاصطناعي تحسين توزيع الكهرباء، مما يضمن توجيه الطاقة إلى حيث تشتد الحاجة إليها ومنع خطر انقطاع التيار الكهربائي. يمكن للشبكات الذكية المجهزة بالذكاء الاصطناعي اكتشاف الأخطاء أو الاضطرابات في الشبكة أيضًا، مثل فشل المعدات أو انقطاعها. يمكن لخوارزميات الذكاء الاصطناعي

تحديد الموقع الدقيق للمشكلة وإعادة توجيه الطاقة لتقليل انقطاع الخدمة وتقليل وقت التوقف عن العمل وتحسين موثوقية الشبكة.

## ■ إدارة الاستجابة للطلب

تعد إدارة الاستجابة للطلب Demand Response Management (DRM) في قطاع الطاقة استراتيجية حاسمة لتحسين استهلاك الكهرباء وضمان استقرار الشبكة الكهربائية. وهو ينطوي على تعديل استخدام الكهرباء للمستهلكين، وخاصة الكيانات التجارية والصناعية، استجابة لإشارات مشغلي الشبكات أو مزودي الطاقة. تساعد هذه الممارسة على تحقيق التوازن بين العرض والطلب خلال فترات الذروة، وبدء فصل الأحمال لتقليل الضغط على الشبكة، وتجنب الحاجة إلى ترقيات البنية التحتية باهظة الثمن.

يمكن أن يساعد الذكاء الاصطناعي أيضًا في إنشاء رابط تفاعلي بين مقدمي الطاقة والمستهلكين من خلال تمكين الاستجابات في الوقت الفعلي للتحولات في الطلب على الطاقة. ومن خلال التنبؤ بتقلبات الطلب وإدارتها، يمكن للذكاء الاصطناعي تعزيز كفاءة الطاقة وخفض التكاليف والمساعدة في التحول نحو مصادر الطاقة المتجددة.

## ■ الصيانة التنبؤية

باستخدام الذكاء الاصطناعي، يمكن لشركات الطاقة التنبؤ بالوقت المحتمل لتعطل معداتها أو الحاجة إلى الصيانة. يمكن للتعلم الآلي تحليل كميات كبيرة من البيانات من مصادر مختلفة، مثل إحصائيات الاستخدام وبيانات الطقس وسجلات الصيانة التاريخية، للتنبؤ بالأعطال المحتملة قبل حدوثها. يعمل هذا النهج على تقليل وقت التوقف عن العمل، وتقليل تكاليف الإصلاح، وتحسين الموثوقية العامة للبنية التحتية للطاقة.

## التنبؤ بالطاقة المتجددة

يلعب الذكاء الاصطناعي دورًا حاسمًا في التنبؤ بتوليد الطاقة المتجددة. بالنسبة لمصادر مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية، والتي تخضع للتقلب، تقوم خوارزميات الذكاء الاصطناعي بتحليل توقعات الطقس وبيانات التوليد التاريخية والظروف في الوقت الفعلي. وهذا يمكّن مزودي الطاقة من التنبؤ بكمية الطاقة المتجددة المتوفرة، مما يسمح بتوازن أفضل بين العرض والطلب.

## تخزين الطاقة

يعمل الذكاء الاصطناعي على تحسين تخزين وتوزيع الطاقة من المصادر المتجددة. من خلال النظر في عوامل مختلفة مثل الطلب والعرض والسعر وظروف الشبكة، تحدد خوارزميات الذكاء الاصطناعي أفضل الأوقات لتخزين الطاقة، ومتى يتم إطلاقها، ومقدار التوزيع. على سبيل المثال، مصادر الطاقة المتجددة مثل الرياح والطاقة الشمسية متقطعة. ومع ذلك، يسمح تخزين الطاقة بتخزين الطاقة الزائدة المتولدة خلال أوقات الذروة واستخدامها عندما لا تنتج هذه المصادر الكهرباء. وهذا يساعد على جعل مصادر الطاقة المتجددة أكثر موثوقية وأقل اعتمادا على الظروف الجوية. علاوة على ذلك، يعد تخزين الطاقة أمرًا بالغ الأهمية بشكل خاص للمرافق الحيوية مثل المستشفيات ومراكز البيانات وخدمات الطوارئ، حيث يمكن أن يكون الوصول إلى مصدر طاقة احتياطي بمثابة حياة أو موت!

## احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS)

يعزز الذكاء الاصطناعي كفاءة عمليات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه من خلال تحسين احتجاز ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي أو مصادر الانبعاثات. يمكن للأنظمة المعتمدة على الذكاء الاصطناعي تحديد

الطرق الأكثر ملاءمة لاستخدام الكربون المحتجز، سواء للعمليات الصناعية أو التخزين الآمن على المدى الطويل. تلعب هذه التقنية دورًا حيويًا في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة والتخفيف من تغير المناخ.

## ■ تجارة الطاقة

يقوم الذكاء الاصطناعي بتحليل ديناميكيات السوق المعقدة في تجارة الطاقة. فهو يقوم بمعالجة البيانات في الوقت الفعلي حول اتجاهات الأسعار والطلب والعرض، مما يمكّن شركات الطاقة من اتخاذ قرارات تجارية مستنيرة ومربحة.

يتفوق الذكاء الاصطناعي أيضًا في إدارة المخاطر، والتقييم الاستباقي لتقلبات السوق والشكوك. يعمل التداول الخوارزمي الذي ينفذه الذكاء الاصطناعي بسرعة البرق، حيث يتم تنفيذ العديد من الصفقات في أجزاء من الثانية. فهو يعمل على تحسين محافظ الطاقة، ومحاكاة سيناريوهات السوق، وتحليل المشاعر، وأتمتة المهام، والتكيف باستمرار مع ظروف السوق المتغيرة. وعلى هذا النحو، فإن قدرة الذكاء الاصطناعي على تحديد الأنماط والاتجاهات في مجموعات البيانات الكبيرة لا تقدر بثمن في التنقل في سوق الطاقة الديناميكي. وتسمح لها قدراتها الاستثنائية في التعرف على الأنماط باكتشاف فرص السوق والمخاطر التي قد تفلت من أيدي المتداولين البشريين.

## ■ المنازل والمباني الذكية

إن تأثير الذكاء الاصطناعي على المنازل والمباني ليس أقل من كونه تحوليًا في السعي لتحقيق كفاءة الطاقة حيث يحولها الذكاء الاصطناعي إلى أنظمة بيئية موفرة للطاقة. تعمل أجهزة القياس الذكية وأجهزة إنترنت الأشياء بانسجام مع الذكاء الاصطناعي لإنشاء أنظمة بيئية ذكية وسريعة الاستجابة.

تقوم هذه الأنظمة بمراقبة استهلاك الطاقة بشكل مستمر في الوقت الفعلي، مما يسمح للذكاء الاصطناعي باتخاذ قرارات تعتمد على البيانات لتحسين استخدام الطاقة.

فكر في سيناريو يتولى فيه الذكاء الاصطناعي مسؤولية أنظمة التدفئة والتبريد. ومن خلال مراعاة المتغيرات مثل تفضيلات المستخدم، وأنماط الإشغال، وحتى الظروف الجوية في الوقت الفعلي، يمكن للذكاء الاصطناعي ضبط إعدادات درجة الحرارة تلقائيًا. ولا يؤدي هذا إلى تقليل هدر الطاقة فحسب، بل يؤدي أيضًا إلى تحسين كبير في مستوى الراحة بشكل عام.

## ■ التنقيب عن النفط والغاز

إن التحول الذي أحدثه الذكاء الاصطناعي في قطاع التنقيب عن النفط والغاز عميق. ومن خلال تحليل كميات كبيرة من البيانات الجيولوجية بدقة ملحوظة، يمكن للذكاء الاصطناعي تحديد احتياطيات النفط والغاز المحتملة التي ربما لم يتم ملاحظتها باستخدام الطرق التقليدية. علاوة على ذلك، فهو يقيم جدوى هذه الاحتياطيات، ويوجه جهود الاستكشاف نحو الآفاق الواعدة. وهذا لا يعزز الكفاءة فحسب، بل يعزز أيضًا بشكل كبير معدل نجاح أنشطة الاستكشاف، مما يقلل من إهدار الموارد والتكاليف.

بالإضافة إلى ذلك، فإن دور الذكاء الاصطناعي في عمليات الحفر له نفس القدر من التأثير. تقوم النماذج التنبؤية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي بتقييم عوامل مختلفة، بما في ذلك التكوينات الجيولوجية وأداء معدات الحفر والظروف البيئية، لتوقع المخاطر والتحديات المحتملة. ومن خلال القيام بذلك،

يعمل الذكاء الاصطناعي على تمكين فرق الحفر من معالجة المشكلات بشكل استباقي، وتعزيز تدابير السلامة، وتحسين عمليات الحفر، مما يؤدي إلى عمليات أكثر أمانًا وإنتاجية في صناعة النفط والغاز.

## ■ مراقبة محطات الطاقة النووية

توفر الطاقة النووية الآن حوالي 10 % من الكهرباء في جميع أنحاء العالم. تعتبر السلامة أمرًا بالغ الأهمية في محطات الطاقة النووية، ويلعب الذكاء الاصطناعي دورًا حاسمًا في ضمانها. تم تصميم أنظمة الذكاء الاصطناعي للحفاظ على مراقبة يقظة لكل جانب من جوانب عمليات المصنع، والعمل على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع دون تعب. تقوم هذه الأنظمة بتحليل البيانات من أجهزة الاستشعار والأدوات المختلفة بشكل مستمر، وتكشف حتى عن أدنى حالات الشذوذ أو الانحرافات عن معايير السلامة المعمول بها.

من خلال نماذج الصيانة التنبؤية المتقدمة، يتجاوز الذكاء الاصطناعي تحديد المشكلات؛ فهو يتوقع الأعطال المحتملة للمعدات من خلال تقييم البيانات مثل اتجاهات الأداء والتآكل والضغوط التشغيلية. تعمل قدرة الإنذار المبكر هذه على تمكين مشغلي المحطات من اتخاذ إجراءات وقائية ومعالجة المشكلات قبل أن تتصاعد إلى حوادث كبيرة. وبالتالي، فإن دور الذكاء الاصطناعي في محطات الطاقة النووية لا غنى عنه، لأنه يضمن أعلى مستويات الأمان ويساعد في منع وقوع الحوادث مع الحفاظ على توليد موثوق للطاقة النظيفة.

## ما هي تحديات الذكاء الاصطناعي في قطاع الطاقة؟

إن اعتماد الذكاء الاصطناعي في قطاع الطاقة لا يخلو من التحديات.

- أولاً، هناك تكلفة أولية كبيرة مرتبطة بتنفيذ أنظمة الذكاء الاصطناعي ودمجها في البنية التحتية الحالية. يمكن أن تشكل هذه التكلفة عائقًا أمام بعض شركات الطاقة، وخاصة الشركات الصغيرة ذات الميزانيات المحدودة.

- ثانياً، يتعامل قطاع الطاقة مع كميات هائلة من البيانات الحساسة، بما في ذلك معلومات الشبكة، وبيانات العملاء، والتفاصيل التشغيلية. يعد ضمان أمان هذه البيانات أمرًا بالغ الأهمية، ويجب حماية أنظمة الذكاء الاصطناعي من التهديدات والانتهاكات السيبرانية. يضيف الامتثال للوائح خصوصية البيانات، مثل اللائحة العامة لحماية البيانات (GDPR)، طبقة إضافية من التعقيد.

- ثالثاً، علاوة على ذلك، هناك نقص في المتخصصين المدربين في مجال الذكاء الاصطناعي الذين يفهمون قطاع الطاقة وتقنيات الذكاء الاصطناعي. يمكن أن تؤدي ندرة الخبرة إلى إبطاء اعتماد حلول الذكاء الاصطناعي وتطويرها في الصناعة، مما يجعل من الضروري الاستثمار في التعليم والتدريب لسد هذه الفجوة.

- رابعاً، يحمل الذكاء الاصطناعي وعدًا كبيرًا في صناعة الطاقة وسيستمر في لعب دورٍ في تحسين توليد الطاقة وتوزيعها واستهلاكها. يمكننا أن نتوقع حلولاً متطورة تعتمد على الذكاء الاصطناعي تعمل على تحسين كفاءة مصادر الطاقة المتجددة، وتعزيز استقرار الشبكة، والحد من انبعاثات الغازات الدفيئة. ستصبح الشبكات الذكية وإدارة الاستجابة

للطلب أكثر انتشارًا، مما سيمكن المستهلكين من إدارة استهلاكهم للطاقة بشكل فعال. ستؤدي الصيانة التنبؤية إلى تقليل وقت التوقف عن العمل وتعزيز موثوقية المعدات. وسيساهم الذكاء الاصطناعي أيضًا في جهود احتجاز الكربون وتخزينه، مما يساعد في مكافحة تغير المناخ. ومع تقدم التقنية وتزايد اندماج الذكاء الاصطناعي في أنظمة الطاقة، يمكننا أن نتوقع مشهد طاقة أكثر استدامة وكفاءة.

## • تطبيق الذكاء الاصطناعي في عمليات الشركات

لتطبيق الذكاء الاصطناعي بنجاح في عملياتها، يجب على مؤسسات قطاع الطاقة أن تدرك أهمية توظيف المواهب المناسبة. تعتبر تقنيات الذكاء الاصطناعي معقدة وسريعة التطور، وتتطلب قوة عاملة تتمتع بمهارات وخبرات متخصصة في مجالات مثل التعلم الآلي، وعلوم البيانات، وبرمجة الكمبيوتر. مع تزايد اعتماد قطاع الطاقة للحلول المعتمدة على الذكاء الاصطناعي، سيزداد الطلب على مواهب الذكاء الاصطناعي، مما يجعل من الضروري للمؤسسات الاستثمار في توظيف واستبقاء الأفراد المهرة الذين يفهمون تعقيدات الذكاء الاصطناعي والتحديات الفريدة لصناعة الطاقة. ومن خلال القيام بذلك، يمكنهم ضمان التكامل الناجح لتقنيات الذكاء الاصطناعي والبقاء قادرين على المنافسة في مشهد متطور (Fdmgroup, 2024).

## العرض والطلب على الطاقة

لقد حدد استخدام الطاقة بداية الحضارة الإنسانية: عندما أتقن إنسان ما قبل التاريخ استخدام النار للراحة المنزلية والطهي، بدأت الحضارة الإنسانية وتطورت لتصل إلى عصر القاطرة، ومحطة الطاقة النووية، والسيارة، والطائرة، الكمبيوتر الشخصي والإنترنت اللاسلكي. على مر القرون، تطور المجتمع البشري من خلال استخدام الطاقة بشكل متزايد إلى درجة أصبح فيها استهلاك الطاقة ضروريًا لعمل المجتمع المعاصر، وازدهار الأمم وبقاء حضارتنا.

يتم إنتاج الطاقة واستخدامها بأشكال مختلفة: تستخدم الطائرات والسيارات الوقود الهيدروكربوني السائل؛ تقوم محطات الطاقة الكهربائية في المقام الأول بتحويل الطاقة الموجودة في الفحم والغاز الطبيعي والطاقة النووية والطاقة الكهرومائية إلى كهرباء؛ وتستخدم الأسرة المعاصرة الكهرباء والغاز الطبيعي للراحة المنزلية والترفيه وإعداد وجبات الطعام. نظرًا لأن معظم وظائف مجتمعنا تعتمد على استخدام الطاقة، فقد تم تطوير شبكات معقدة لإمدادات الطاقة في القرون الثلاثة الماضية: يتم تغذية المجتمعات بالكهرباء عن طريق خطوط نقل الشبكة الكهربائية ذات الجهد العالي؛ والغاز الطبيعي عن طريق نظام معقد من خطوط الأنابيب، التي تتجاوز الحدود الوطنية؛ وتعبر السفن الناقلة المحيطات يوميًا لتزويد المصافي بالنفط الخام.

إن التأثير الاقتصادي لإمدادات الطاقة وتجارة الطاقة له أهمية قصوى لجميع الدول. تتأثر الأنشطة الجيوسياسية لمعظم الدول الحديثة بشكل كبير بحاجتها إلى إمدادات طاقة ثابتة وآمنة. لقد تم خوض معظم الحروب الحديثة (تلك التي تلت عام 1950م) من أجل السيطرة على إمدادات الطاقة وتأمينها، وقد تم ترسيخ العديد من المعاهدات والاتفاقيات الدولية مع اعتبار موارد الطاقة القضية الأساسية.

## • الطلب على الطاقة

من الصعب أن نتصور المجتمع البشري في القرن الحادي والعشرين دون استخدام الطاقة بأشكالها المتعددة. يعتمد المجتمع الإنساني المعاصر إلى حد كبير على استخدام الطاقة بأشكالها المختلفة. وتتجلى أهمية الطاقة في المجتمع البشري من خلال الحالات التي انقطعت فيها إمدادات الطاقة الكافية: أدى إضراب عمال مناجم الفحم في بريطانيا في شتاء 1973–1974م إلى تعطيل نظام النقل، وتقليص عدد العمال العاملين. من أسبوع إلى أسبوع من ثلاثة أيام، ركود اقتصادي وعدة وفيات، بسبب نقص التدفئة والكهرباء ونقص وسائل النقل.

يستخدم البشر الطاقة بعدة أشكال مختلفة من أجل تشغيل الآلات وإنجاز مهام مختلفة: تستخدم وحدة تكييف الهواء الطاقة الكهربائية لتشغيل الضاغط الخاص بها وتوفير الهواء البارد في مبنى في ميامي، فلوريدا؛ ويتطلب الموقد زيت التدفئة أو الفحم لتسخين الهواء البارد في مصنع في نانجينغ، الصين؛ يستخدم الموقد الغاز الطبيعي لإعداد الطعام في ألمانيا؛ ويستخدم خط تجميع السيارات في اليابان الكهرباء في لحام أجزاء من السيارات والشاحنات؛ تستخدم السيارات والشاحنات والحافلات البنزين أو وقود الديزل في محركات الاحتراق الداخلي لنقل الأشخاص والبضائع؛ تستخدم الطائرات الكيروسين أيضًا لنقل الأشخاص والبضائع.

إن المجتمع البشري الحديث يحتاج إلى إنجاز مثل هذه المهام، لأن الآلة التي تقوم بهذه المهام تعمل بالطاقة فقط. مكيف الهواء، وفرن مصنع الأسمنت، ومعدات اللحام في حوض بناء السفن، وقاطرة القطار التي تنقل الطعام إلى المدينة، والسفينة التي تنقل البضائع بين القارات، كلها تعمل لأنها تستخدم

أشكالًا مختلفة من الطاقة. وفي غياب إمدادات الطاقة، لن تعمل هذه المعدات ولن يتم تنفيذ المهام المجتمعية: عندما لا يكون لدى السفن وقود، لا يتم شحن المواد الغذائية ويتعفن في الموانئ؛ فعندما لا تتوفر الكهرباء في المصنع، لا يتم تصنيع السيارات ليتم بيعها فيما بعد؛ مع ندرة وقود التدفئة، تصبح المنازل في برلين شديدة البرودة في شهر يناير ولا يتمتع السكان بالراحة المنزلية المتوقعة؛ بدون تكييف الهواء، يكون العمل صعبًا للغاية خلال أشهر الصيف في فورت وورث بولاية تكساس وتعاني الإنتاجية؛ وبدون الكيروسين للطائرات أو البنزين للسيارات، لا تجتمع العائلات مرة أخرى في العطلات (Michaelides, 2012).

يتم الطلب على الطاقة بأشكال مختلفة، أهمها: الكهرباء، والوقود الغازي، والوقود السائل، والوقود الصلب. يتزايد الطلب العالمي على الطاقة باستمرار منذ الثورة الصناعية ويتأثر بعاملين:

## ♦ زيادة عدد سكان العالم

تزايد الطلب على الطاقة للفرد مع تحول المجتمعات الزراعية والأقل ثراء إلى مجتمعات صناعية وأكثر ثراء.

وبشكل عام، كلما كان المجتمع أكثر ثراءً كلما زاد استهلاك الفرد من الطاقة. ويشتري مواطنو الدول الأكثر ثراءً، كمجموعة، المزيد من السلع الاستهلاكية كثيفة الاستهلاك للطاقة؛ استخدام وسائل النقل الخاصة بشكل متكرر والسفر أكثر؛ ويتمتعون بمستويات أعلى من الراحة كثيفة الاستهلاك للطاقة في منازلهم.

إن مواطني الدول الغنية يستهلكون المزيد من الطاقة ويعيشون لفترة أطول كما يوضح الرقمان الأخيران. ويمكن للمرء أيضًا إنشاء علاقة السبب والنتيجة من خلال النظر إلى استخدام الطاقة منذ بدايات البشر: كان على البشر في عصور ما قبل التاريخ القيام بكل شيء. المهام في حد ذاتها. ونتيجة لذلك،

تظهر حفريات عظامهم قدرًا كبيرًا من «البلى والتمزق»، وكان متوسط العمر المتوقع لهم حوالي 20 عامًا.

وقد اتبعت بلدان مجموعة منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية أنماطاً تنموية مماثلة في الماضي عندما كانت في مراحل التنمية المبكرة، ومن المرجح أن تتبعها معظم البلدان النامية. إن رغبة جميع الدول واتجاهها إلى أن تصبح أكثر ثراءً والزيادة الهائلة في استهلاك الطاقة التي أعقبت ذلك كان لها آثار كبيرة جدًا على إجمالي نمو استهلاك الطاقة في العالم (Michaelides, 2012).

## ♦ إمدادات الطاقة

يجب تلبية الطلب على الطاقة كإجمالي من خلال إمدادات الطاقة العالمية. وبما أن القوانين الطبيعية تنص على أن الطاقة لا تفنى ولا تفنى، فإن كل الطاقة المستهلكة يجب أن تنتج من مصادر الطاقة الموجودة في البيئة الطبيعية. مصادر الطاقة الطبيعية هي:

- ♦ الوقود الأحفوري، مثل الفحم بأشكاله المختلفة والنفط الخام والغاز الطبيعي.
- ♦ الوقود النووي مثل اليورانيوم والثوريوم.
- ♦ أشكال الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية والطاقة الحرارية الأرضية والأمواج والطاقة الكهرومائية.

أول شكلين من الطاقة هما في الأساس معادن تشكلت منذ عدة آلاف من السنين. تتم عمليات تكوينها على مدى فترات زمنية طويلة جدًا (الفترات الجيولوجية). ونظرًا لأن هذه المعادن قد لا تتكاثر بشكل طبيعي في المستقبل المنظور، فسوف يتم استنفادها في مرحلة ما في المستقبل. أما الفئة في البند الثالث فتمثل أشكال الطاقة

المتجددة التي تتكرر ولا تنضب. قد تتوقع البشرية أن تستمر أشكال الطاقة هذه في توفير الطاقة للبشر في المستقبل المنظور والبعيد.

يحتاج المجتمع البشري إلى الطاقة بأشكال مختلفة، مثل الكهرباء ووقود النقل والغاز الطبيعي وما إلى ذلك. واعتمادًا على شكل الطاقة التي توفرها، نميز مصادر إمدادات الطاقة على النحو التالي:

- الطاقة الأولية تشمل أشكال الطاقة التي يتم استهلاكها بشكل مباشر كما هي موجودة في الطبيعة دون أي معالجة. ومن بين هذه الأشكال الأنماط المختلفة للفحم والنفط الخام والغاز الطبيعي والطاقة الهيدروليكية والطاقة الشمسية السلبية.

- يتم استخدام أشكال الطاقة الثانوية من قبل المستهلكين في شكل مكرر ومعالج. المنتجات البترولية السائلة المشتقة من النفط الخام مثل البنزين والديزل والكيروسين. الوقود من الكتلة الحيوية. وقود الديزل الحيوي. طاقة تجميع الطاقة الشمسية والطاقة الحرارية الأرضية هي من بين أشكال الطاقة الثانوية.

- تتضمن أشكال الطاقة الثلاثية واحدًا أو أكثر من تحولات الطاقة. الطاقة الكهربائية، بأي طريقة يتم إنتاجها، هي شكل ثالث للطاقة. تساهم الطاقة النووية وطاقة الرياح ومعظم مصادر الطاقة المتجددة الأخرى عند استخدامها لإنتاج الكهرباء في توفير الطاقة الثالثة. وبشكل عام، فإن التحولات المؤدية إلى إنتاج الطاقة الثلاثية تنطوي على نسبة كبيرة من التبدد، والتي يحكمها القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

# وسائل تخزين الطاقة

في بداية القرن الحادي والعشرين، يستخدم مجتمعنا في الغالب الطاقة التي تراكمت لآلاف السنين: لقد خزن الوقود الأحفوري في مركباته الكيميائية كميات هائلة من الطاقة، والتي نستخدمها الآن لتلبية احتياجاتنا الأولية من الطاقة، لسوء الحظ، بمعدل كبير للغاية. معدل مرتفع لا يمكن استمراره. فعندما ينضب الوقود الأحفوري أو عندما يتم تقليص استخدامه بسبب العوامل البيئية، مثل إنتاج الغازات المسببة للانحباس الحراري العالمي، فسوف يضطر البشر إلى الاعتماد بشكل أكبر على مصادر الطاقة البديلة، ومن بينها الطاقة النووية وطاقة الرياح والطاقة الشمسية.

على سبيل المثال، خلال ساعات الليل من يوم 17 يوليو، عندما يكون الطلب مرتفعًا على تكييف الهواء والكهرباء في نصف الكرة الشمالي، لا توجد شمس ويكون متوسط طاقة الرياح أقل بكثير من المتوسط. إذا اعتمد المجتمع على مصادر الطاقة البديلة ولم تتوفر الطاقة المخزنة خلال هذه الليلة، فسيعاني الإنسان من نقص كبير في الطاقة مع ما يترتب على ذلك من إزعاج. ومع تحرك المجتمع البشري أكثر نحو مصادر الطاقة البديلة، أصبحت الحاجة إلى تخزين الطاقة واضحة وأكثر حدة من أجل تلبية الطلب المتقلب على الطاقة.

## • الطلب على الكهرباء

أن الطلب المجتمعي على الكهرباء ليس ثابتا، بل يتعرض لتقلبات يومية وأسبوعية وموسمية بشكل عام، يكون استهلاك الكهرباء أعلى نهارًا وينخفض أثناء الليل، وبما أنه لا يمكن تخزين الكهرباء، يجب تلبية جميع الطلب على الطاقة الكهربائية على الفور تقريبًا من جانب العرض من خلال محطات الطاقة الكهربائية المرتبطة بشبكة الكهرباء. ونتيجة للتقلبات المتكررة والواسعة

في الطلب على الطاقة، يجب أن تكون محطات توليد الطاقة قادرة على تلبية تقلبات الطلب بشكل مرضي وتوفير الطاقة للمستهلكين. ولهذا السبب، فإن جميع محطات الطاقة لا تعمل بشكل مستمر، وعندما تعمل فإنها غالبًا ما تعمل بقدرة منخفضة وليس بكامل طاقتها. هناك العديد من العوامل التي تميز قدرة محطة توليد الكهرباء على تلبية الطلب على الطاقة الكهربائية وهي:

- القدرة المقدَّرة هي الطاقة الاسمية التي قد ينتجها المصنع.
- تكون قدرة الذروة قريبة من الطاقة المقدرة، واعتمادًا على نوع المحطة وتوافر مياه التبريد، قد تكون أعلى أو أقل ببضع نقاط مئوية من الطاقة المقدرة.
- متوسط القدرة، وهو متوسط يتم أخذه عادة خلال فترة سنة.
- عامل التوفر هو جزء من الوقت الذي تكون فيه المحطة في وضع التشغيل ويمكن أن يساهم في الطلب على الطاقة الكهربائية، بغض النظر عن المستوى الذي تساهم به.
- عامل تشغيل الطاقة أو عامل قدرة المحطة هو نسبة إجمالي الطاقة الكهربائية المولدة إلى إجمالي القدرة على توليد الطاقة خلال فترة زمنية. وهذا يأخذ في الاعتبار تقلبات الطاقة المنتجة خلال فترة معينة.

**العامل الأول:** يعتمد عامل توفر محطات الطاقة بشكل كبير على نوعها وتصميمها: محطات الطاقة البخارية الكبيرة التي تعمل بدورة بخارية، مثل محطات الطاقة النووية والفحم قد تتضرر إذا تم تشغيلها وتوقفها كثيرًا (خرجت عن الخط) ويجب البقاء في العمل لفترات طويلة من الزمن. قد تعمل بعض محطات الطاقة هذه بقدرة منخفضة بدلاً من الطاقة القصوى لفترات طويلة. محطات الطاقة الصغيرة، خاصة تلك التي تعمل بدورة برايتون الغازية ما يسمى توربينات الغاز قد يتم إدخالها وإخراجها من الخط في كثير من الأحيان،

وتكون مناسبة للاستخدام لتلبية التقلبات عالية التردد للطلب على الطاقة الكهربائية. يعتمد توفر محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والأمواج بشكل كبير على توفر الموارد المعنية: وحدة الطاقة الشمسية لا تنتج أي طاقة أثناء الليل، وتوربينة الرياح تكون بلا حراك في حالة عدم وجود رياح، ومحرك يعمل بواسطة الأمواج، لا تنتج أي قوة خلال البحار الهادئة.

**العامل الثاني:** الذي يؤثر على توفر محطة توليد الكهرباء هو التكلفة التشغيلية للمحطة، والتي تعتمد في المقام الأول على تكلفة الوقود. يتم إيقاف تشغيل الوحدات الباهظة الثمن لإنتاج الكهرباء في كثير من الأحيان، في حين تعمل الوحدات التي تنتج الطاقة بتكلفة أقل طالما كان ذلك ممكنًا. من ناحية الطاقة المولدة لكل كيلوغرام من الوقود (على سبيل المثال كيلوواط ساعة / كيلوغرام من الوقود)، فإن الوقود النووي والفحم أقل تكلفة من أنواع الوقود الأخرى. وبالتالي، تُستخدم عادةً محطات الطاقة النووية ومحطات الطاقة الكبيرة التي تعمل بالفحم في إنتاج الكهرباء. إن توفرها أعلى من توفر محطات توليد الطاقة بالغاز، التي تستخدم وقودًا أكثر تكلفة من حيث كيلوواط ساعة من الطاقة الكهربائية المنتجة لكل وحدة عملة ($) من تكلفة الوقود، تنقسم محطات توليد الطاقة إلى الفئات التالية:

## ■ محطات التحميل الأساسي

وهي وحدات كبيرة وفعالة للغاية تعمل بدورات رانكين، وبشكل عام، تستخدم الوقود النووي أو الفحم. وتعمل هذه الوحدات بشكل شبه مستمر، باستثناء فترات الصيانة. خلال فترات انخفاض الطلب (مثل الليالي) يتم تقليل حملها في حدود 50–70 % من الطاقة المقدرة، ولكن لا يتم إخراج المحطات من النظام. تقترب نسبة عامل تشغيل الطاقة النموذجية لهذه المحطات من 75%.

## المحطات المتوسطة أو الدورية

والتي عادة ما تكون وحدات بخارية أقدم وأقل كفاءة أو وحدات دورة غازية مصممة خصيصًا ليتم إدخالها وإيقافها في كثير من الأحيان نسبيًا، ولها عامل تشغيل الطاقة في النطاق 25–50% وعادة ما تأتي في الخط وتوفر الطاقة خلال النهار.

## ذروة الطاقة أو محطات الذروة

تم تصميمها لتكون متصلة وغير متصلة بالإنترنت في كثير من الأحيان، وأحيانًا مرتين أو ثلاث مرات خلال يوم واحد. وهي عادةً عبارة عن وحدات دورة برايتون تعمل بالوقود السائل أو الغازي أو الديزل أو الغاز الطبيعي. تعد الطاقة الكهربائية المنتجة من وحدات الذروة أكثر تكلفة من تلك الناتجة عن الوحدات النووية أو الفحم. تنتج وحدات الذروة كمية صغيرة نسبيًا من الطاقة الكهربائية بمتوسط تكلفة أعلى، ولكنها مهمة جدًا لأنها تمكن المنشأة من تلبية طلب الذروة لعملائها. قد تكون وحدات الذروة قيد التشغيل لمدة لا تزيد عن ساعتين خلال الأسبوع ويكون عامل تشغيل الطاقة الخاص بها في حدود 5–15%.

### الأهداف الرئيسية لشركات إنتاج الكهرباء (المرافق العامة) هي:

- تلبية الطلب.
- إنتاج الطاقة الكهربائية بأقل تكلفة.
- نظرًا لأن وحدات الذروة تنتج طاقة كهربائية أكثر تكلفة، فإن هذه الشركات تتبع أساليب إدارة الطاقة التي تقلل من إنتاج الطاقة من وحدات الذروة الأكثر تكلفة.

**ومن بين الطرق المستخدمة حاليًا لإدارة الطاقة المنتجة ما يلي:**

- دمج العديد من المناطق الجغرافية في الشبكة الكهربائية حيث يحدث ذروة الطلب في أوقات مختلفة.
- فرض أسعار أعلى على المستهلك مقابل ذروة الطاقة وتزويد الأسر بالعدادات الذكية التي تكشف عن السعر الذي يتحمله المستهلك. وبطبيعة الحال، فإن غالبية المستهلكين يقلصون طلبهم على الطاقة خلال الفترات التي يكون فيها سعر الطاقة مرتفعا، وذلك عن طريق الحفاظ على الطاقة أو إيقاف تشغيل الأجهزة التي يمكن استخدامها في وقت آخر.
- تحويل الطلب بمقدار 10–15 دقيقة، وذلك عن طريق تأخير بدء تشغيل الأجهزة التي تستهلك كميات كبيرة من الطاقة. ويتحقق ذلك عندما تتحكم شركة إنتاج الطاقة الكهربائية عن بعد في الوحدات ذات الطاقة العالية (مثل وحدات تكييف الهواء، ووحدات التبريد الصناعية، وما إلى ذلك) وتقوم بالترتيب لتشغيلها بشكل متدرج بطريقة تجعل الطلب على الطاقة سلسًا عبر المنطقة المزودة بالكهرباء. عندما يكون التحول قصيرًا (10–15 دقيقة)، يكون تأثير هذه الممارسة على المستهلك غير محسوس تقريبًا.
- استخدام الوحدات ذات التكلفة التشغيلية المنخفضة طوال الوقت كوحدات تحميل أساسية والسماح بتشغيل الوحدات الأكثر تكلفة فقط عند الضرورة.
- قم ببناء وحدات أصغر ومنخفضة التكلفة الرأسمالية كوحدات ذروة، على الرغم من أن تكلفة الوقود لمحطات الطاقة هذه أكثر تكلفة.

- استخدم أنظمة تخزين الطاقة لإنتاج الطاقة بتكلفة منخفضة واستخدمها لاحقًا عندما يصل الطلب إلى ذروته.

إن الاعتماد الكلي أو حتى المتزايد للغاية على هذين المصدرين سيؤدي إلى نقص طويل الأمد في الطاقة وهو أمر غير مقبول للمجتمع. ولذلك، فإن زيادة قدرة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بشكل كبير من خلال بناء المزيد من وحدات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في حد ذاتها، لن تحل أيًا من مشاكل الطاقة اليوم، إلا إذا كانت مصحوبة ببناء أنظمة تخزن هذه الطاقة لاستخدامها لاحقًا. مع أنظمة تخزين الطاقة، يمكن تخزين بعض الطاقة المنتجة خلال أمسية عاصفة في الربيع أو خلال يوم صيفي مشمس لاستخدامها خلال ليلة الصيف الخالية من الرياح. ومن هنا أصبحت أنظمة تخزين الطاقة وتخزينها ذات أهمية كبيرة في زيادة الاستفادة من مصادر الطاقة البديلة المتقطعة والدورية مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية وطاقة المد والجزر والأمواج. ومن الأنظمة الأكثر استخدامًا لتخزين الطاقة: الأنظمة الكهروميكانيكية والحرارية والكيميائية.

## • تخزين الهيدروجين

تمت الدعوة إلى الهيدروجين باعتباره وسيلة تخزين طاقة صديقة للبيئة وقوية جسديًا. ويمكن تلخيص مزايا استخدام الهيدروجين كوسيلة لتخزين الطاقة على النحو التالي:

- إنه أخف العناصر، والطاقة الكيميائية المحددة المخزنة في الهيدروجين (142.700 كيلوجول/كغ في الظروف المحيطة مقابل 49.500 كيلوجول/كغ للأوكتان) أعلى من معظم المواد الأخرى. على أساس حجمي، يمكن للهيدروجين الغازي المضغوط أن يخزن عدة أضعاف الطاقة المخزنة في الهواء المضغوط: عند ضغط 20 بار، يخزن 1 متر مكعب من الهيدروجين 229

ميجا جول من الطاقة في شكل كيميائي، بينما يخزن 1 متر مكعب من الهواء عند نفس الضغط يخزن فقط 6.0 ميجا جول من الطاقة المتاحة على شكل طاقة من الهواء المضغوط. عند ضغط 700 بار، سيخزن 1 متر مكعب من الهيدروجين 8010 ميجا جول والهواء المضغوط 459 ميجا جول فقط.

- إنه مركب جزيئي مستقر ولا يتغير شكله إذا تم تخزينه. وهذا يعني أنه يمكن استخدامه بعد فترة طويلة.
- إنه يتحد بسهولة مع الأكسجين لتكوين الماء، وهو غير ضار.
- إنه متوافر بكثرة على سطح الأرض ويمكن إنتاجه بسهولة واقتصادية نسبيًا عن طريق التحليل الكهربائي للماء.
- إنه هو غير ضار بالبيئة في حالة إطلاقه ولا يشكل أي خطر على صحة الإنسان.
- يمكن استخدامه بسهولة في خلايا الوقود ذات كفاءة التحويل العالية.
- قد تم استخدامه لفترة طويلة كمادة صناعية وكوقود دفع في المكوك الفضائي وأنواع عديدة من الصواريخ. هناك خبرة كبيرة في تخزينها والتعامل معها.

للهيدروجين أيضًا عدة عيوب باعتباره وسيلة لتخزين الطاقة: فهو في البداية قابل للاشتعال والانفجار، وبالتالي، يجب الاحتفاظ به في حاويات خاصة ونقله تحت ظروف خاضعة للتحكم الجيد. بسبب محتواه العالي من الطاقة النوعية وانتشاره العالي، يشكل الهيدروجين خليطًا قويًا متفجرًا مع الهواء. ولهذا السبب، يجب أن تكون حاويات أو خطوط أنابيب الهيدروجين مصممة بشكل جيد لتجنب التسرب الكبير والاختلاط بالهواء. نظرًا لأن الهيدروجين هو أخف العناصر، فإن كثافته منخفضة جدًا في الظروف الجوية (0.08 كغ/متر مكعب مقابل 1.2 كغ/متر مكعب للهواء).

ويجب استخدام ضغوط عالية أو حاويات كبيرة جدًا لتخزين كتلة كبيرة من هذا الغاز. بالاضافة إلى ذلك نظرًا لأن جزيء الهيدروجين خفيف جدًا، فقد ينتشر الهيدروجين عبر مصفوفة عدة معادن بما في ذلك الفولاذ. عندما ينتشر الهيدروجين عبر المصفوفات المعدنية فإنه يسبب تقصف الهيدروجين ونزع الكربنة. يحدث تقصف الهيدروجين (أو حفر الهيدروجين) عندما تنتشر ذرات الهيدروجين عبر المصفوفة المعدنية وتتراكم في شقوق صغيرة جدًا. يؤدي تراكم الغاز في ما يسمى بـ «الفراغات» في المصفوفة المعدنية إلى خلق ضغط داخلي مرتفع، وانخفاض الليونة وقوة أقل للمعدن.

قد تنتشر الشقوق الموجودة في المصفوفة المعدنية بسهولة وتنفتح تحت ضغط داخلي منخفض نسبيًا لتحرير الهيدروجين المخزن. إن إزالة الكربنة من الفولاذ هي نتيجة أخرى لانتشار الهيدروجين: تتحد ذرات الهيدروجين مع الكربون في حدود الحبوب والفراغات في مصفوفة الفولاذ لإنتاج الميثان. لا ينتشر هذا الغاز عبر المصفوفة المعدنية. يتراكم في الشقوق ويسبب ضغطًا داخليًا محليًا أعلى بكثير، مما يؤدي إلى انتشار الشقوق وتكسر المعدن. تحدث عملية مماثلة مع سبائك النحاس التي تحتوي على الأكسجين: يتحد الهيدروجين المنتشر مع الأكسجين ويشكل الماء (البخار) الذي يتراكم في المصفوفة المعدنية ويؤدي إلى ارتفاع الضغط. في كثير من الأحيان، تسمى هذه العملية بالتقصف البخاري وتؤدي إلى انخفاض كبير في قوة الحاوية النحاسية. على الرغم من عيوب الهيدروجين كوسيلة لتخزين الطاقة، فإن قدرة تخزين الطاقة العالية لهذه المادة الكيميائية بالإضافة إلى وفرتها على سطح الأرض والطريقة السهلة نسبيًا لإنتاجها عن طريق التحليل الكهربائي، تجعل من هذا الغاز وسيلة تخزين طاقة قابلة للاستخدام للغاية. سوف تتطور المواد المحسنة والطلاءات المعدنية مع طرق التخزين والنقل المحسنة في المستقبل. وهذا من شأنه أن يتيح الاستخدام المكثف للهيدروجين كوسيلة لتخزين الطاقة (Michaelides, 2012).

## • خلايا الوقود

تعد خلايا الوقود جزءًا لا يتجزأ من التحول إلى الاقتصاد الهيدروجيني، لأنها توفر تحويلاً مباشرًا للطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية، وهو أمر مريح وذو كفاءة عالية جدًا. تشبه خلايا الوقود البطاريات، ولكنها أنظمة ديناميكية حرارية مفتوحة، ويمكن أن تعمل بشكل مستمر. ويتم إمدادها بشكل مستمر بالوقود السائل والمواد المؤكسدة، ولا تعد أقطابها الكهربائية جزءًا من عملية التفاعل، وبالتالي لا تحتاج إلى إعادة توليدها أو إعادة شحنها. على الرغم من أن خلايا الوقود تم اختراعها قبل قرن تقريبًا من ظهور محرك الاحتراق الداخلي، في عام 1802م على يد السير همفري ديفي، واستخدمت في تشغيل الجرار في وقت مبكر من عام 1839م على يد السير ويليام جروف، إلا أنها لم تستخدم على نطاق واسع في العمليات العملية. هذا، على الرغم من المزايا الديناميكية الحرارية والبيئية المتميزة التي تقدمها لتحويل الطاقة.

بشكل عام يتم تزويد خلايا الوقود بالوقود والمادة المؤكسدة، والتي عادة ما تكون الهواء عند الضغط الجوي. تم اقتراح استخدام عدة أنواع من الوقود، بخلاف الهيدروجين. وقد وجد الباحثون أنه ستكون هناك حاجة إلى العديد من خلايا الوقود المتسلسلة لإنتاج فرق كبير في الجهد، وهذا أحد العيوب الرئيسية لأنظمة خلايا الوقود: تشغيل عدد كبير جدًا من خلايا الوقود على التوالي أو وجود تيارات عالية جدًا من شأنه أن يزيد بشكل كبير من الخسائر الكهربائية لأنظمة خلايا الوقود.

### ■ خلايا الوقود ذات الحرارة العالية

يتم تحقيق قيم أعلى للجهد المنتج مع خلايا الوقود من خلال وجود عدة خلايا وقود في سلسلة، أو «مداخن». عادة، تكون خلايا الوقود في أكوام من 20

إلى 30 وحدة، والتي توفر جهدًا تشغيليًا قريبًا من 30 فولت. يتم ربط خلايا الوقود عن طريق الوصلة البينية، والتي تكون إما طبقة معدنية أو سيراميكية تربط الخلايا الفردية. تتمثل وظيفة التوصيل البيني في توصيل كل خلية وقود على التوالي، بحيث يمكن إضافة الجهد الذي تولده كل خلية. نظرًا لأن الوصلة البينية تتعرض لكل من الجانب المؤكسد والجانب المختزل للخلية عند درجات حرارة عالية، فيجب أن تكون مادة مستقرة للغاية. تم استخدام المواد الخزفية وكذلك المعادن كمواد مترابطة. تتمثل إحدى طرق زيادة جهد خلية الوقود الفردية في تشغيل الخلية عند درجة حرارة أعلى من درجة الحرارة المحيطة: $\Delta G^{o}$ هي دالة قوية لدرجة الحرارة وهناك العديد من التفاعلات التي يكون فيها الحد الأقصى للجهد عند درجات حرارة مرتفعة أعلى بكثير من الجهد في الظروف المحيطة. ومن المزايا الإضافية لخلايا الوقود هذه أن معدلات جميع التفاعلات الكيميائية تكون أسرع عند درجات الحرارة المرتفعة. وهذا يعني أن الطاقة التي تنتجها الخلايا ذات درجة الحرارة المرتفعة قد تكون أعلى بكثير من الطاقة التي تنتجها نفس الخلايا في درجة الحرارة المحيطة.

يعد اللانثانيوم والسترونتيوم والمنجنيت (LSM) أحد مواد الكاثود التي يتم استخدامها بشكل متكرر لخلايا الوقود ذات درجة الحرارة المرتفعة، كما أن الزركونيا المستقرة من الإيتريا الممزوجة بمعدن النيكل للحصول على موصلية عالية هي مادة أنود شائعة الاستخدام. تفاعل الأكسدة الذي يحدث بين الوقود وأيونات الأكسجين ينتج الماء والكهرباء. إذا كان الوقود هيدروجين، فإن الماء هو الناتج الوحيد للتفاعل. ومع ذلك، إذا كان الوقود عبارة عن هيدروكربون، فيمكن استخدام خلية وقود ذات درجة حرارة عالية لإنتاج الهيدروجين.

# الحفاظ على الطاقة وكفاءتها

يمكن تحويل الطاقة بين أشكال مختلفة وبكفاءات مختلفة. تسمى العناصر التي تتحول بين هذه الأشكال محولات الطاقة. تشمل أمثلة محولات الطاقة البطارية (من الطاقة الكيميائية إلى الطاقة الكهربائية)، والسد (من طاقة الجاذبية الكامنة إلى الطاقة الحركية للمياه المتحركة (وشفرات التوربينات) وفي النهاية إلى الطاقة الكهربائية من خلال مولد كهربائي)، والحرارة المحرك (من الحرارة إلى العمل). تشمل أمثلة تحويل الطاقة توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الحرارية عبر توربين بخاري، أو رفع جسم ضد الجاذبية باستخدام الطاقة الكهربائية التي تقود محرك الرافعة. يؤدي الرفع ضد الجاذبية إلى إجراء عمل ميكانيكي على الجسم ويخزن طاقة الجاذبية الكامنة في الجسم. هناك حدود صارمة لمدى كفاءة تحويل الحرارة إلى عمل في عملية دورية، على سبيل المثال. في المحرك الحراري، كما وصفته نظرية كارنو والقانون الثاني للديناميكا الحرارية. ومع ذلك، يمكن لبعض تحولات الطاقة أن تكون فعالة للغاية.

غالبًا ما يتم تحديد اتجاه التحولات في الطاقة (أي نوع من الطاقة يتحول إلى أي نوع آخر) من خلال اعتبارات الإنتروبيا (الطاقة المتساوية المنتشرة بين جميع درجات الحرية المتاحة). من الناحية العملية، يُسمح بجميع تحولات الطاقة على نطاق صغير، ولكن لا يُسمح ببعض التحولات الأكبر لأنه من غير المرجح إحصائيًا أن تتحرك الطاقة أو المادة بشكل عشوائي إلى أشكال أكثر تركيزًا أو مساحات أصغر.

تتميز تحولات الطاقة في الكون مع مرور الوقت بأنواع مختلفة من الطاقة الكامنة، والتي كانت متاحة منذ الانفجار الكبير، والتي يتم «تحريرها» (تحويلها إلى أنواع أكثر نشاطًا من الطاقة مثل الطاقة الحركية أو الإشعاعية) عند توفر آلية التحفيز. تشمل الأمثلة المألوفة لهذه العمليات التخليق النووي، وهي عملية تستخدم في نهاية المطاف طاقة الجاذبية الكامنة المنبعثة من انهيار الجاذبية للمستعرات الأعظمية «لتخزين» الطاقة في تكوين النظائر الثقيلة (مثل اليورانيوم والثوريوم)، والتحلل النووي، وهي عملية يتم فيها يتم إطلاق الطاقة التي كانت مخزنة في الأصل في هذه العناصر الثقيلة، قبل دمجها في النظام الشمسي والأرض. يتم إطلاق هذه الطاقة وإطلاقها في القنابل الانشطارية النووية أو في توليد الطاقة النووية المدنية. وبالمثل، في حالة الانفجار الكيميائي، تتحول طاقة الوضع الكيميائي إلى طاقة حركية وحرارية في وقت قصير جدًا.

# الاستثمار في الطاقة

يعد قطاع الطاقة قطاعًا معقدًا للغاية ومتناميًا للاستثمار. يوضح الاستثمار في الطاقة العديد من التطورات التي تستحق الدراسة والمراجعة من قبل المهتمين بمعرفة المزيد عن الطاقة والاستثمار فيها. ويتطلب الاستثمار في الطاقة معرفة الاعتبارات المالية اللازمة لتقييم وتقدير التدفق النقدي وبنية رأس المال ودور أسواق رأس المال عبر عدد لا يحصى من شركات قطاع الطاقة. ومن ثم امتلاك المقدرة على تقييم المشهد المعقد لتسعير كافة أنواع الطاقات وتقلباتها في أسواق السلع الأساسية.

ويدخل الاستثمار في الطاقة بتقييم الوضع الحالي لقطاع الطاقة في مختلف الأسواق العالمية. لذلك لابد للمستثمر في مجال الطاقة الاطلاع على أحدث التطورات في مجال الطاقة الشمسية والطاقة الكهربائية المائية والطاقة النووية والكهرباء الحرارية الأرضية وطاقة الرياح، وكذلك معرفة التطورات في مجال الطاقة الخضراء مثل الوقود الحيوي والإيثانول. وذلك حتى يتمكن من تحليل مختلف الأسواق العالمية الأخرى للتأكد من التحديات وربما بعض الفرص في كافة مجالات الطاقة. وبذلك يمكننا أن ندرك أن مفهوم سياسة الطاقة يعد بمثابة ضرورة استراتيجية واقتصادية للسيادة.

## • اعتبارات تكلفة الاستثمار في الطاقة

تصاعدت التكاليف المرتبطة ببناء محطة للطاقة النووية أو المشروع المائي. واليوم، لا توجد أي شركة طاقة تقريباً قد تفكر في بناء أو متابعة مشروع كبير للبنية التحتية بمفردها. الاتحادات هي أمر اليوم وسوف تستمر على المدى الطويل. وفي حين أن شركات الطاقة الكبيرة تميل إلى الوصول إلى أسواق رأس المال والموارد المالية الكبيرة، فقد أصبحت الشراكة ضرورة اقتصادية، وإلى حد

ما، مالية وتشغيلية لمشاريع الطاقة ذات البنية التحتية واسعة النطاق. يتطلب تطوير المصافي أو بناء خطوط الأنابيب أو مشاريع الطاقة البديلة موارد مالية كبيرة بحيث تتعاون العديد من الشركات لإدارة المخاطر وتقاسم التكاليف. يتم تقييم كل مشروع على أساس العائد على الاستثمار، والعائد على رأس المال المستخدم، وأساس سداد الديون من قبل أصحاب المشروع والمستثمرين. معايير الاستثمار الخاصة بهم معقدة وفريدة من نوعها بالنسبة لأفقهم الزمني، والعناية الواجبة، ورغبتهم في المخاطرة. سننظر إلى بعض فرص المشاريع كأمثلة لكيفية مشاركة المستثمرين (Bern, 2011).

## • حجم الاستثمار العالمي في الطاقة

حسب تقرير الاستثمار العالمي المنبثق عن مؤتمر الأمم المتحدة للتجارة والتنمية لعام 2023م فإن جهود البشرية تأخرت في مكافحة ظاهرة الاحترار العالمي مدة تبلغ عقداً من الزمان على الأقل، لذلك يعد الاستثمار في مجالات الطاقة المتجددة في البلدان النامية ضرورياً وهو غالباً ما يكون أكثر السبل اقتصاداً لسد فجوة الطاقة. ومع أن الانتقال إلى الطاقة المتجددة يمثل أولوية عالمية، فإن الاستثمارات في البنية التحتية للطاقة وكفاءتها ما تزال أقل بكثير مما يلزم ولهذا السبب، دور مهم في أكبر معركة في حياتنا ألا وهي: الحفاظ على ارتفاع درجات الحرارة دون الحد المتفق عليه وهو 1.5 درجة مئوية. وتعتمد أقل البلدان نمواً على مصادر خارجية في قرابة ثلاثة أرباع استثماراتها في مجال الطاقة، ولكنها قد تدفع ما يصل إلى سبعة أضعاف ما تدفعه البلدان المتقدمة النمو لولوج أسواق رأس المال الدولية، وهو أمر يعيق بشكل خاص زيادة الاستثمارات في مصادر الطاقة المتجددة.

وتضاعف الاستثمار الدولي في الطاقة المتجددة بثلاثة أمثال منذ عام 2015م، ويبدو أن هناك ثمة حاجة إلى أكثر من ذلك بكثير. وبلغ نمو الاستثمار عبر الحدود في القطاع أعلى المستويات في أقل الاقتصادات اعتماداً عليه. أما في المناطق النامية، فتجاوز بالكاد النمو الإجمالي في الاستثمار الأجنبي المباشر والناتج المحلي الإجمالي. ولم يسجل أكثر من 30 بلداً نامياً استثماراً دولياً واحداً ضخم الحجم في توليد الطاقة المتجددة منذ اعتماد اتفاق باريس. زد على ذلك فإن أنواع الاستثمار الأخرى اللازمة للانتقال في مجال الطاقة تحظى باهتمام أقل بكثير من الاهتمام القوي الذي يبديه المستثمرون بمصادر الطاقة المتجددة، فاحتياجات الاستثمار في شبكات الطاقة والتخزين وكفاءة الطاقة تتجاوز المتطلبات في مجال توليد الطاقة المتجددة بمقدار كبير.

وفي البلدان النامية، ولاسيما أقل البلدان نمواً، يمثل الانتقال في مجال الطاقة أولوية تنافسها أولويات عديدة في مضمار السياسات. والطموحات عالية كما يتضح من الأهداف الواردة في المساهمات المحددة وطنياً لمعظم البلدان النامية. ولكن هذا الحال ينطبق أيضاً على الاحتياجات الاستثمارية المرتبطة بالأهداف والحواجز الهيكلية التي تحول دون اجتذاب هذا الاستثمار ويتناولها هذا التقرير، فعلى سبيل المثال لا الحصر: تمثل تكلفة رأس المال بالنسبة للمستثمرين أمرًا مثبطًا رئيسيًا، وهو أمر يستدعي المزيد من الدعم الدولي لإزالة المخاطر على الصعيد القطري. وغالبًا ما تكون القدرة على ترجمة الأهداف إلى خطط استثمارية للانتقال في مجال الطاقة وإلى مشاريع مقبولة مصرفيًا منخفضة انخفاضًا يستلزم تقديم المساعدة والدعم التقنيين في إعداد المشاريع. وقد تقيم اتفاقيات الاستثمار الدولية حاجزًا أمام إجراءات سياسة المناخ، وهو أمر يستدعي الدعوة إلى إصلاح المعاهدات إصلاحاً يجعلها تناصر بشكل أكبر تعزيز الاستثمار في قطاع الطاقة وتيسيره.

## سياسات الدول نحو الاستثمار في الطاقة

يمكن للسياسات الحكومية المصممة تصميمًا جيدًا والتي تعزز تحويل نظام الطاقة أن تقلل من انبعاثات الغازات الدفيئة وتحسن نوعية الهواء في وقت واحد، وفي كثير من الحالات يمكن أن تزيد أيضا من أمن الطاقة وتقلل العبء المالي لاستخدام الطاقة. تم استخدام الأنظمة البيئية منذ السبعينيات لتعزيز الاستخدام الأكثر استدامة للطاقة. وقد التزمت بعض الحكومات بمواعيد التخلص التدريجي من محطات الطاقة التي تعمل بالفحم وإنهاء عمليات التنقيب الجديدة عن الوقود الأحفوري. يمكن للحكومات أن تشترط أن تنتج السيارات الجديدة انبعاثات صفرية، أو أن يتم تدفئة المباني الجديدة بالكهرباء بدلا من الغاز. تتطلب معايير محفظة الطاقة المتجددة في العديد من البلدان من المرافق زيادة نسبة الكهرباء التي تولدها من مصادر متجددة.

يمكن للحكومات تسريع عملية تحويل نظام الطاقة من خلال قيادة تطوير البنية التحتية مثل خطوط نقل الكهرباء لمسافات طويلة، والشبكات الذكية، وخطوط أنابيب الهيدروجين. وفي مجال النقل، يمكن للبنية التحتية والحوافز المناسبة أن تجعل السفر أكثر كفاءة وأقل اعتماداً على السيارات. التخطيط الحضري الذي يثبط الزحف العمراني يمكن أن يقلل من استخدام الطاقة في وسائل النقل والمباني المحلية مع تحسين نوعية الحياة. تاريخياً، لعبت سياسات البحث والمشتريات والحوافز الممولة من الحكومة دوراً حاسماً في تطوير ونضج تقنيات الطاقة النظيفة، مثل بطاريات الطاقة الشمسية وبطاريات الليثيوم.

وفي سيناريو وكالة الطاقة الدولية لنظام طاقة خال من الانبعاثات بحلول عام 2050م، يتم تعبئة التمويل العام بسرعة لجلب مجموعة من التقنيات الأحدث إلى مرحلة العرض التجريبي وتشجيع النشر. إن تسعير الكربون (مثل الضريبة

على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون) يمنح الصناعات والمستهلكين الحافز لخفض الانبعاثات مع السماح لهم باختيار كيفية القيام بذلك. على سبيل المثال، يمكنهم التحول إلى مصادر الطاقة المنخفضة الانبعاثات، أو تحسين كفاءة استخدام الطاقة، أو الحد من استخدامهم للمنتجات والخدمات كثيفة الاستهلاك للطاقة. وقد واجه تسعير الكربون معارضة سياسية قوية في بعض الولايات القضائية، في حين تميل السياسات الخاصة بالطاقة إلى أن تكون أكثر أمانا من الناحية السياسية. وتشير معظم الدراسات إلى أن الحد من ظاهرة الاحتباس الحراري بحيث لا يتجاوز 1.5 %، يتطلب تسعير الكربون استكماله بسياسات صارمة خاصة بالطاقة.

اعتبارًا من عام 2019م، أصبح سعر الكربون في معظم المناطق منخفضًا جدًا لتحقيق أهداف اتفاقية باريس. توفر ضرائب الكربون مصدرا للدخل يمكن استخدامه لخفض الضرائب الأخرى أو مساعدة الأسر ذات الدخل المنخفض على تحمل تكاليف الطاقة الأعلى. وتستكشف بعض الحكومات، مثل الاتحاد الأوروبي والمملكة المتحدة، إمكانية استخدام تعديلات حدود الكربون. وهي تفرض تعريفات جمركية على الواردات من البلدان التي لديها سياسات مناخية أقل صرامة، لضمان بقاء الصناعات الخاضعة لأسعار الكربون الداخلية قادرة على المنافسة.

إن حجم ووتيرة إصلاحات السياسات التي بدأت اعتبارا من عام 2020م أقل بكثير من المطلوب لتحقيق الأهداف المناخية لاتفاق باريس. وبالإضافة إلى السياسات المحلية، سوف يتطلب الأمر قدراً أعظم من التعاون الدولي لتسريع وتيرة الابتكار ومساعدة البلدان الأكثر فقراً في إنشاء مسار مستدام للوصول الكامل إلى الطاقة.

ويمكن للبلدان أن تدعم مصادر الطاقة المتجددة لخلق فرص العمل. وتشير تقديرات منظمة العمل الدولية إلى أن الجهود المبذولة للحد من ظاهرة الانحباس الحراري العالمي بحيث لا تتجاوز درجتين مئويتين من شأنها أن تؤدي إلى خلق فرص عمل صافية في معظم قطاعات الاقتصاد. ويتوقع أن يتم خلق 24 مليون فرصة عمل جديدة بحلول عام 2030م في مجالات مثل توليد الكهرباء المتجددة، وتحسين كفاءة الطاقة في المباني، والتحول إلى السيارات الكهربائية. وسوف يتم فقدان ستة ملايين وظيفة، في قطاعات مثل التعدين والوقود الأحفوري. يمكن للحكومات أن تجعل التحول إلى الطاقة المستدامة أكثر جدوى من الناحية السياسية والاجتماعية من خلال ضمان التحول العادل للعمال والمناطق التي تعتمد على صناعة الوقود الأحفوري، لضمان حصولهم على فرص اقتصادية بديلة.

## • تمويـــل المنـــاخ

إن جمع الأموال الكافية للابتكار والاستثمار شرط أساسي للتحول في مجال الطاقة. وتشير تقديرات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ إلى أن الحد من ظاهرة الاحتباس الحراري بحيث لا يتجاوز 1.5 درجة مئوية، سيتطلب استثمار 2.4 تريليون دولار أمريكي في نظام الطاقة كل عام بين عامي 2016م و2035م. وتتوقع معظم الدراسات أن هذه التكاليف، التي تعادل 2.5 % من الناتج المحلي الإجمالي العالمي، ستكون صغيرة. مقارنة بالفوائد الاقتصادية والصحية. وسوف يحتاج متوسط الاستثمار السنوي في تقنيات الطاقة المنخفضة الكربون وكفاءة استخدام الطاقة إلى ستة أمثاله بحلول عام 2050م مقارنة بعام 2015م. ويتفاقم نقص التمويل بشكل حاد بشكل خاص في أقل البلدان نموا، التي لا تجتذب القطاع الخاص.

وتشير تقديرات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ إلى أن إجمالي تمويل المناخ بلغ 681 مليار دولار في عام 2016م. وأغلب هذا المبلغ عبارة عن استثمارات القطاع الخاص في نشر الطاقة المتجددة، واستثمارات القطاع العام في النقل المستدام، واستثمارات القطاع الخاص في كفاءة استخدام الطاقة.

يتضمن اتفاق باريس تعهدًا بتقديم 100 مليار دولار إضافية سنويًا من الدول المتقدمة إلى الدول الفقيرة، للتخفيف من آثار تغير المناخ والتكيف معه. ومع ذلك، لم يتم تحقيق هذا الهدف، وتعرقل قياس التقدم بسبب القواعد المحاسبية غير الواضحة. وإذا استثمرت الشركات كثيفة الاستخدام للطاقة، مثل المواد الكيميائية والأسمدة والسيراميك والصلب والمعادن غير الحديدية، بشكل كبير في البحث والتطوير، فإن استخدامها في الصناعة قد يصل إلى ما بين 5 % إلى 20 % من إجمالي الطاقة المستخدمة. يشكل تمويل الوقود الأحفوري ودعمه عائقًا كبيرًا أمام تحول الطاقة. بلغ الدعم العالمي المباشر للوقود الأحفوري 319 مليار دولار في عام 2017م. ويرتفع هذا إلى 5.2 تريليون دولار عندما يتم تسعير التكاليف غير المباشرة، مثل آثار تلوث الهواء.

ويمكن أن يؤدي إنهاء هذه الأنشطة إلى انخفاض بنسبة 28 % في انبعاثات الكربون العالمية وانخفاض بنسبة 46 % في الوفيات الناجمة عن تلوث الهواء. ولم يتأثر تمويل الطاقة النظيفة إلى حد كبير بجائحة كوفيد-19، وتوفر حزم التحفيز الاقتصادي المرتبطة بالجائحة إمكانيات للتعافي الأخضر.

# الاستدامة في الطاقة

صار التكثيف الزراعي منذ الثورة الخضراء في الخمسينات والستينات من القرن الماضي وقوداً أحفورياً كثيفاً (طاقة) بسبب زيادة مدخلات الأسمدة الصناعية والمبيدات الحيوية (مبيدات الحشرات ومبيدات الأعشاب ومبيدات الفطريات) ومياه الري التي تساهم في تغير المناخ العالمي. يمكن للحكومات في جميع أنحاء العالم إلغاء ما يقدر بنحو 700 بليون دولار من الإعانات السنوية التي تحفز على تدمير سلع وخدمات النظام البيئي.

تبلغ الطاقة المشتقة من الوقود الأحفوري المستخدمة في ضخ مياه الري انبعاثات سنوية 81–305 غرام $CO_2$/ م$^2$ (22-83 غرام/ سم$^2$) ($C = 3.67\ CO_2$) للأراضي الزراعية المروية في الولايات المتحدة. علاوة على ذلك، ونظراً لارتفاع نسبة الكالسيوم وثاني أكسيد الكربون في المياه الجوفية في المناطق القاحلة (بقدر 1 % من الكالسيوم وثاني أكسيد الكربون مقابل 0.036 % في الغلاف الجوي)، فإن استخدام هذه المياه للري الزراعي في الأراضي القاحلة سيطلق 4.8–15 غرام سم$^3$/ سنة إلى الغلاف الجوي من تكوين كربونات التربة ($CaCO_3$).

في سلسلة التصنيع والنقل والاستهلاك بكاملها، تولد صناعة الأسمدة انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي تبلغ 1.436 مول من ثاني أكسيد الكربون – الكربون لكل مول من النتروجين N المُنتج. تشمل الانبعاثات من صناعة الأسمدة ثاني أكسيد الكربون، والأمونيا $NH_3$، أكاسيد النيتريك والنيتروز (NOx و $N_2O$)، وكبريتيد الهيدروجين ($H_2S$)، وثاني أكسيد الكبريت ($SO_2$)، وثالث أكسيد الكبريت ($SO_3$)، والفلور ($SiF_4$ و HF)، والإشعاع (من

جبس الفوسفات). إنها تسبب الاحتباس الحراري، ونضوب الأوزون، وتحمّض التربة، ونضوب الأكسجين في الماء (بسبب فرط المغذيات)، والسمية للكائنات (مثل الكادميوم)، والهباء الجوي.

يعتمد أكثر من 99 % من إنتاج الأسمدة العالمية النتروجينية على الأمونيا ($NH_3$)، ويعتمد نحو 77 % من الطاقة الإنتاجية العالمية للأمونيا حالياً على عملية كيميائية تستخدم الغاز الطبيعي (الميثان) كمخزون تغذية. تنبعث هذه الطريقة من إنتاج 1.15-1.3 $NH_3$ طن من ثاني أكسيد الكربون و 1.3 كغ من $NO_2$ و 0.01 كجم من $SO_2$ لكل طن من $NH_3$ المنتج.

يعتبر إنتاج الأسمدة مكلفًا من حيث الطاقة، حيث يستهلك الإنتاج العالمي الحالي 4.4 بليون جيجا جول في السنة (نحو 1.2 % من الطاقة العالمية)، منها 92.5 % تستخدم للأكسجين، 3 % لـ $P_2O_5$، و 4.5 % لـ $K_2O$)، باستثناء استهلاك الطاقة الناجم عن نقل الأسمدة واستخدامها.

## • تطورات سياسات الاستثمار

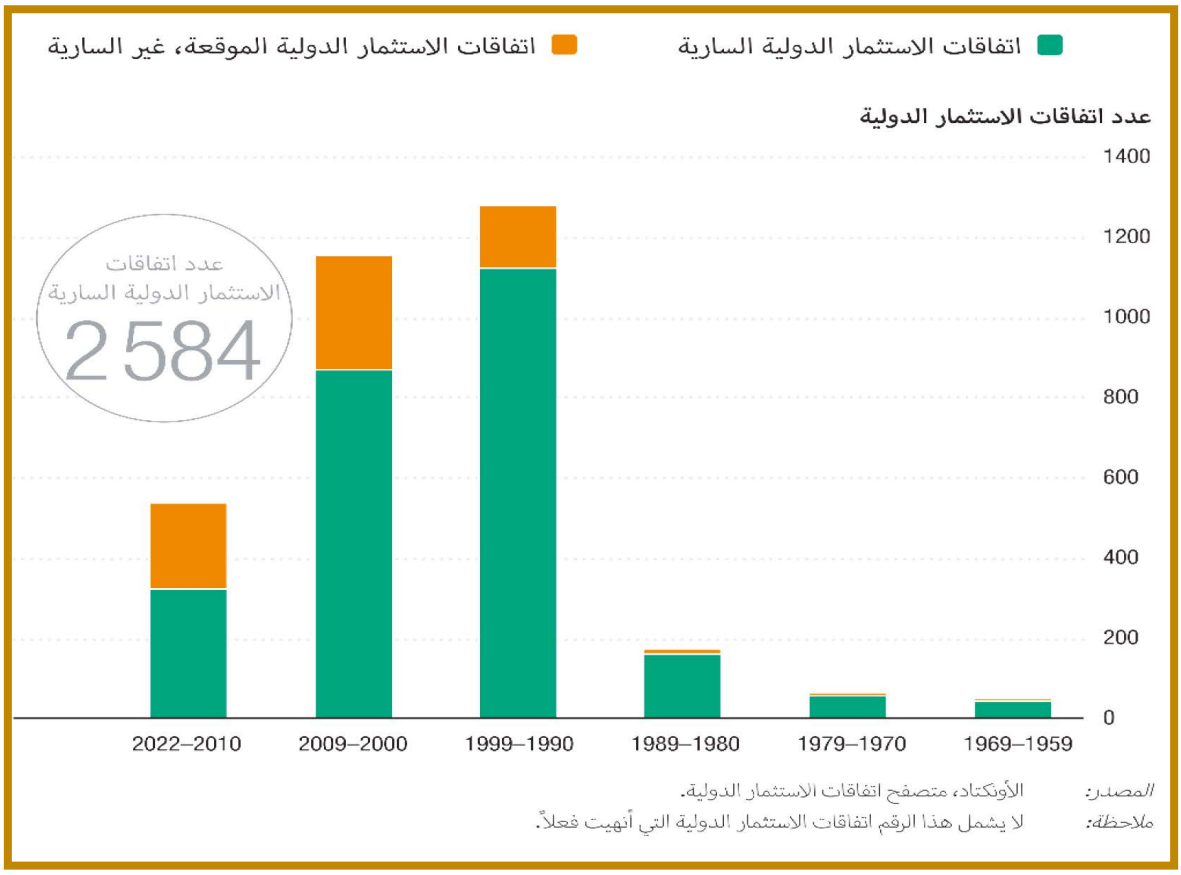
وضع ستة وستون بلداً مجموعة من التدابير بلغ عددها 146 تدبيراً من تدابير السياسات التي تؤثر في الاستثمار الأجنبي في عام 2022م بزيادة تفوق الثلثُ عما كانت عليه في عام 2021م. وتضاعف على وجه التقريب عدد التدابير الداعمة للاستثمار، فارتفع من 55 تدبيراً إلى 102 تدبير، بينما بقي عدد السياسات الأقل مواتاة للاستثمار مستقراً، معيداً الحصة النسبية للسياسات المواتية إلى مستويات ما قبل الجائحة.

واعتمدت ثلاثة أرباع أكثر التدابير مناصرة للاستثمار في البلدان النامية. وتمثلت غالبية هذه المبادرات في مبادرات لتيسير الاستثمار، تلتها حوافز

استثمارية وفتح باب قطاعات وأنشطة جديدة أمام الاستثمار الأجنبي المباشر. وللمرة الأولى منذ الجائحة، زادت حصة أكثر تدابير الاستثمار ملاءمة أيضاً زيادة ملموسة في البلدان المتقدمة النمو (بنسبة 21 %) وتشمل هذه المبادرات في المقام الأول مبادرات تيسير الاستثمار وحوافز الطاقة المتجددة وغيرها من الاستثمارات المتصلة بالمناخ يتعلق أكثر من نصف أقل التدابير مواتاة للاستثمار على وجه التقريب باستحداث أنظمة الأمن الوطني التي تؤثر في الاستثمار الأجنبي المباشر أو بجعل هذه الأنظمة أكثر صرامة، وهو أمر يمثل توسعاً آ في اتجاه طرأ في الآونة الأخيرة. واتخذت البلدان المتقدمة النمو معظم هذه التدابير، فارتفع عدد البلدان التي تجري عمليات فحص الاستثمار لأسباب تتعلق بالأمن القومي إلى 37 بلداً وتستأثر هذه البلدان مجتمعة بنسبة 68 % من رصيد الاستثمار الأجنبي المباشر.

وبيانات مشاريع الاستثمار الأجنبي المباشر التي تُ أ فحص لأسباب تتعلق بالأمن الوطني محدودة، بيد أنَها تشير إلى زيادة في عدد المعاملات التي تخضع للمراجعة. ويتجلى ازدياد الاهتمام الذي تحظى به اعتبارات الأمن الوطني في النهج التنظيمية حيال الاستثمار الأجنبي المباشر أيضاً في تنفيذ ضوابط الدمج والتملك، فمن بين صفقات الدمج والتملك الكبيرة التي تُتاح عنها بيانات، أنهت الأطراف فيها ما لا يقل عن 21 صفقة في عام 2022م الأسباب تنظيمية، بزيادة 7 صفقات عن عام 2021م وقفزت قيمتها الإجمالية بنسبة 70 % على وجه التقريب، لتصل إلى 70 مليار دولار.

في عام 2022م استمر الاتجاه نحو إصلاح اتفاقات الاستثمار الدولية، فبالسنة الثالثة على التوالي، تجاوز عدد حالات الأنهاء الفعلي للمعاهدات عدد اتفاقات الاستثمار الدولية الجديدة، فأدى ذلك إلى يبلغ عدد اتفاقات الاستثمار الدولية 3265 اتفاقاً، منها 2 584 اتفاقاً سارياً (كما في الشكل الآتي).




**عدد اتفاقات الاستثمار الدولية الموقعة والسارية المفعول بين عامي 2022- 1959 (حسب تاريخ التوقيع).**

ويلزم اتخاذ مزيد من الإجراءات للإسراع بخطى إصلاحات اتفاقات الاستثمار الدولية في جميع المجالات التي حددها الأونكتاد في خريطة الطريق التي وضعها لأصالح اتفاقات الاستثمار الدولية تميزت السنة كذلك باختتام المفاوضات بشأن عدة صكوك استثمار دولية تتسم بسمات استباقية لتيسير الاستثمار وبزيادة التركيز على الاستثمار المستدام. وتواصل أيضاً عمل المنظمات الدولية في مختلف جوانب إدارة الاستثمار الدولي واقترن بإحراز تقدم في المفاوضات بشأن تيسير الاستثمار والنواتج الأولى المتفق عليها لإصلاح تسوية المنازعات بين المستثمرين والدول

## • سياسات الاستثمار في الطاقة المستدامة

لسياسات الاستثمار دور رئيسي في الحد من مخاطر الاستثمار في تحقيق الانتقال في مجال الطاقة وتحفيزه. واعتمدت البلدان أنواعاً شتى من الصكوك لتشجيع الاستثمار الخاص في قطاع الطاقة المتجددة. ومن بين هذه الحوافز، تشك الحوافز الضريبية أكثر الأدوات استخداماً لتشجيع الاستثمار في الطاقة المتجددة في (البلدان النامية (77 %) وأقل البلدان نمواً (90 %)، والدول الجزرية الصغيرة النامية (67 %)، وعلى النقيض من ذلك، تحبذ البلدان المتقدمة النمو التعريفات التفضيلية والمزادات والحوافز المالية، المعتمدة بنسبة 91 % و % و 70 % على التوالي.

ولكل أداة من أدوات السياسة لتحفيز الاستثمار في قطاع الطاقة المتجددة مزاياها ومثالبها. ويمكن تكييف الحوافز الضريبية لتحقيق أهداف محددة في مضمار السياسات. وهي لا تتطلب عادة إنفاقاً عاماً مباشراً على غرار ما تقتضيه الإعانات، بيد أنها قد لا تزيل الحواجز الرئيسية أمام الاستثمار في الطاقة المتجددة، ومن بينها الحصول على التمويل ومخاطر السوق والبنية التحتية والاحتياجات الأولية المرتفعة من رأس المال. وبدلاً من ذلك، تقدم التعريفات التفضيلية للمستثمرين أسعاراً مضمونة وتتيح لهم منظوراً طويل الأجل، مقللة عدم اليقين بشأن عائد الاستثمار، بيد أنها قد تشكل، حسب تصميمها، عبئاً على المالية العامة وتزيد من تكلفة الكهرباء التي يتحملها المستخدمون. ومنذ عام 2010م ازدادت مزادات الطاقة المتجددة شعبية، وهي آلية أخرى لتشجيع الاستثمار إلا أنها فعالة من حيثُ التكلفة وقابلة للتكيف مع مختلف السياقات الاقتصادية، غير أنها قد تكون معقدة تصميماً وإدارة وتتطلب توافر الخبرة المتخصصة.

## • الاستثمار في الطاقة المستدامة للجميع

تتدرج مكافحة تغير المناخ في عداد التحديات الجسيمة في عصرنا، وهو تحد يتوقف إلى حد كبير على الانتقال من الطاقة المولدة من الوقود الأحفوري إلى الطاقة المولدة من مصادر متجددة. ويُعد الانتقال في مجال الطاقة عاملاً أساسياً في تحقيق خطة التنمية المستدامة لعام 2030م التي لا تدعو إلى اتخاذ إجراءات عاجلة للتصدي لتغير المناخ وآثاره فحسب (الهدف 13 من أهداف التنمية المستدامة)، بل وتشير أيضاً إلى ضرورة حصول الجميع على طاقة حديثة وموثوقة ومستدامة وبتكلفة ميسورة (الهدف 7 من أهداف التنمية المستدامة).

ستلزم الانتقال في مجال طاقة مبالغ ضخمة من الاستثمارات طوال سنوات عديدة في توليد الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة وبنية الطاقة التحتية. ويستلزم إبقاء العالم على المسار الصحيح لتحقيق الهدف المنصوص عليه في اتفاق باريس للحد من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى 1.5 درجة مئوية، أو ما يقرب منها، فوق مستويات ما قبل الصناعة استثمار نحو 1.5 مرة من الناتج المحلي الإجمالي العالمي اليوم حتى عام 2050م والاحتياجات الاستثمارية مهولة في البلدان المتقدمة النمو وفي البلدان النامية التي لديها فعلاً أصول كبيرة من الطاقة، وهي أقل بكثير من حيثُ القيمة المطلقة في البلدان التي لا تحصل فيها نسبة كبيرة من السكان بعد على الكهرباء، ولكنها أعلى بمقدار كبير مقارنة بقاعدة الأصول الحالية لتلك البلدان وقدرتها على تمويل هذه الأصول ودعمها. وهذا أمر مهم، لأن الاستثمار في الطاقة مطلوب لا من أجل الانتقال فحسب، بل ولحصول الجميع على الطاقة المستدامة والميسورة التكلفة أيضاً. ويلزم زيادة قدرة الطاقة المتجددة بمعامل قدره 2.5 في أغلب الاقتصادات المتقدمة النمو، ولكن بمعامل أقرب إلى 25 في أقل البلدان نمواً.

ولا تقتصر متطلبات الاستثمار على توليد الطاقة المتجددة، بل تمتد إلى كفاءة الطاقة في المباني والصناعة والنقل وبنية الطاقة التحتية، مثل شبكات الطاقة وسعة التخزين والوقود النظيف والمنخفض الانبعاثات وسلسلة الأمداد لمصادر الطاقة المتجددة، بما في ذلك أنشطة البحثُ والتطوير، والمعادن الحرجة وتصنيع الألواح الشمسية ومنشآت طاقة الرياح واحتجاز الكربون وتخزينه. وما إلى ذلك، سيظل الاستثمار في أصول الوقود الأحفوري ضرورياً لبعض الوقت لتوفير قدرة تكميلية؛ لذا، ستكون هناك حاجة أيضاً إلى الاستثمار لزيادة كفاءة هذه الأصول وتخفيف تأثيرها وإخراجها من الخدمة في نهاية المطاف لقد حددت الأونكتاد مجموعة من التحديات الرئيسية التي تواجه الاستثمار الدولي في الانتقال في مجال الطاقة، استناداً إلى تحليل الاستثمار الأجنبي المباشر وتمويل المشاريع وسياسة الاستثمار واتجاهات التمويل المستدام ولمواجهة هذه التحديات، يقترح الأونكتاد اتفاق عمل عالمي من أجل الاستثمار في الطاقة المستدامة للجميع.

ويتضمن هذا الاتفاق مجموعة من المبادئ التوجيهية أن تراعي جميع الأهداف الثلاثة للانتقال في مجال الطاقة ألا وهي تحقيق الأهداف المناخية وتوفير الطاقة بتكلفة ميسورة للجميع وضمان أمن الطاقة، ويطرح الاتفاق ست حزم عمل تغطي وضع سياسات الاستثمار الوطنية والدولية والشراكات والتعاون العالمي والإقليمي وفيما بين بلدان الجنوب وآليات التمويل وأدواته وأسواق التمويل المستدامة. ويمثل تعزيز وكالات تشجيع الاستثمار والمؤسسات ذات الصلة (بما في ذلك المناطق الاقتصادية الخاصة) لتحسين قدرتها على اجتذاب مشاريع الانتقال في مجال الطاقة أولوية من الأولويات الرئيسية المدرجة في إطار مجموعة إجراءات سياسات الاستثمار. ويستلزم ذلك بناء القدرات وإيجاد حلول مبتكرة، مثل إمكانية مشاركة وكالات تشجيع الاستثمار في مرافق إعداد المشاريع للتمويل

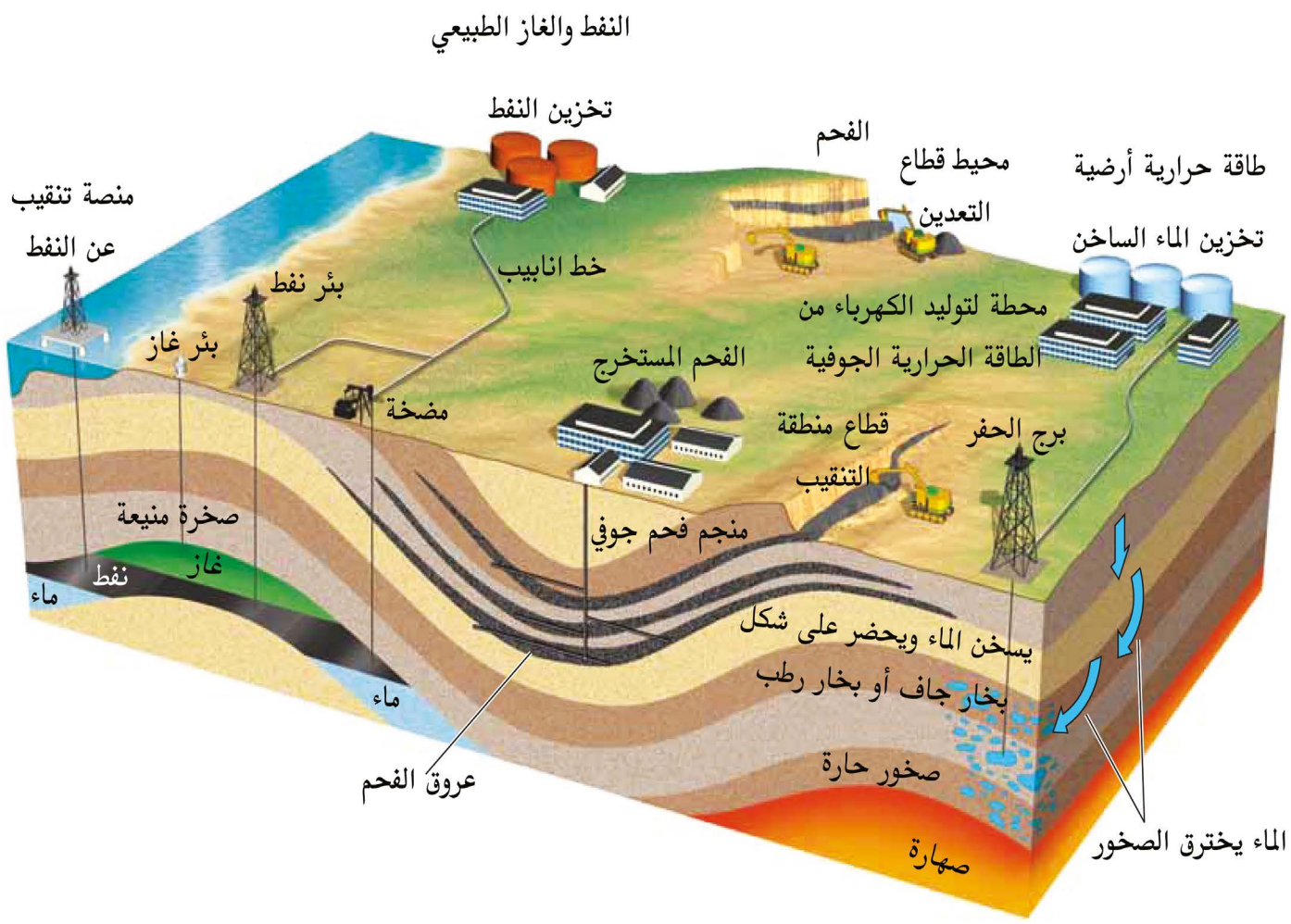
الأخضر التي تقدم المساعدة في إعداد مقترحات تمويل المشاريع، وهو أمر يحول وكالات تشجيع الاستثمار فعلاً إلى وكالات لتنمية الاستثمار.

وتبرز مجموعتان من الإجراءات أهمية الشراكات الاستراتيجية والتعاون الدولي. فعلى سبيل المثال، يمكن للتحالف العالمي للاستثمار من أجل التنمية الذي تتعاون فيه العديد من وكالات الأمم المتحدة مع البنك الدولي ومنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي والرابطة العالمية لوكالات تشجيع الاستثمار والعديد من الشركاء في ميدان المعرفة والمنظمات الإقليمية، ومن بينها الاتحاد الأفريقي، أن يسعى لإنشاء «محطة جامعة» لبناء القدرات في مجال الاستثمار في الطاقة المستدامة. ويمكن استحداث مبادرات شراكة محتملة أخرى لدعم مجموعات من البلدان التي لديها احتياجات استثمارية محددة أو المعرضة بشكل خاص لتأثير تغير المناخ. ويتمثل أحد مجالات العمل المهمة في جعل سياسات التجارة والاستثمار الدولية تساهم مساهمة أكبر في العمل المناخي، بإعداد القواعد واقتراح أساليب تيسير التجارة والاستثمار التي تساعد على تحسين قدرة سلاسل الإمداد الدولية على التكيف مع تغير المناخ وإتاحة سلاسل الأمداد المسؤولة للمعادن الحيوية والسلع البيئية وتعظيم الفوائد الإنمائية التي يمكن أن تجنيها البلدان من المشاركة في سلاسل القيمة المتنامية للطاقة المتجددة. ولدعم ذلك، أعلن الأونكتاد ومنظمة التجارة العالمية في المؤتمر السابع والعشرين للأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ عن مبادرة تعاونية لوضع مجموعة من المبادئ للعمل المناخي المتعلق بالتجارة والاستثمار بشكل مشترك (World Investment Report, 2023).

## الانتقال إلى طاقة المستقبل الأكثر استدامة

تأتي معظم الطاقة التي تسخن الأرض ومبانينا من الشمس دون أي تكلفة علينا، وهذا أحد المبادئ العلمية الأربعة للاستدامة. ينتج هذا المدخل المباشر من الطاقة الشمسية عدة أشكال غير مباشرة من الطاقة الشمسية المتجددة: الرياح، والطاقة المائية (المياه المتساقطة والمتدفقة)، والكتلة الحيوية (تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية وتخزينها في الأشجار والنباتات الأخرى).

تشكل الطاقة التجارية، التي تُباع في السوق 1 % من الطاقة التي نستخدمها والتي لا توفرها الشمس مباشرة. في الوقت الحالي، تأتي معظم الطاقة التجارية من استخراج وحرق موارد الطاقة الغير متجددة التي يجري الحصول عليها من قشرة الأرض، وبشكل أساسي الوقود الأحفوري المحتوي على الكربون، النفط والغاز الطبيعي والفحم، المتكون من تحلل النباتات والحيوانات على مدى ملايين السنين.

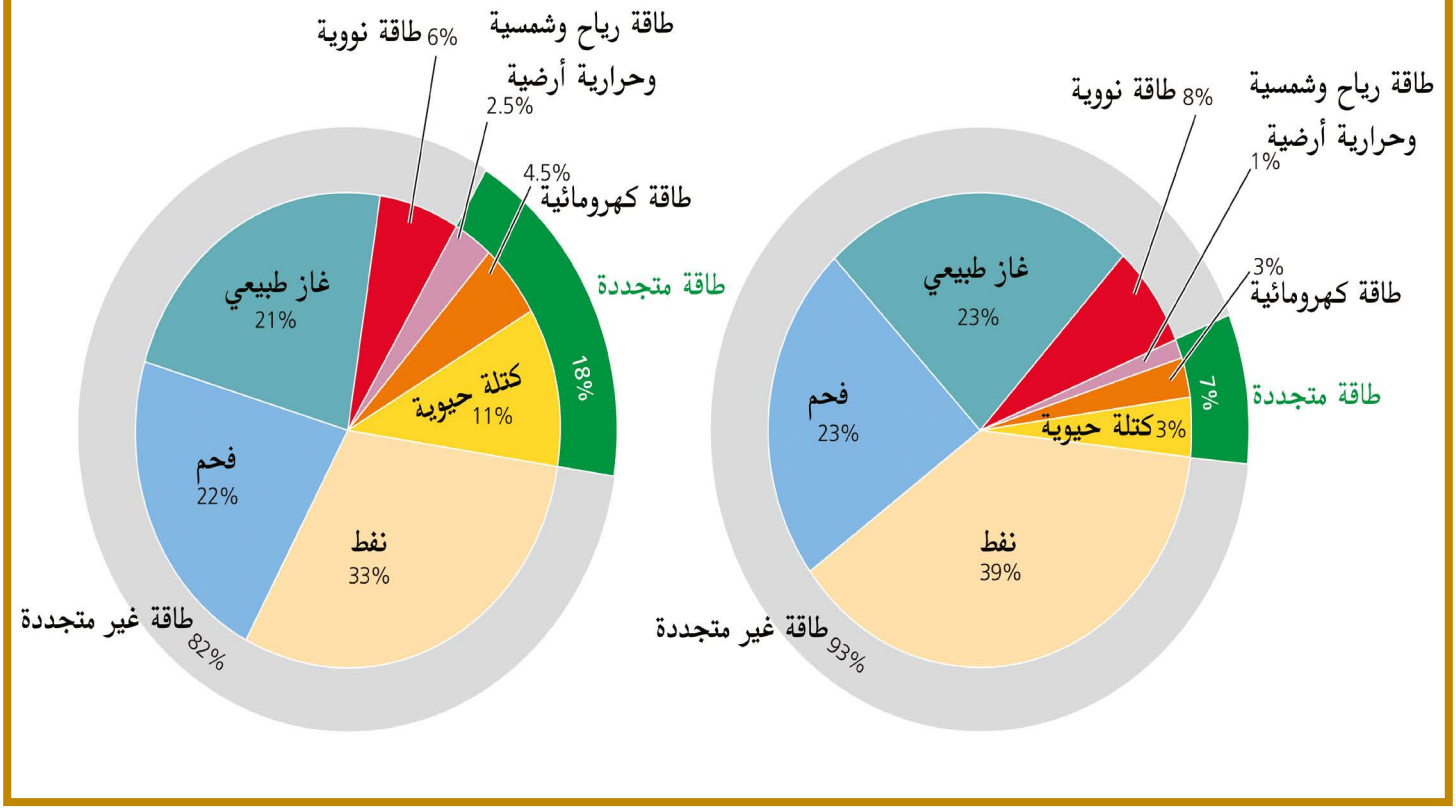



رأس المال الطبيعي: موارد الطاقة الغير متجددة المهمة التي يمكن إزالتها من القشرة الأرضية هي الفحم والنفط والغاز الطبيعي وبعض أشكال الطاقة الحرارية الأرضية. كما يستخرج خام اليورانيوم غير المتجدد من قشرة الأرض ومعالجته لزيادة تركيزه من اليورانيوم 235، الذي يمكن أن يعمل كوقود في المفاعلات النووية لإنتاج الكهرباء.

نحو 82 % من الطاقة التجارية المستهلكة في العالم تأتي من مصادر الطاقة الغير متجددة: 76 % من الوقود الأحفوري (النفط والغاز الطبيعي والفحم) و6 % من الطاقة النووية. وتأتي نسبة 18 % المتبقية من الطاقة التجارية التي نستخدمها من مصادر الطاقة المتجددة: الكتلة الحيوية والطاقة المائية والطاقة الحرارية الأرضية وطاقة الرياح والطاقة الشمسية.

يستخدم الوقود الأحفوري غير المتجدد على نطاق واسع لأنه متوفر بكثرة، ويسهل نقله، وغير مكلف مقارنة بمعظم البدائل الأخرى. بالترتيب، أكبر ثلاثة مستهلكين للوقود الأحفوري هم الولايات المتحدة والصين والاتحاد الأوروبي، ويمثلون معاً أكثر من نصف استهلاك الوقود الأحفوري.

يختلف استخدام الطاقة لكل شخص في جميع أنحاء العالم. إذْ ما يقرب من نصف سكان العالم في البلدان النامية يحرقون الأخشاب القابلة للتجديد والفحم لتدفئة مساكنهم وطهي طعامهم. وتُجمع معظم هذه الكتلة الحيوية من قِبل المستخدمين ولا تباع في السوق. ومن ثم، فإن النسبة المئوية الفعلية لطاقة الكتلة الحيوية المتجددة المستخدمة في العالم أعلى من رقم 11 %. يواجه العديد من هؤلاء الأفراد نقصاً في حطب الوقود من المتوقع أن يزداد سوءاً لأن حطب الوقود يحصد بشكل أسرع من الطبيعة التي تحل محله. يجب تقييم جميع موارد الطاقة على أساس إمداداتها، وتأثيرها البيئي، ومقدار الطاقة المفيدة التي توفرها بالفعل.

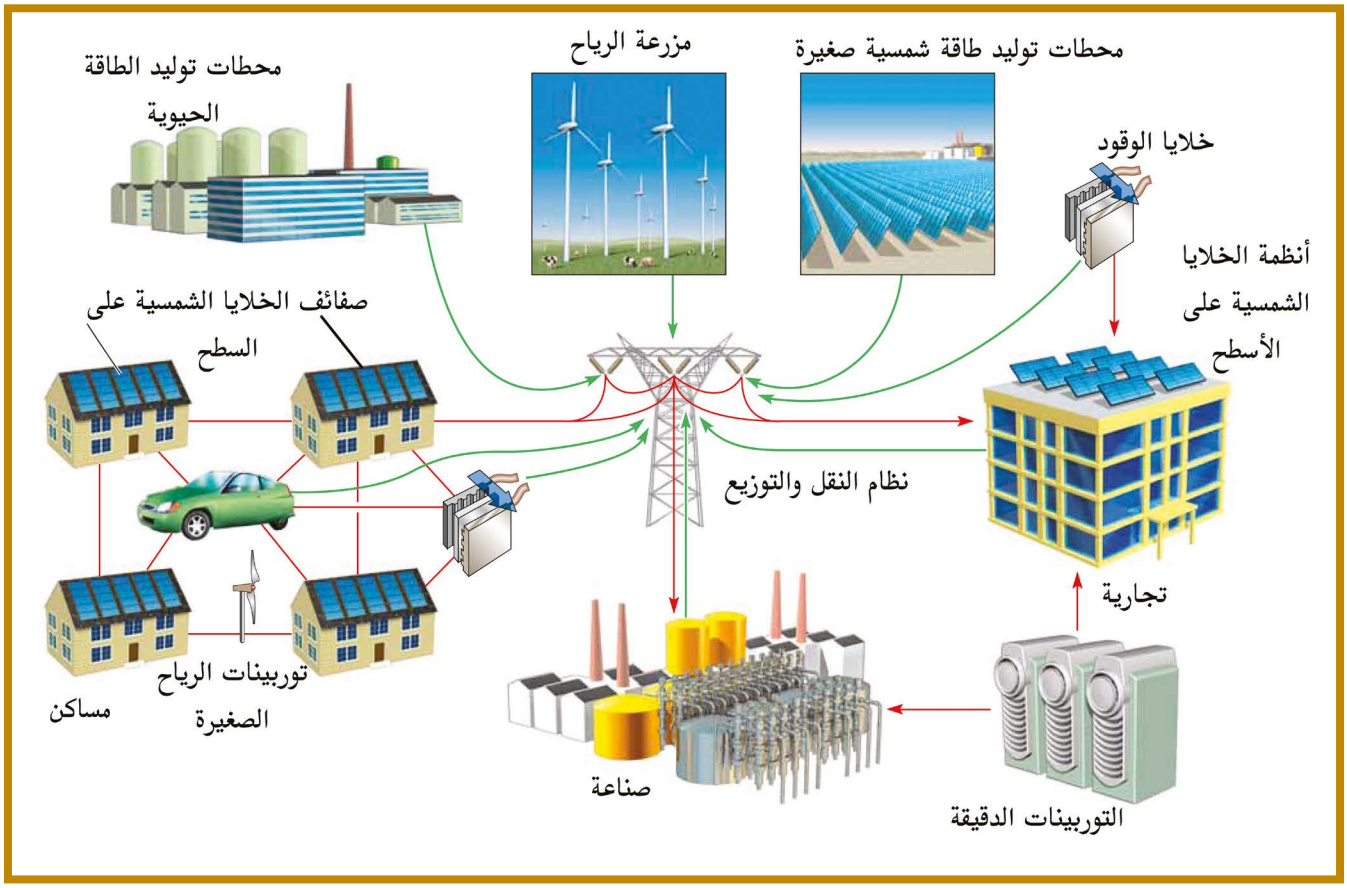



استخدام الطاقة التجارية حسب المصدر للعالم (يسار) والولايات المتحدة (يمين) في عام 2004. الطاقة التجارية تمثل 1 % فقط من الطاقة المستخدمة في العالم؛ الـ 99 % الباقية عبارة عن طاقة شمسية مباشرة يحصل عليها من الشمس، وبالطبع لا تباع في السوق.

لقد توصل العلماء وخبراء الطاقة الذين قيّموا بدائل الطاقة إلى ثلاثة استنتاجات عامة:

**أولاً**: سيكون هناك تحول تدريجي من أنظمة الطاقة الكلية المركزية الكبيرة إلى أنظمة الطاقة الصغيرة اللامركزية الأصغر مثل توربينات الرياح وخلايا الوقود للسيارات والألواح الشمسية المنزلية وتوربينات الغاز الطبيعي الصغيرة وخلايا الوقود الثابتة للمباني التجارية. حالياً، تمتلك معظم البلدان نظاماً مركزياً ومركّزاً جغرافياً من محطات الطاقة الكبيرة والمصافي وخطوط الأنابيب والبنية التحتية الأخرى المعرضة للاضطرابات الناجمة عن أحداث مثل الكوارث الطبيعية. على سبيل المثال، في عام 2005م، تسبب إعصار كاترينا في شل نحو 10 % من آبار النفط والغاز الأمريكية المنتجة للنفط ومصافي النفط في خليج المكسيك لأكثر من عام. سيكون هذا التحول من الطاقة الكلية المركزية إلى الطاقة الصغيرة المشتتة مماثلاً لتحول صناعة الحاسوب من حواسيب مركزية كبيرة إلى أجهزة حاسوب وأجهزة حاسوب محمولة وأجهزة حاسوب محمولة أصغر حجماً ومشتتة بشكل متزايد. ومن شأنه أن يحسن الأمن القومي والاقتصادي، لأن البلدان ستعتمد على مجموعة متنوعة من مصادر الطاقة المتجددة المحلية الصغيرة والمشتتة بدلاً من عدد صغير من محطات الفحم والطاقة النووية الكبيرة والضعيفة. **ثانياً**: تجمع أفضل البدائل بين تحسين كفاءة الطاقة واستخدام مزيج من الوقود الحيوي المنتج بشكل مستدام للانتقال إلى مزيج متنوع من موارد الطاقة المتجددة المتاحة محليّاً على مدى العقود العديدة القادمة. بدلاً من الاعتماد في الغالب على الوقود الأحفوري غير المتجدد المنتج في مكان آخر، سيستفيد الناس من موارد الطاقة المتجددة الوفيرة والمتاحة محليّاً. على سبيل المثال، تحصل كوستاريكا على 92 % من طاقتها من مصادر متجددة. وتحصل أيسلندا على كل طاقتها من الموارد المتجددة وتأمل في استخدام هذه الطاقة لإدارة البلاد باستخدام الهيدروجين. **ثالثاً**: بسبب الإمدادات والأسعار المنخفضة بشكل مصطنع، سيستمر استخدام الوقود الأحفوري بكميات كبيرة.

يتمثل التحدي في إيجاد طرائق للحد من الآثار البيئية الضارة لاستخدام الوقود الأحفوري على نطاق واسع، مع التركيز بشكل خاصٍّ على الحد من تلوث الهواء وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري، حيث يجري تطبيق البدائل الأقل ضرراً على مراحل. إن جعل مدننا أكثر استدامة واستخدام زراعة أكثر استدامة من شأنه أيضاً أن يقلل من استخدام الطاقة والنفايات وما ينتج عن ذلك من تلوث وتدهور بيئي.




**الحلول: نظام طاقة لامركزي تُنتج فيه الكهرباء بوساطة عدد كبير من أنظمة الطاقة الصغيرة المتفرقة صغيرة الحجم. قد ينتج البعض الطاقة في الموقع؛ قد يغذي الآخرون الطاقة التي ينتجونها في نظام التوزيع الكهربائي التقليدي. على مدى العقود القليلة المقبلة، يتوقع العديد من محللي الطاقة والماليين حدوث تحول إلى هذا النوع من أنظمة الطاقة.**

اقترح العديد من محللي الطاقة المساعدة في الانتقال إلى مستقبل طاقة أكثر استدامة على النحو التالي:

## تحسين كفاءة الطاقة

- ✓ زيادة معايير كفاءة الوقود للمركبات والمباني والأجهزة.
- ✓ إجبار الحكومة على شراء المركبات الفعالة والأجهزة الأخرى.
- ✓ تقديم ائتمانات ضريبية كبيرة لشراء السيارات والمنازل والأجهزة ذات الكفاءة.
- ✓ تقديم ائتمانات ضريبية كبيرة للاستثمارات في كفاءة الطاقة.
- ✓ مكافأة المرافق لخفض الطلب على الكهرباء.
- ✓ زيادة البحث والتطوير في مجال كفاءة الطاقة بشكل كبير.

## المزيد من الطاقة المتجددة

- ✓ زيادة استخدام الطاقة المتجددة بشكل كبير.
- ✓ تقديم إعانات كبيرة وائتمانات ضريبية لاستخدام الطاقة المتجددة من خلال تضمين التكاليف البيئية في الأسعار لجميع موارد الطاقة.
- ✓ تشجيع شراء الحكومة لأجهزة الطاقة المتجددة.
- ✓ زيادة البحث والتطوير في مجال الطاقة المتجددة بشكل كبير.

## تقليل التلوث والمخاطر الصحية

- ✓ خفض استخدام الفحم بنسبة 50 % في عام 2020م.
- ✓ التخلص التدريجي من دعم الفحم.
- ✓ جباية الضرائب على استخدام الفحم والنفط.
- ✓ التخلص التدريجي من دعم الطاقة النووية.

## • دور الاقتصاد والسياسة والتعليم في التحول إلى طاقة أكثر استدامة

بالنسبة لمعظم المحللين، يتطلب التحول إلى موارد طاقة أكثر استدامة استخدام الاستراتيجيات الاقتصادية والسياسية. يجب على الحكومات على المستويات المحلية وحكام الولايات والوطنية تطوير وإدامة سياسات طاقة متسقة لتشجيع مثل هذا التحول. ستحتاج الشركات إلى سياسات متسقة وطويلة الأجل من أجل وضع خطط طويلة المدى. يمكن للحكومات استخدام ثلاث استراتيجيات للمساعدة في تحفيز أو تثبيط الاستخدام قصير الأجل وطويل الأجل لمورد طاقة معين:

**الاستراتيجية الأولى**: يمكنهم إبقاء الأسعار منخفضة بشكل مصطنع لتشجيع استخدام موارد الطاقة المختارة. ويمكنهم تقديم إعانات البحث والتطوير والإعفاءات الضريبية وسن اللوائح التي تساعد على تحفيز تطوير واستخدام موارد الطاقة التي تتلقى مثل هذا الدعم.

على مدى عقود، تم استخدام هذا النهج لتحفيز تطوير واستخدام الوقود الأحفوري والطاقة النووية في الولايات المتحدة وفي معظم البلدان المتقدمة الأخرى. على سبيل المثال، وفقاً لوزارة الطاقة الأمريكية ووكالة الطاقة الدولية، بين عامي 1974م و 2005م، قدمت الحكومة الفيدرالية الأمريكية (بدولارات 2005م) 47.9 بليون دولار في أبحاث الطاقة وتطويرها من أجل الانشطار والاندماج النووي، و20 بليون دولار للوقود الأحفوري، 12.4 بليون دولار للطاقة المتجددة و11.7 بليون دولار لتحسين كفاءة الطاقة.

وقد أدى ذلك إلى خلق مجال اقتصادي غير متكافئ يشجع على إهدار الطاقة والاستنفاد السريع لموارد الطاقة الغير متجددة ويثبط تحسين كفاءة الطاقة وتطوير الطاقة المتجددة. إذا كانت الإعانات منصفة وجرى تضمين التكاليف البيئية لموارد الطاقة في أسعار السوق، فمن الممكن أن تنتشر مزارع الرياح في المناظر الطبيعية، وسيقود الناس في الغالب السيارات الهجينة الموصلة

بالكهرباء، وستكون معظم المصابيح الكهربائية عبارة عن مصابيح فلورية مضغوطة أو مصابيح LED، وستكون المباني كذلك كفؤة في الطاقة، ولن تعتمد الولايات المتحدة ودول أخرى بشكل كبير على النفط المستورد.

**الاستراتيجية الثانية:** التي يمكن أن تستخدمها الحكومات هي إبقاء أسعار الطاقة مرتفعة بشكل مصطنع لتثبيط استخدام أحد الموارد. يمكنهم رفع سعر مورد الطاقة الغير متجددة عن طريق إلغاء الإعفاءات الضريبية الحالية وغيرها من أشكال الدعم، أو سن لوائح تقييدية، أو إضافة ضرائب على استخدامه. سيؤدي ذلك إلى زيادة الإيرادات الحكومية، وتشجيع التحسينات في كفاءة الطاقة، وتقليل الاعتماد على الطاقة المستوردة، وتقليل استخدام مورد طاقة محدود الإمداد في المستقبل. لجعل هذا مقبولاً للجمهور، يدعو المحللون الحكومة إلى تعويض ضرائب الطاقة عن طريق خفض ضرائب الدخل والرواتب وتوفير شبكة أمان للطاقة للأفراد ذوي الدخل المنخفض.

**الاستراتيجية الثالثة:** هي التأكيد على توعية المستهلك. حتى لو قدمت الحكومات حوافز مالية سخية لكفاءة الطاقة واستخدام الطاقة المتجددة، فلن يقوم الناس بمثل هذه الاستثمارات إذا لم يكونوا على دراية -أو لديهم معلومات مضللة- بشأن توفر مثل هذه الخيارات والمزايا والعيوب، والتكاليف البيئية الخفية المقارنة لمصادر الطاقة المختلفة. على سبيل المثال، يوجد عدد أكبر من سخانات المياه بالطاقة الشمسية في ألمانيا الملبدة بالغيوم مقارنة بفرنسا وإسبانيا المشمستين، ويرجع ذلك في الغالب إلى قيام الحكومة الألمانية بتوعية الجمهور بفوائد هذه التقنية. الخبر السار هو أننا نمتلك حالياً التقنية والإبداع والثروة اللازمة للانتقال إلى مستقبل طاقة أكثر استدامة في حياتنا. ويمكن للناس أيضاً صنع الفرق بأموالهم من خلال رفض شراء منتجات غير فعَّالة وضارة بالبيئة وعن طريق السماح للمديرين التنفيذيين في الشركة بمعرفة خياراتهم.

# الفصل التاسـع

## جهود المملكة في تطوير الطاقة واستدامتها

- نظرة إحصائية عن إقتصاديات الطاقة
- سياسة المملكة في تعزيز الطاقة والبيئة
- مشاريع الطاقة المتجددة
- سلاسل القيم في صناعة الطاقة
- توقعات النمو الاقتصادي العالمي
- نحو إقتصاد دائري أكثر استدامة
- مشروع نيوم للهيدروجين الأخضر
- سلاسل التوريد في النفط والغاز

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

# جهود المملكة في تطوير الطاقة واستدامتها

## مُقَدِّمَة

يشهد قطاع الطاقة العالمي تحولا من مصادر الوقود الأحفوري مثل الفحم والنفط والغاز إلى أكثر مصادر الطاقة المتجددة استدامة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية. تم تصميم تحول الطاقة هذا لتقليل انبعاثات الكربون المرتبطة بالطاقة ومكافحة تغير المناخ من خلال زيادة حصة مصادر الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة واستكشاف كيفية جعل مصادر الطاقة التقليدية محايدة للكربون. على الرغم من الصعوبات التي فرضتها جائحة كورونا، زادت الاستثمارات في تقنية تحول الطاقة بنسبة 70 % منذ عام 2019م. ويتطلب تحقيق أهداف صافي الصفر المرغوبة؛ الاستثمار بمعدل وحجم لا مثيل لهما.

تركز رؤية المملكة العربية السعودية 2030م الطموحة على تحقيق أهدافها اقتصاديًا واجتماعيًا وثقافيًا من خلال ثلاثة محاور أساسية: مجتمع نابض بالحياة، واقتصاد مزدهر، وأمة طموحة. تعد الطاقة محورًا رئيسيًا في الرؤية حيث تعمل المبادرة السعودية الخضراء على زيادة اعتمادها على الطاقة النظيفة وتعويض الانبعاثات وحماية البيئة. تخطط المملكة بحلول عام 2030م لتوليد 50 % من احتياجاتها من الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة والنصف الآخر من الغاز. يعكس استثمار المملكة في الطاقة المتجددة التزامها بالاستدامة والتخفيف من آثار تغير المناخ. ومن خلال جعل الطاقة المتجددة ركيزة أساسية لاستراتيجيتها الوطنية، فإن المملكة تنضم إلى الجهود العالمية لمكافحة تغير المناخ وتعزيز مستقبل مستدام. وهذا الالتزام أمر بالغ الأهمية لتعزيز التعاون الدولي والابتكار في مجال تقنيات الطاقة المتجددة.

تحتل المملكة مرتبة متقدمة جداً في العالم من حيث الاحتياطيات الضخمة المؤكدة من النفط والغاز، واعتمادها بشكل كبير على الوقود الأحفوري لإمداداتها من الطاقة. في عام 2019م، تم توليد 56.4 % من الكهرباء عن طريق الغاز، يليه النفط بنسبة 43.5 %، في حين تساهم موارد الطاقة المتجددة بحوالي 0.1 % فقط. إلا انها من أوائل الدول التي ساهمت في أبحاث الطاقة المتجددة من خلال برامج التعاون الدولي المشتركة الكبرى لقناعتها بأن الاستخدام غير المستدام للوقود الأحفوري والأنشطة الأخرى مسؤولة بشكل رئيسي عن انبعاثات غازات الدفيئة الكبيرة والتي هي بازدياد مستمر.

قُدر حجم سوق الطاقة المتجددة في المملكة بمبلغ 336.8 مليون دولار أمريكي في عام 2022م. ومن المتوقع أن تنمو صناعة الطاقة المتجددة بمبلغ 109 مليون دولار أمريكي تقريبا بحلول عام 2032م، مما يُظهر معدل نمو سنوي مركب بنسبة 42.44 % خلال الفترة المتوقعة (2023 – 2032م). وبالفعل شرعت المملكة العربية السعودية في السير على طريق تنويع مصادر الطاقة لتوليد الكهرباء لمعالجة المخاوف البيئية وتعظيم العائد المالي من احتياطيات الوقود الأحفوري. ومع ذلك، تنعم البلاد بإشعاع شمسي عالٍ ومورد جيد للرياح، مما يخلق الفرصة للتحول القائم على الطاقة المتجددة لتوليد الطاقة الكهربائية.

قامت المملكة بالعديد من المبادرات والمشاريع الرئيسية كجزء من تحولها نحو اقتصاد أكثر استدامة ودورية. وتجسد هذه المبادرات التزام المملكة بتنويع اقتصادها، وتقليل النفايات، وتعزيز كفاءة استخدام الموارد، وتشجيع الابتكار. ومنها على سبيل المثال: مشروع دومة الجندل للرياح، ومشروع محطة سكاكا للطاقة الشمسية، ومشروع سدير للطاقة الشمسية الكهروضوئية، ومشروع

الشعيبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية. تهدف هذه المشاريع إلى تسخير الموارد الشمسية الوفيرة لتوليد طاقة نظيفة وتقليل اعتمادها على الوقود الأحفوري. ومنها برامج إدارة النفايات وإعادة تدويرها لتقليل كمية النفايات المرسلة إلى مدافن النفايات، كذلك أنشأت البرنامج الوطني للاقتصاد الدائري للكربون (CCENP) لمعالجة تغير المناخ وتعزيز التنمية المستدامة.

يناقش هذا الفصل الطريق الذي يجب أن تسلكه المملكة للمضي قدماً نحو الاقتصاد الأخضر في ضوء آفاق الاقتصاد العالمي، والطلب على النفط التقليدي وغير التقليدي، والتطورات في مصادر الطاقة المتجددة والديناميكيات الديموغرافية. والهدف من ذلك هو إنتاج خارطة طريق للطاقة المستدامة تحدد بوضوح مسارًا للمملكة لتحقيق إمكاناتها الكاملة لمزيج الطاقة الأمثل من خلال اكتساب وتطوير القدرات في تقنيات الطاقة النظيفة والأعمال التجارية البيئية.

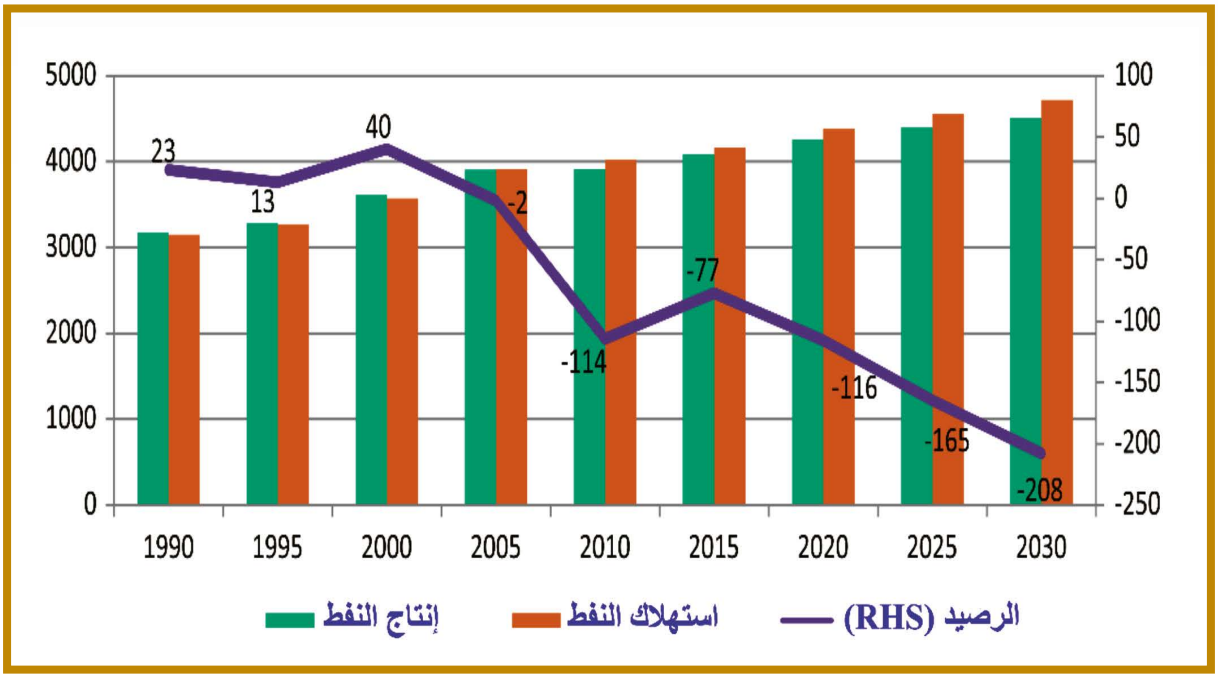
# نظرة إحصائية عن اقتصاديات الطاقة

## • النمو الاقتصادي

بحسب إحصاءات عام 2022م، فإن المملكة، التي تحتل المرتبة 14 عالمياً من حيث المساحة، يقطنها نحو 35 مليون نسمة. من حيث الكثافة السكانية تحتل البلاد المرتبة 218 في العالم من بين 248 دولة. تم تحديد مراكز تصنيف المملكة العربية السعودية مقارنة بالدول الأخرى بناءً على قائمة واسعة من المؤشرات الاقتصادية والطاقة والابتكارية والتعليمية، بالإضافة إلى المقاييس التي تعكس حالة البيئة. وتشمل المؤشرات الاقتصادية، على سبيل المثال، الناتج المحلي الإجمالي للفرد، ومتوسط نمو الناتج المحلي الإجمالي السنوي، وصادرات التقنية المتقدمة، وغيرها.

تتضمن قائمة مؤشرات الطاقة الاحتياطيات المؤكدة من النفط والغاز، ونسبة الإنتاج إلى الاستهلاك مجتمعة، واستخدام الطاقة، وما إلى ذلك. ويحتوي كل مؤشر على قائمة مرتبة بالدول الأعضاء المدرجة. ونظرًا لاختلاف عدد الدول في كل تصنيف لكل مؤشر، يتم عرض موضع الدولة محل الاهتمام في التصنيف على مخطط خاص، حيث يكون المحور العمودي مقياسًا نسبيًا موحدًا من 0 إلى 1، التقنية يحدد المحور الأفقي المؤشرات المختلفة والأرقام المعنية المتعلقة بالأوصاف الواردة أدناه.

وبالتالي، في مثل هذا الرسم البياني النسبي «0–1»، يتم تمييز موقع الدولة بنقطة تتناسب مع موقعها في قائمة التصنيف الأصلية. إذا كانت الدولة من بين الدول الرائدة فيما يتعلق بالمؤشر المحدد، فسيتم وضع علامة قريبة من 1 في المنطقة الخضراء العليا على الرسم البياني ذي الصلة «0–1»، وإذا كانت الدولة خارج قائمة التصنيف، فسيتم وضع علامة عليها في المنطقة الحمراء السفلية من الرسم البياني «0–1»، وما إلى ذلك (Aenert, 2023).




**تعتبر المملكة من أسرع الدول نمواً اقتصادياً في المنطقة، وهو ما يظهر في المخطط المقارن للمؤشرات الاقتصادية المختلفة** (Aenert, 2023)

وقاعدة الاقتصاد هي قطاع النفط، حيث يشكل الدخل منه حوالي 87 % من ميزانية الدولة و42 % من الناتج المحلي الإجمالي. وفي جميع الحالات تقريبًا، يكون ترتيب المملكة أعلى من المتوسط العالمي، في النصف العلوي من الرسم البياني (أي من بين 50 % من الدول المدرجة في التصنيف). نظرًا لقاعدة الموارد الكبيرة والنظام المالي المستقر، يقع مستوى الناتج المحلي الإجمالي والقيمة السوقية للأسهم المتداولة علنًا واحتياطيات النقد الأجنبي والذهب في الربع العلوي من الرسم البياني (أي من بين 25 % من أفضل الدول في العالم المشمولة في التصنيف).

منذ أوائل التسعينيات، شهدت المملكة نموًا مطردًا في الناتج المحلي الإجمالي عند تعادل القوة الشرائية، بشكل عام، ونصيب الفرد. ومع ذلك، انخفض الناتج

المحلي الإجمالي بتعادل القوة الشرائية من 1.761 تريليون دولار في عام 2015م إلى 1.543 تريليون دولار (المرتبة 17 عالميًا) في عام 2020م. الناتج المحلي الإجمالي تعادل القوة الشرائية للفرد أقل إلى حد ما (المرتبة 35 في العالم)، مما يدل على ديناميكيات سلبية: من 54500 دولار في عام 2017 إلى 44300 دولار في عام 2020م. وتغير معدل التضخم من 0.9 % في عام 2017م إلى 2 % في عام 2019م؛ ووفقا لهذا المؤشر، تحتل المملكة المرتبة الثالثة في العالم. وبحسب تقرير التنافسية العالمية الذي قدمه المنتدى الاقتصادي العالمي عام 2019م، تحتل المملكة المرتبة 36 من إجمالي يقدر بـ 141 دولة؛ والجدير بالذكر أن الدولة خسرت مركزًا واحدًا في تصنيف العام الماضي. ويعكس هذا التصنيف مدى فعالية استخدام الموارد الخاصة للدولة لتحقيق التنمية المستدامة. وبالإضافة إلى عدد من المؤشرات الاقتصادية، يأخذ هذا المؤشر في الاعتبار أيضًا متغيرات مثل التعليم والصحة ومستوى الابتكار وما إلى ذلك. وفي قائمة الدول التي صدرت منتجات التقنية الفائقة في عام 2019-2020م، احتلت الدولة المركز 65 من أصل 134 دولة. وبحسب مؤشر الحرية الاقتصادية، الذي يعتمد على حرية الأعمال، والتحرر من الإجراءات الحكومية، وحماية الملكية، والتحرر من الفساد، احتلت السعودية المركز 63 في عام 2021م من بين 178 دولة تم بحثها. من حيث احتياطي الذهب واحتياطيات النقد الأجنبي، تحتل المملكة المرتبة الرابعة في العالم.

وفقًا لمؤشر متوسط نمو الناتج المحلي الإجمالي بالنسبة المئوية على مدى السنوات العشر الماضية، احتلت المملكة في عام 2020م المرتبة 92 من بين 206 دولة. ومن حيث الدين العام، الذي يتم حسابه كنسبة مئوية من الناتج المحلي الإجمالي ، احتلت المملكة المرتبة 193 من بين 210 دولة تم بحثها في عام 2017م.

## • مصادر الطاقة

تمتلك المملكة ثاني أكبر احتياطي نفطي في العالم، بعد فنزويلا، وخامس أكبر احتياطي من الغاز الطبيعي. تجدر الإشارة إلى أن أساس احتياطيات النفط في فنزويلا هو النفط الثقيل (النفط الثقيل للغاية)، الذي تعتبر جودته أقل من معظم النفط السعودي. وتبلغ حصة احتياطي النفط 15.6 % من الإجمالي العالمي، وتبلغ حصة الغاز الطبيعي 4.4 % أيضاً. ومن حيث طن مكافئ النفط، وفقًا لبيانات عام 2021م، بلغت احتياطيات النفط المؤكدة 80.6 %، والغاز الطبيعي 19.4 %. وبالقيمة المطلقة، قدرت الاحتياطيات النفطية المؤكدة في نهاية عام 2020م بنحو 259 مليار برميل، ؛ وترد أرقام مماثلة في 297.5 مليار برميل؛ في المصدر 258.6 مليار برميل. وبحسب وزارة الطاقة، بلغ الاحتياطي النفطي المؤكد في عام 2015م، مستوى 266.455 مليار برميل.

تعد المملكة إلى جانب روسيا، أكبر مصدر للنفط في العالم (6.6 مليون برميل يوميًا في عام 2020م، بانخفاض حوالي 300 ألف برميل يوميًا عن عام 2019م)، فضلاً عن كونها أحد منتجي النفط الرائدين (9.2 مليون برميل يوميًا في عام 2020م). وتنافس روسيا والولايات المتحدة. ووفقا لذلك، فإن إنتاج الطاقة الأولية في المملكة أعلى بمقدار 2.7 مرة من الاستهلاك.

قدرت إدارة معلومات الطاقة الأمريكية احتياطيات الغاز الطبيعي في السعودية عام 2021م بـ 333 تريليون قدم مكعب، ووكالة المخابرات المركزية بـ 9.422 تريليون متر مكعب. وفي تقرير شركة بريتيش بتروليوم، بلغت احتياطيات الغاز الطبيعي المؤكدة في عام 2020م ستة تريليون متر مكعب. وبحسب وزارة

الطاقة ، قدرت احتياطيات الغاز الطبيعي المؤكدة وفقا لبيانات عام 2015م بنحو 303.251 مليار قدم مكعب، في حين بلغت، وفقا لتقرير منظمة الأوابك، في نهاية عام 2016م، 8619 مليار متر مكعب.

تتمتع المملكة، بسبب موقعها الجغرافي، بموارد كبيرة من الطاقة الشمسية. مستوى الإشعاع الشمسي المباشر في معظم أنحاء المملكة مرتفع جدًا ويتراوح بين 5.5–6.9 كيلووات ساعة/م2/يوم. ويمكن ملاحظة الحد الأقصى لمستوى الإشعاع الشمسي في جنوب غرب المملكة وعلى طول ساحل البحر الأحمر – حوالي 7.4–8.2 كيلووات ساعة/م2/يوم. توزيع موارد الرياح لا تتجاوز سرعة الرياح 5.5–7.5 م/ث. ويلاحظ ذروة نشاط الرياح في المناطق الساحلية وفي الشمال الشرقي حيث يمكن أن تتجاوز سرعة الرياح 7.5 م/ث على ارتفاع 50م. ووفقا لبيانات عام 2015م، قدرت إمكانات الطاقة الحرارية الأرضية بنحو 3000–5000 ميجاوات. بلغ مستوى توليد النفايات البلدية في المملكة في عام 2016، 1.4 كغ للفرد يوميًا، ومن المتوقع أن ينمو إلى 1.7 كغ للفرد يوميًا في عام 2025. وهذا الرقم أقل بكثير من معظم الدول المتقدمة ويتوافق تقريبًا مقارنة بدولة الإمارات العربية المتحدة – 1.6 كغ للفرد يوميًا (Aenert, 2023).

## • توازن الطاقة

في عام 2021م في السعودية، بلغ إجمالي إنتاج الطاقة الأولية 25.586 وحدة حرارية بريطانية، في حين بلغ الاستهلاك عند مستوى 9.176 وحدة حرارية بريطانية. وبالتالي، تبلغ حصة الاستهلاك المحلي في إنتاج الطاقة الأولية 36 %، مما يعني أن المملكة مستقلة إلى حد كبير في مجال الطاقة. تعد البلاد مصدرًا مهمًا للنفط الخام والغاز. بلغ نصيب الفرد من استهلاك الطاقة في عام 2021م، 268.99 مليون

وحدة حرارية بريطانية للشخص الواحد، واستهلاك الطاقة لكل ناتج محلي إجمالي 4.98 ألف وحدة حرارية بريطانية لكل دولار أمريكي بتعادلات القوة الشرائية.

وفقًا للمراجعة الإحصائية لشركة بريتيش بتروليوم للطاقة العالمية 2022، بلغ إجمالي استهلاك الطاقة الأولية في المملكة في عام 2021م، 10.82 إكساجول، حوالي 39 % منها غاز طبيعي، و60.09 % نفط، ومصادر الطاقة المتجددة 0.1 %. وفي تقرير منظمة الأوابك، قدر استهلاك الطاقة عام 2016 بنحو 4539.4 ألف برميل من المكافئ النفطي يوميا.

وبحسب عام 2019م، بلغت صادرات النفط الخام مستوى 3185 ألف برميل يوميا. وفي تقرير شركة بريتيش بتروليوم، قدرت صادرات النفط من المملكة بنحو 7696 ألف برميل يوميًا في عام 2021م. أظهر إنتاج واستهلاك الغاز الطبيعي بين عامي 2001م و2020م نموًا قويًا، وفي عام 2020 وصل إلى مستوى 4068 مليار قدم مكعب، مقارنة بـ 1986 مليار قدم مكعب في عام 2001م. وفقًا لإنتاج الغاز في عام 2021م، بلغ 117.3 مليار متر مكعب، وفي عام 2015م يُظهر أرقامًا أعلى 119.83 مليار متر مكعب. وبلغ استهلاك الغاز في عام 2022م، بحسب تقرير شركة بريتيش بتروليوم، مستوى 117.3 مليار متر مكعب.

# المملكة العربية السعودية • الوقود الأحفوري

**الاحتياطيات التقليدية المؤكدة من الوقود، مليار طن من مكافئ النفط (٪):**

| | |
|---|---|
| نفط | 35.28 (80.6) |
| غاز طبيعي | 8.49 (19.4) |
| المجموع الكلي | 43.77 (100) |

*Source: Based on the U.S. Energy Information Administration data (Dec 2022)*

**حقول استخراج النفط الرئيسية**

| | |
|---|---|
| 1 | غوار |
| 2 | السفانية (بحري) |
| 3 | خريص |
| 4 | منيفة (بحري) |
| 5 | الشيبة |
| 6 | القطيف |
| 7 | الخرسانية |
| 8 | زولوف |
| 9 | بقيق |
| 10 | الخفجي (بحري) |
| 11 | |

**مخازن النفط الرئيسية**

| | |
|---|---|
| 1 | جبيل |
| 2 | رأس الجعيمة |
| 3 | ينبع |

**مصافي النفط (Dec 2018), bbl/d**

| | | |
|---|---|---|
| 1 | رأس تنورة، أرامكو السعودية | 550 000 |
| 2 | بترورابغ، أرامكو السعودية / سوميتومو | 400 000 |
| 3 | ينبع، أرامكو السعودية | 245 000 |
| 4 | الرياض، أرامكو السعودية | 126 000 |
| 5 | جدة، أرامكو السعودية | 78 000 |
| 6 | SATORP جبيل | 400 000 |
| 7 | SASREF جبيل | 300 000 |
| 8 | SAMREF ينبع | 400 000 |
| 9 | YASREF ينبع | 400 000 |
| 10 | جازان، أرامكو السعودية | 400 000 |

**محطات النفط الرئيسية**

| | |
|---|---|
| 1 | رأس تنورة |
| 2 | رأس الجعيمة |
| 3 | ينبع |
| 4 | الجبيل |
| 5 | جدة |

**محطات معالجة الغاز الطبيعي الرئيسية**

| | |
|---|---|
| 1 | واسط |
| 2 | شدقوم |
| 3 | الحوية |
| 4 | حرض |
| 5 | الخرسانية |
| 6 | مدين |
| 7 | ينبع |
| 8 | الشيبة |
| 9 | خريص |

**الغاز الطبيعي الرئيسي مجالات الاستخراج:**

| | |
|---|---|
| 1 | الغوار (حرض) |
| 2 | كاران (بحري) |

- خط أنابيب النفط الخام
- خط أنابيب الغاز الطبيعي
- نقاط اتصال بداية/نهاية خط الأنابيب
- عابر للحدود
- حقل نفط
- حقل غاز

اعتبارًا من عام ٢٠٢١، كان لدى المملكة العربية السعودية ٢٥٨,٦ مليار برميل من احتياطيات النفط المؤكدة، واستخرجت حوالي ١٠,٨ مليون برميل من النفط الخام يوميًا، و٣٣٢,٧ تريليون قدم مكعب من الغاز الطبيعي المؤكد، واستخرجت حوالي ٤٠١٨,٠ مليار قدم مكعب من الغاز الطبيعي. تشمل البنية التحتية للنفط التقليدي في المملكة العربية السعودية ١٠ مصافي نفط عاملة بطاقة إجمالية لمعالجة النفط الخام تبلغ ٣,٢٩٩,٠٠٠ برميل في اليوم؛ بعض محطات تصدير النفط ومخازن النفط. ويوجد ٥١١٧ كيلومترًا من النفط الخام، و١١٨٣ كيلومترًا من غاز البترول المسال، و ١١٥١ كيلومترًا من خطوط أنابيب المنتجات المكررة. الغاز الطبيعي التقليدي، وبعض محطات معالجة الغاز الطبيعي؛ ٢٩٤٠ كم من الغاز الطبيعي و٢٠٩ كم من خطوط أنابيب المكثفات.

تعتمد المملكة بشكل شبه كامل على الموارد الأحفورية لإنتاج الكهرباء. حيث بلغ إنتاج الكهرباء عام 2021م مستوى 366.66 تيرا وات/ ساعة. وبحسب تقرير منظمة الأوابك، بلغ إنتاج الكهرباء في عام 2016م، 345104 جيجاوات/ ساعة، والاستهلاك 287692 جيجاوات/ساعة. عند النظر في الناتج المحلي الإجمالي لكل وحدة استخدام للطاقة، تحتل المملكة المرتبة 56 من بين 66 دولة شملها الاستطلاع، وهو أقل من المتوسط العالمي، في حين أن نصيب الفرد من استهلاك الطاقة أعلى بكثير - حيث يحتل المرتبة الثامنة من بين 66 دولة. ومن حيث نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء، تحتل المملكة المرتبة 21 عالميًا، أما بالنسبة لمؤشر الجمع بين إنتاج الكهرباء واستهلاكها، فتحتل المملكة المركز 16 في القائمة المصنفة التي تضم 216 دولة (Aenert, 2023).

## • البنيـــة التحتيـــة للطاقـــة

كما ذكرنا سابقاً فإن احتياطيات النفط تمثل 80.6 % من إمكانات الطاقة للموارد الأحفورية. وتتركز احتياطيات النفط الرئيسية في بالقرب من الرياض وفي منطقة الدمام، وعلى طول الخليج العربي. وأكبر حقل نفطي هو حقل الغوار النفطي الذي تم اكتشافه عام 1948م ويحتوي بحسب البيانات الإحصائية على حوالي 75 مليار برميل من النفط. وقد قُدر إنتاج هذا الحقل بنحو 5.8 مليون برميل/يوم في عام 2012م. وتحتوي أكبر الحقول البحرية، مثل السفانية ومنيفة، على أنواع نفط أثقل مثل الخام العربي الثقيل، وتنتج حوالي مليون برميل يومياً. تبلغ الطاقة الإنتاجية الإجمالية لمصافي النفط في البلاد، والتي تتركز على ساحل البحر الأحمر وفي العاصمة وعلى ساحل الخليج العربي، 3,299 ألف برميل/يوم. أكبر مصفاة في البلاد هي رأس تنورة، المملوكة لشركة أرامكو السعودية، بقدرة مركبة تبلغ 550 ألف برميل/يوم اعتبارًا من عام

2015م. محطة النفط الرئيسية هي رأس تنورة (3.4 مليون برميل/يوم)، وأكبر منشأة لتخزين النفط هي الجبيل. بخزان يبلغ 9,170,462 برميل/يوم.

هناك ثلاثة أنواع من خطوط أنابيب النفط، حقول النفط بالمصافي الرئيسية والمستهلكين: خطوط أنابيب للنفط الخام بطول إجمالي يبلغ 5117 كم؛ خطوط أنابيب النفط لنقل المنتجات البترولية بطول 1151 كم؛ وخطوط أنابيب النفط للغاز البترولي المسال بطول 1183 كم. أكبر حقول الغاز هي أيضًا قارية وبحرية. حقل الغاز الطبيعي الرائد هو حقل الغوار للغاز الطبيعي. ويبلغ الإنتاج من هذا الحقل 2.5 مليار قدم مكعب/اليوم. ويتم نقل الغاز عبر خط أنابيب يبلغ طوله 2940 كم، بالإضافة إلى خط أنابيب للمكثفات بطول 209 كم.

وتتمثل البنية التحتية لمعالجة الغاز الطبيعي في العديد من المحطات التي تقع بشكل رئيسي في الجزء الشرقي وعلى شواطئ الخليج العربي، وأكبرها معمل معالجة الغاز الطبيعي في واسط، بسعة 2.5 مليار قدم مكعبة قياسية في اليوم. بلغت حصة الوقود الأحفوري في توليد الكهرباء في المملكة عام 2016م نحو 99.9 %. ويوجد في المملكة 10 محطات كهرباء غازية كبيرة بقدرة أكثر من 300 ميجاوات، و12 محطة نفطية بقدرة أكثر من 500 ميجاوات، و6 محطات كهرباء مجمعة بقدرة 500 ميجاوات، وعدد كبير من المحطات ذات إنتاجية أقل. أكبر محطة لتوليد الكهرباء تعمل بالغاز هي محطة الرياض 7/-8أ/-8ب/-9أ/-9ب/ -9إي، التي تعمل بالغاز الطبيعي، بقدرة إجمالية تبلغ 4742 ميجاوات. أكبر محطة كهرباء نفطية الرياض10، الشركة السعودية للكهرباء بقدرة مركبة تبلغ 3400 ميجاوات، وأقوى محطة كهرباء مشتركة هي غزلان الأولى والثانية بقدرة 4528 ميجاوات.

كما ذكرنا أعلاه، ليس للطاقة المتجددة في المملكة تأثير حاسم على توليد الكهرباء. يمكن أن يصل مستوى الإشعاع الشمسي المتناثر في أكثر المناطق كثافة سكانية إلى 7.0–8.0 كيلووات ساعة/م2/يوم، وهو مورد جيد لإنتاج الطاقة من خلال الخلايا الكهروضوئية. ومع ذلك، فإن مستوى تطور الطاقة الشمسية في المملكة لا يمكن مقارنته بقدرات الموارد. في عام 2019م، أنتجت محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية ذات الطاقة الصغيرة والمتوسطة حوالي 0.68 تيراوات في الساعة، ومحطة وعد الشمال ISCC (50 ميجاوات) ومحطة ISCC ضبا 1 (43 ميجاوات) قيد الإنشاء. أكبر محطة كهروضوئية هي محطة الظهران للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة مركبة تبلغ 10.5 ميجاوات. وفي أبريل من عام 2017م، تم الاعلان عن المرحلة الجديدة من البرنامج الوطني للطاقة المتجددة و30 مشروعًا للطاقة المتجددة بقدرة إجمالية تبلغ 9.5 جيجاوات.

ويجري حالياً إنشاء المركز الوطني لبيانات الطاقة المتجددة، بالإضافة إلى إنشاء مزرعة رياح جديدة في دومة الجندل بقدرة 400 ميجاوات، وعدد من محطات الطاقة الكهروضوئية بقدرة إجمالية 620 ميجاوات. وفي إطار مبادرة الملك سلمان للطاقة المتجددة، تم إطلاق محطة للطاقة الشمسية في منطقة سكاكا بقدرة 300 ميجاوات، ومن المقرر أيضًا إطلاق مزرعة رياح بقدرة 400 ميجاوات في منطقة مدين (Aenert, 2023).

# الكهرباء والطاقة المتجددة في المملكة العربية السعودية

في عام ٢٠١٩، كان لدى المملكة العربية السعودية ٧٦,٨ جيجاوات من قدرة توليد الكهرباء المثبتة.

*Source: U.S. Energy Information Administration (2020)*

## إجمالي توليد الكهرباء من المصادر المتجددة 2020, TWh (%)

- الطاقة الشمسية المركزة 0.15 (55.8)
- الطاقة الشمسية الكهروضوئية 0.11 (42.1)
- طاقة الرياح 0.01 (2.1)

المجموع الكلي: 0.27 (100)

## إجمالي توليد الكهرباء (%) 2021, TWh

- بالوقود الأحفوري 365.70 (99.7)
- مصادر أخرى متجددة 0.96 (0.3)

المجموع الكلي: 366.66 (100)

*Sources: Based on the U.S. Energy Information Administration data (Dec 2022)*

## محطات توليد الكهرباء بالغاز أكثر من 300 ميجاوات:

1. الرياض 7/8-A/8-B/9-A/9-B/9-E, SEC, 4742
2. الرياض-11, DEC, 1750
3. شدقم، أرامكو السعودية , 1424
4. فرس , 1058
5. رابغ , RAWEC, 840
6. بيري , 428
7. رأس تنورة، أرامكو السعودية 320
8. الجعيمة , 308
9. شدقوم، تهامة , 308
10. عثمانية , 308

## محطات توليد الطاقة النفطية أكثر من 500 ميجاوات:

1. الرياض 10, SEC, 1968
2. الرياض 9-C/9-D/9F, SEC, 1856
3. الرياض 3/4/5, SEC, 658
4. رابغ SEC, 7141
5. شويبة , 5600
6. جدة 2 & 3-A/B/C, 1939
7. القصيم 2-3, 1735
8. رابغ , RABEC, 1204
9. ينبع، مرافق , 1030
10. الجبيل , 720
11. تيماء , SEC, 602
12. عسير 573

## محطات توليد الطاقة المجمعة أكثر من 500 ميجاوات:

1. غزلان 1-2, 4128
2. القرية IPP, 3140
3. الجبيل مرافق , 2743
4. الخبر 2-3, 1250
5. حائل 1-2, 666
6. الدمام , 558

## محطة طاقة الرياح أكثر من ١ ميجاوات، ميجاوات: 2.8 توريف 1

## محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية الرئيسية، ميجاوات:

1. محطة سكاكا للطاقة 300.0
2. الظهران 10.5
3. كابسارك للطاقة الشمسية،الرياض 3.5
4. كابسارك للطاقة الشمسية، جدة، 2.0

## محطات الطاقة الشمسية المركزة الرئيسية، ميجاوات:

1. وعد الشمال ISCC 50
2. ضبا ISCC، قيد الإنشاء

## خط 380 كيلو فولت في الخدمة

الشبكة الوطنية 380 كيلوفولت من محطات توليد الطاقة الأخرى ونقاط ربط الشبكة والمحطات الفرعية

عبور الحدود

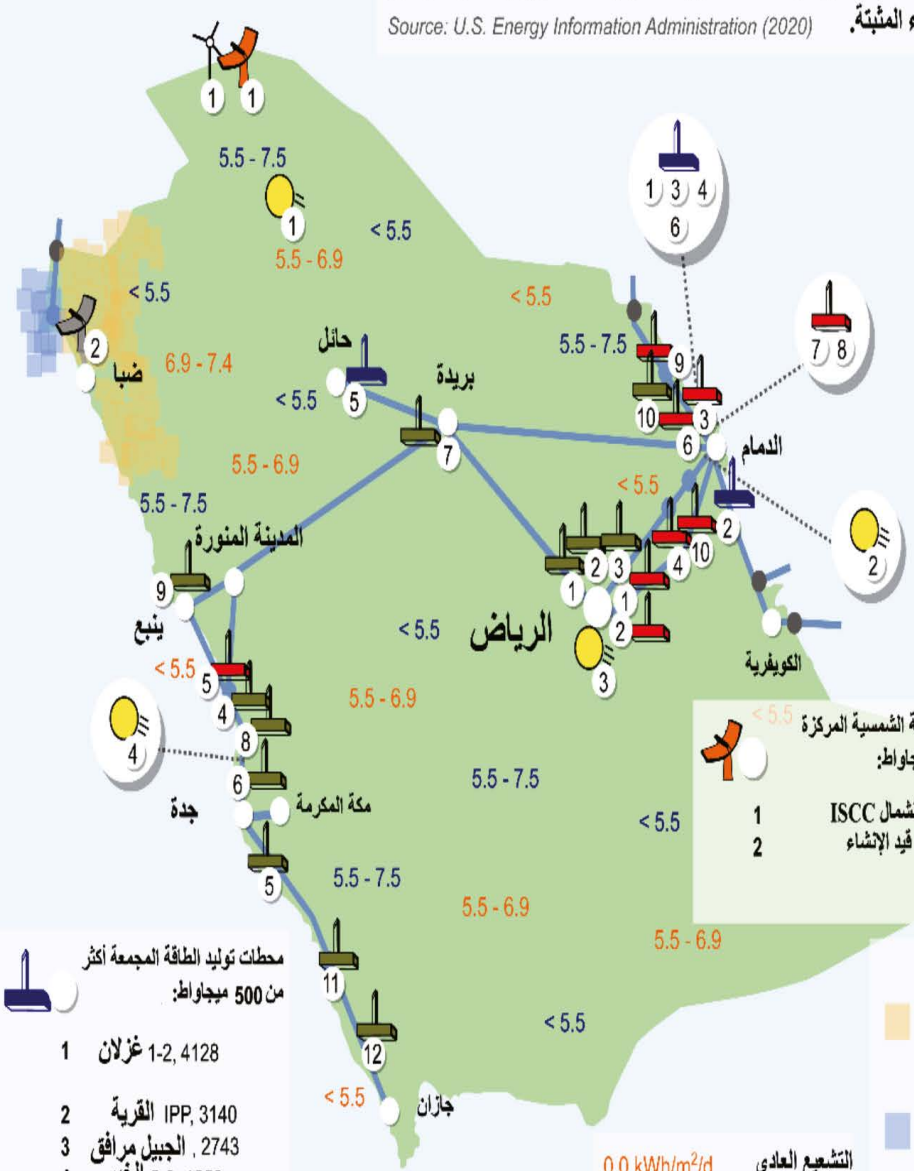
## مناطق النشاط العالي:

كثافة DNI الشمسية الأكثر شيوعًا هي ٧,٤ - ٨,٢ كيلووات ساعة/متر٢ يوميًا، موزعة في الجزء الشمالي الغربي من البلاد، في منطقتي تبوك والمدينة المنورة، بالقرب من ساحل البحر الأحمر.

سرعة الرياح الأكثر شيوعا هي أكثر من ٧,٥ متر/ثانية سنويا على ارتفاع ٥٠ متر موزعة في الجزء الشمالي الغربي من البلاد، بالقرب من ساحل المملكة العربية السعودية على خليج العقبة وشبه جزيرة سيناء.

التشعيع العادي المباشر (DNI) 0.0 kWh/m²/d

سرعة الرياح 0.0 m/s



## • التعليم والابتكار في مجال الطاقة

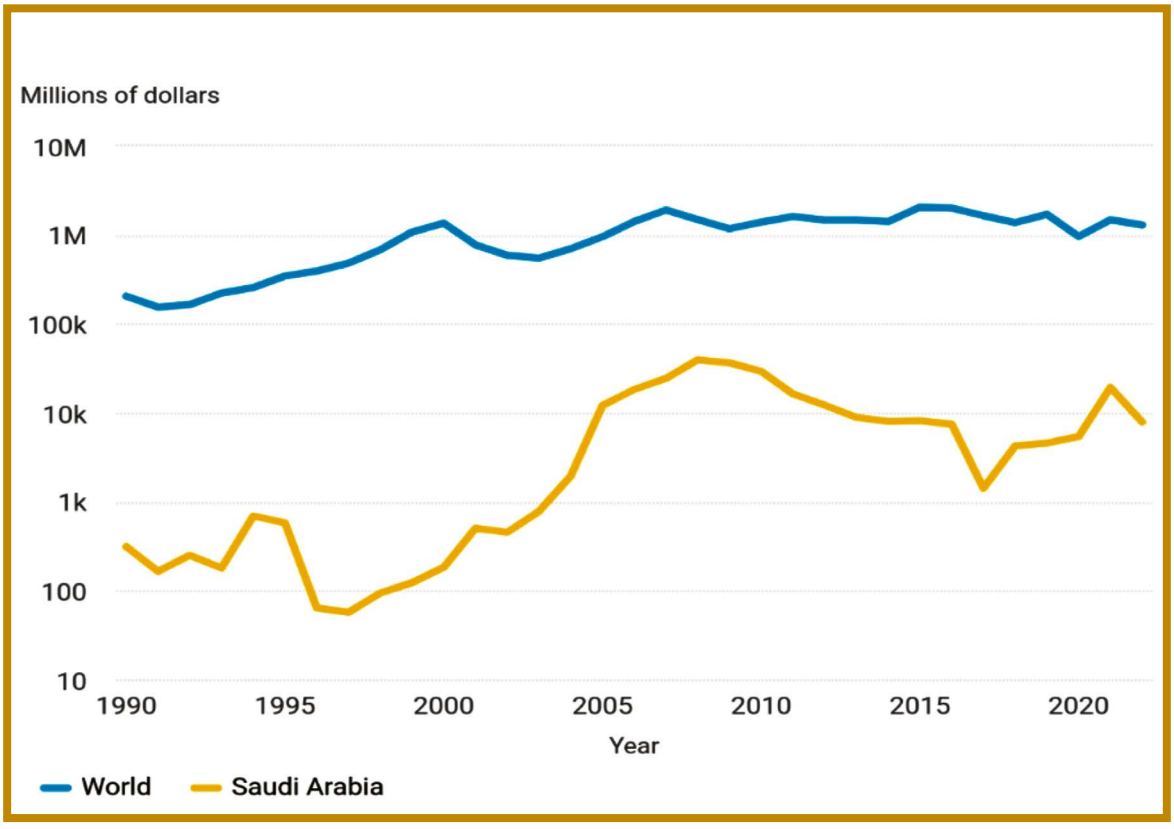
تعد المملكة واحدة من الدول الرائدة على مستوى العالم في مجال التعليم والابتكار، والتي تحدد مسبقًا من نواحٍ عديدة تطورها التكنولوجي في مجال الطاقة. حيث تحتل المملكة المرتبة 66 من بين 132 دولة في تصنيف الدول لمؤشر الابتكار العالمي. من المؤكد أن المملكة من بين الدول الرائدة في تسجيل براءات الاختراع في العديد من مجالات النشاط البشري، بما في ذلك تقنيات الطاقة. وفقًا لعدد براءات الاختراع الممنوحة للمقيمين في المملكة ، سواء داخل الدولة أو خارجها، تحتل المملكة المرتبة 30 عالميًا، لكن من حيث براءات الاختراع المعمول بها، تحتل الدولة المرتبة 61 من بين 109 دول تم النظر فيها.

تتمتع المملكة بمؤشرات عالية جدًا للمنشورات العلمية في المجلات التكنولوجية، وهي من بين الدول الرائدة في عدد مستخدمي الإنترنت. مستوى الإنفاق الحكومي على التعليم مرتفع نسبياً، حيث تحتل الدولة المرتبة العشرين في العالم لهذا المؤشر. تم إلحاق ثماني جامعات سعودية في التصنيف العالمي للجامعات QS. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الناتج المحلي الإجمالي في المملكة مرتفع نسبياً، وبالتالي فإن الإنفاق على التعليم بالقيمة المطلقة أمر ممكن للغاية.

تتمتع المملكة بوضع جيد عند النظر في عدد منشورات المتخصصين في المجلات العلمية والتكنولوجية. كما أنها تحظى بتقدير كبير من قبل Scimago Journal و Country Rank. وعلى هذا النحو، تحتل المملكة المرتبة 38 من بين 240 دولة في تصنيف Scimago، وفي أنشطة المجلة العلمية والتقنية، تحتل المرتبة 37 من بين 197 دولة، وهي الأعلى في المنطقة. وتقوم معظم الجامعات، بتدريب المتخصصين في مجالات الطاقة المختلفة، مثل هندسة البترول، وهندسة الغاز الطبيعي، والهندسة والكيميائية. الهندسة والهندسة البيئية والهندسة الكهربائية وهندسة التعدين.

## • الأهـــــداف العامة لقطاع الطاقـــــة

- الاستغلال الأمثل للموارد الطبيعية ومصادر الطاقة في حماية البيئة والمحافظة عليها من التلوث أو التدهور.
- الحد من النشطات الضارة بالبيئة والصحة العامة.
- تشجيع تكامل التخطيط البيئي في خطط الأعمال للمؤسسات المعنية.
- تعزيز الوعي البيئي والتدريب على جميع المستويات في القطاع.
- تشجيع التعاون على المستوى الوطني والإقليمي والدولي.




**يشير المنحنى إلى ازدياد استثمارات المملكة في مجال توليد الطاقة المتجددة، بما في ذلك الطاقة الشمسية وطاقة الرياح.**

## • التحديات التي تواجه قطاع الطاقة

تشكل المخاوف البيئية تهديدا خطيرا للتنمية المستدامة في كل من البلدان النامية والمتقدمة. لكن التحديات البيئية التي تواجه الاقتصادات الغنية بالنفط في منطقة الخليج خطيرة بشكل خاص بسبب اعتمادها المفرط على مصادر الطاقة التقليدية لتشغيل الكهرباء وأنظمة النقل وأنشطة تحلية المياه. لقد شجعت عقود من دعم النفط محلي الإنتاج والاستهلاك غير الفعالين للطاقة التقليدية، مما ساهم في ارتفاع التلوث والتدهور البيئي مع عواقب اجتماعية واقتصادية كبيرة. وفي الوقت نفسه، يأتي أكثر من 90 % من إيرادات الحكومة من النفط، الذي يشكل حالياً المصدر الرئيسي لتمويل برامج التنمية، والذي لا يمكن أن يستمر بسبب الطبيعة القابلة للنضوب للنفط فضلاً عن استخدامه المتزايد في الاستهلاك المحلي.

ومع ذلك، فإن الاعتماد المتزايد على النفط أدى إلى تهدئة صناع السياسات ودفعهم إلى شعور زائف بالرضا عن النفس، مع بذل جهود ضئيلة أو معدومة لتنويع الاقتصاد بعيدا عن النفط والغاز ونحو التصنيع والخدمات. وعلى نحو مماثل، لم تنتهج هذه الاقتصادات بعد نهجا أكثر توازنا في التعامل مع سياسة الطاقة. ولكن المملكة تمتلك، على وجه الخصوص، كل المقومات اللازمة لتطوير مزايا نسبية كبيرة في مجال التكنولوجيات النظيفة. وتتمتع المملكة بوفرة أشعة الشمس المناسبة لتوليد الطاقة الشمسية؛ فهي تمتلك موارد رياح ضخمة مناسبة لتوليد طاقة الرياح؛ ولديها أكبر عمليات تحلية المياه في العالم دون أن تمتلك تقنية التحلية. ويمكن استثمار الاحتياطيات المالية الحالية للمملكة وصناديق الثروة بشكل كبير، بالإضافة إلى جذب كبار الصناديق الذكية نحو الاستثمار في قطاع الأعمال الخضراء في المملكة. وبالتالي، فإن وفرة الموارد

النفطية في المملكة يمكن أن توفر لها الموارد اللازمة لاكتساب التقنيات البيئية المناسبة لتحقيق الأهداف الاجتماعية والتجارية.

إن العالم يقف عند مفترق طرق حيث «لا يأتي الطلب على أشكال جديدة وأنظف من الطاقة من الاعتبارات البيئية فحسب، بل أيضا من الكمية الهائلة من توليد الطاقة الجديدة التي ستكون ضرورية لتلبية احتياجات العالم أكثر نظافة النمو من الطاقة» (Asplund, 2008). ستستمر الديناميكيات الديموغرافية وسلبيات الوقود الأحفوري ووجود ذروة النفط في فرض ضغوط لا توصف على الطاقة التقليدية، بحيث ستحرم الأجيال القادمة من فوائد هذه الموارد، وستتعرض الإيرادات الحكومية من الهيدروكربونات لمخاطر كبيرة مع الطلب المحلي لأن هذه الموارد تفوق الطلب الخارجي. كما أن عدم التطابق بين الطلب والعرض سيؤدي أيضاً إلى ارتفاع أسعار الطاقة التقليدية، وبالتالي خلق ضغوط إضافية على الأسعار المحلية.

من المتوقع أن تشهد صناعة الطاقة العالمية النظيفة نموًا مضاعفًا من الآن وحتى العقدين المقبلين لتصل إلى 800 مليون طن من مكافئ النفط بحلول عام 2030م (EIA, 2012). ومن المتوقع أن يكون هذا النمو الهائل مدفوعًا إلى حد كبير ببرامج الدعم الحكومية القوية والمتوسعة في جميع أنحاء العالم، وانخفاض تكاليف الطاقة النظيفة بسبب التقنية المحسنة. في جوهر الأمر، حتى لو تلاشى الدعم الحكومي للطاقة المتجددة في المستقبل، فمن المتوقع أن تصبح معظم قطاعات الطاقة المتجددة قادرة على المنافسة مع أنواع الوقود التقليدية.

وفي قطاع الطاقة المتجددة، ستكون الطاقة الشمسية هي النجم الصاعد، حيث أن الطاقة الشمسية الكهروضوئية، على سبيل المثال، قادرة بالفعل على المنافسة مع الكهرباء بالتجزئة في أماكن مثل اليابان، ومن المتوقع أن تصبح

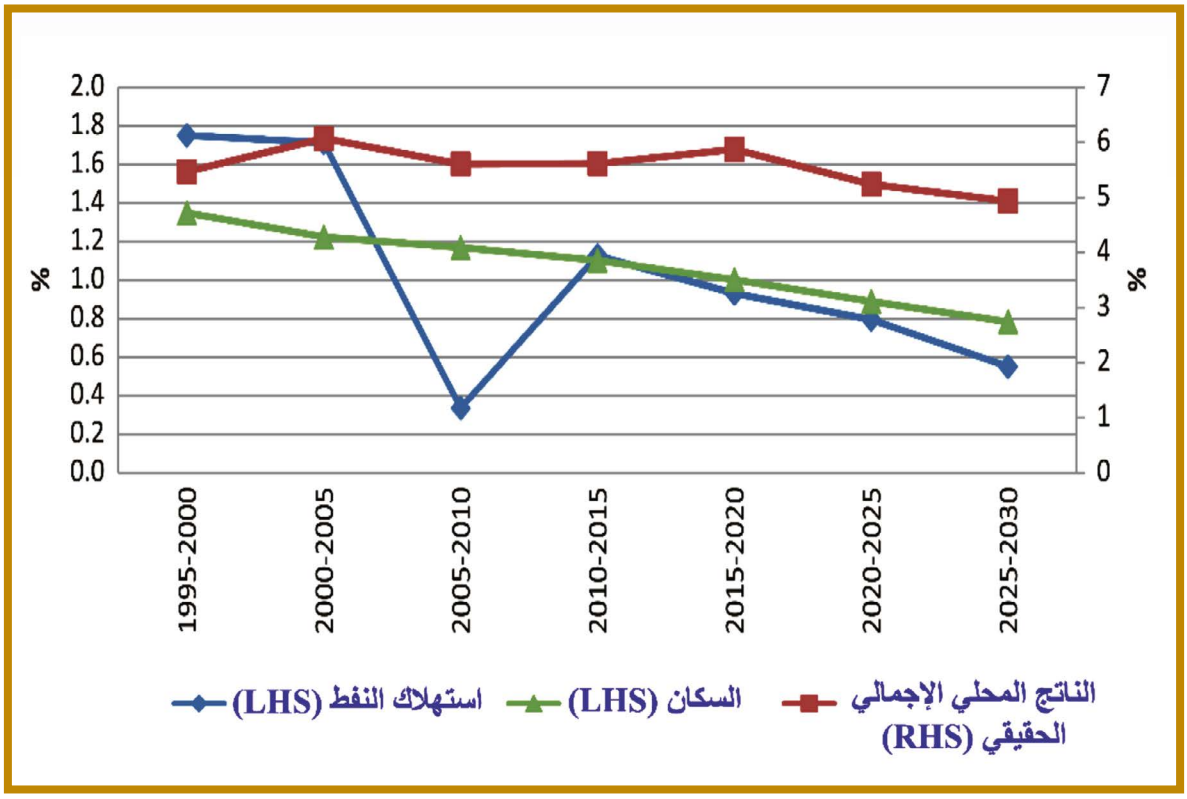
قادرة على المنافسة في العديد من البلدان حول العالم في المستقبل القريب. في الواقع، توقع المحللون أن تظل عوائد ما قبل الضرائب لأعمال الطاقة الشمسية قوية في المنطقة بنسبة 33–38 % خلال العقدين المقبلين (Asplund 2008). توفر هذه النظرة القوية لأعمال الطاقة الشمسية للمملكة فرصًا كبيرة لاكتساب وتطوير قدرات الطاقة الشمسية نظرًا لأنها تمتلك جميع المكونات (أشعة الشمس الوفيرة) لتطوير أعمال مربحة للطاقة الشمسية.

ففي نهاية المطاف، يتزايد الاستثمار في الطاقة الشمسية بسرعة في الاقتصادات الناشئة وكذلك في البلدان المتقدمة، مع تزايد الرغبة من جانب العالم الصناعي في التخلص من محطات الطاقة النووية القائمة في أعقاب الزلزال الياباني في مارس 2011م، والذي أدى إلى تفاقم المشكلة. دمرت محطاتها النووية وأطلقت العنان لعواقب كارثية. ومن ثم، يتعين على المملكة أن تنتهج سياساتها المبنية على مزاياها التنافسية في مصادر الطاقة البديلة والمتجددة، وليس على الطاقة النووية.

# توقعات النمو الاقتصادي العالمي

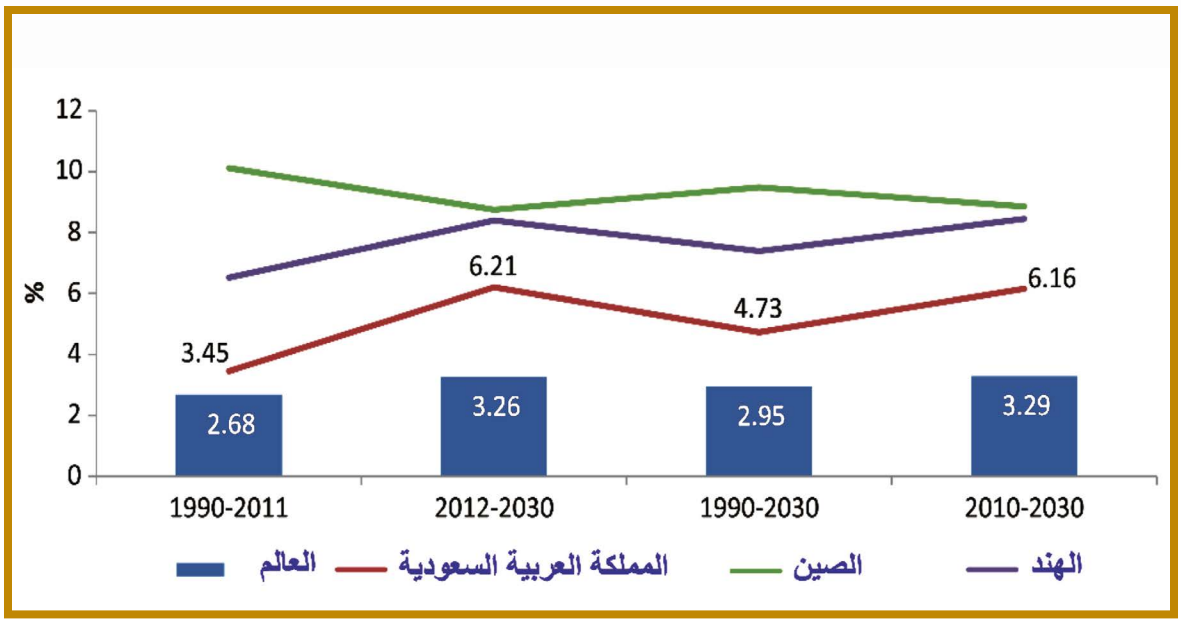
سيظل عدد السكان والدخل المحركين الرئيسيين للطلب العالمي على الطاقة، ومن هنا تأتي الحاجة إلى تحليل توقعات هذه المؤشرات المهمة. على مدى السنوات العشرين الماضية، زاد عدد سكان العالم بمقدار 1.6 مليار نسمة، ولكن معدل النمو يتباطأ. ومن المتوقع أن ينمو عدد سكان العالم بمقدار 1.4 مليار نسمة أخرى على مدى السنوات العشرين المقبلة، أي ما يعادل نمو سنوي معدله 0.9 %، ويمكن أن يصل إلى 9.3 مليار نسمة بحلول عام 2050م (UN 2012).

ورغم أن النمو السكاني يتجه نحو الانخفاض، فإن نمو الدخل يتجه نحو الارتفاع حيث من المتوقع أن يتضاعف الدخل الحقيقي في العالم بين عامي 2010م و2030م. وتشير دراسات أخرى إلى أن الناتج العالمي سوف يتضاعف إلى ثلاثة أمثاله بسبب تسارع النمو المتوقع في الاقتصادات الناشئة. على سبيل المثال، بحلول عام 2050م، سيتضاعف الناتج الاقتصادي في العالم الناشئ بمقدار خمسة أضعاف، وسيكون أكبر من نظيره في العالم المتقدم. ومن المتوقع أنه بحلول ذلك الوقت، ستصبح الصين والهند أكبر وثالث أكبر اقتصاد في العالم. ونتيجة لذلك، وكما سيتم مناقشته لاحقًا، من المرجح أن ينمو نصيب الفرد من استهلاك الطاقة في عام 2030م بمعدل كبير، ولكن كثافة الطاقة (أي الطاقة لكل وحدة من الناتج المحلي الإجمالي) ستستمر في التحسن عالميًا وتنمو بمعدل معدل متسارع. ومن المتوقع أن يأتي معظم النمو في الدخل والسكان من الاقتصادات الناشئة في البرازيل وروسيا وإندونيسيا والصين وجنوب أفريقيا (بريكس). يمكن رؤية العلاقة بين معدلات نمو الناتج المحلي الإجمالي العالمي والسكان واستهلاك النفط بوضوح من الشكل الآتي. ومع استثناءات قليلة، يبدو أن نمو الناتج المحلي الإجمالي هو المحرك الرئيسي لنمو استهلاك النفط.




**معدلات نمو الناتج المحلي الإجمالي العالمي واستهلاك النفط والسكان** (Taher & Hajjar, 2014)

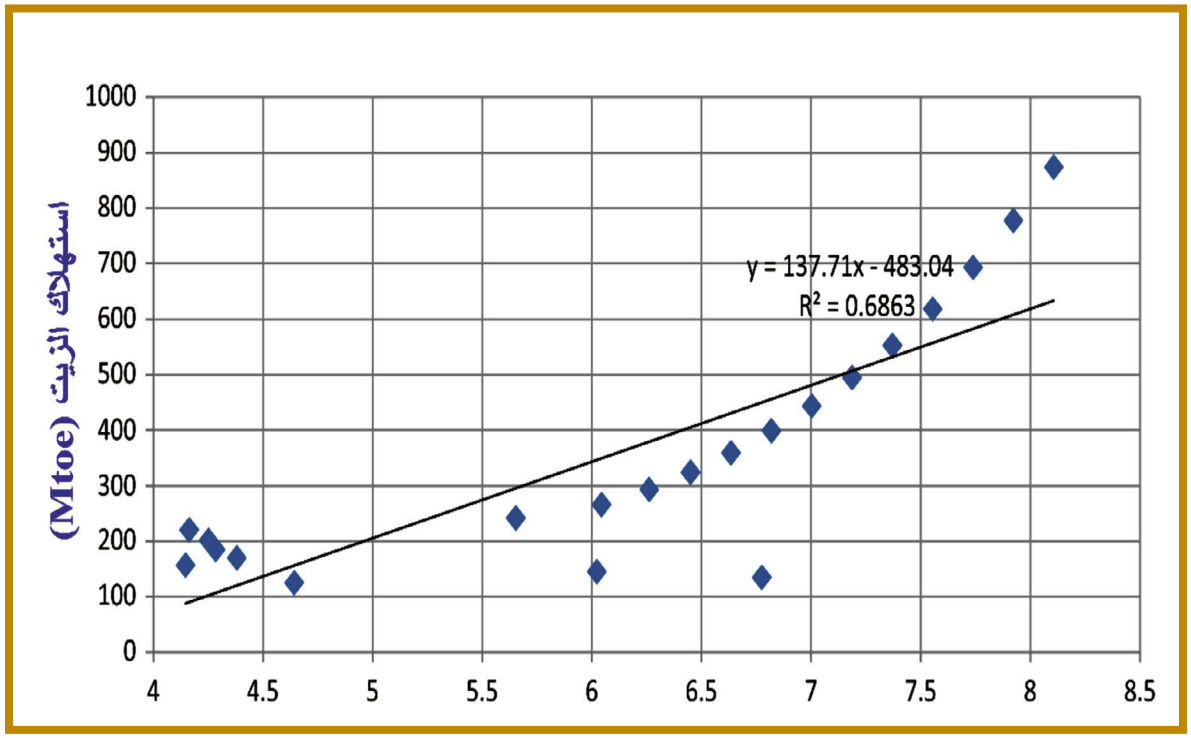
وباستثناء حدوث أزمة مالية عالمية خطيرة، من المتوقع أن تكون آفاق النمو الاقتصادي على المدى الطويل للاقتصاد العالمي أكثر إشراقا من النمو الملحوظ في العقدين السابقين، حيث من المتوقع أن يتوسع الاقتصاد العالمي بمعدل سنوي متوسط قدره 3.3 % خلال الفترة 2012–2030م مقارنة بنسبة 2.7 % المسجلة في العشرين سنة الماضية (كما هو موضح في الشكل الآتي).




**معدلات نمو الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي.** (Taher & Hajjar, 2014)

ستكون الصين والهند المحركين الرئيسيين للنمو العالمي على مدى العقدين أو العقود الثلاثة المقبلة، ومع طلبهما الذي لا يشبع على الطاقة لتحقيق أهدافهما التصنيعية الطموحة، سيشهد كلا البلدين زيادات هائلة في دخلهما الوطني، الأمر الذي سيضعهما في مأزق غير مفهوم. سيكون النمو الاقتصادي في المملكة على مدى العقدين المقبلين أعلى بكثير من المتوسط العالمي البالغ 3.26 %، وسيعادل تقريبًا ضعف سجل النمو التاريخي الخاص بها على مدار العشرين عامًا الماضية. وسيكون لذلك نمو كبير في الطلب على الطاقة في المملكة، حيث يمثل الاستهلاك المحلي للنفط حاليًا ما يقرب من 25 % من إجمالي إنتاج النفط الذي يزيد عن 11 مليون برميل يوميًا.

وتظهر دراسة حديثة أجراها سيتي بنك (2012م) أن النفط ومشتقاته يمثلان ما يقرب من 50 % من إنتاج الكهرباء في المملكة، مع استخدام أكثر من نصفه للأغراض السكنية، وأن ذروة الطلب على الطاقة تنمو بنحو 8 % سنويًا. وبالتالي، ونظراً للارتفاع السريع في الدخل، إلى جانب حقيقة أن المملكة لديها واحد من أسرع معدلات النمو السكاني في العالم وأن نصيب الفرد من استهلاك الطاقة يتجاوز نظيره في أكثر الدول تقدماً، فمن المرجح أن المملكة قد يكون لديها القليل من النفط للتصدير بحلول عام 2030م إذا لم يتم اتخاذ إجراءات خلال هذه الفترة، حيث سيذهب أكبر جزء منها لتلبية الاستهلاك المحلي. يوضح الشكل الآتي بوضوح العلاقة الوثيقة بين التغيرات في الدخل والتغيرات في استهلاك النفط المحلي في المملكة.



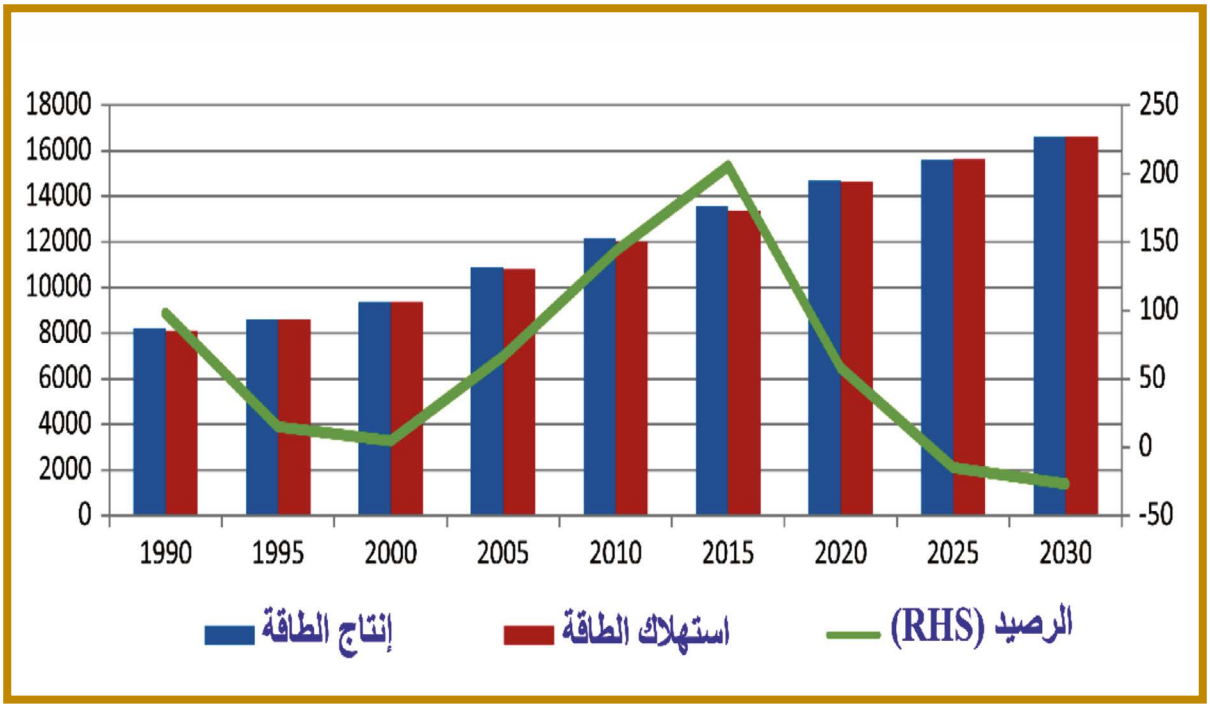

معدل نمو الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي مقابل الاستهلاك المحلي للنفط في المملكة.

وهذا يستدعي سياسة أكثر استباقية تتخذ نهجا متوازنا تجاه مزيج الطاقة، بما في ذلك الوقود الأحفوري والطاقة النظيفة بالإضافة إلى مبادرات كفاءة الطاقة. ولن تعوض مثل هذه السياسة الطلب المحلي المتزايد على النفط فحسب، بل ستؤدي أيضًا إلى إطالة عمر الوقود الأحفوري الموجود، وفي الوقت نفسه ستمكن المملكة من الحصول على ميزة نسبية في تقنيات الطاقة النظيفة.

## • توقعات الطلب العالمي على الطاقة

يعتمد الطلب العالمي على الطاقة بشكل كبير على الديناميات السكانية والتغيرات في الدخل. وهذه العوامل، إلى جانب طبيعة الوقود الأحفوري القابلة للنفاد الأحفوري، ستدق إسفينا بين إنتاج الطاقة واستهلاكها. من المتوقع أن ينمو الاستهلاك العالمي للطاقة الأولية بنسبة 1.6 % سنوياً خلال الفترة 2010-2030م، مما يضيف 39 % إلى الاستهلاك العالمي بحلول عام 2030م. ومع ذلك، فقد تباطأ معدل نمو استهلاك الطاقة على مدى العقدين الماضيين وسيستمر في التزايد. الانخفاض في المستقبل.

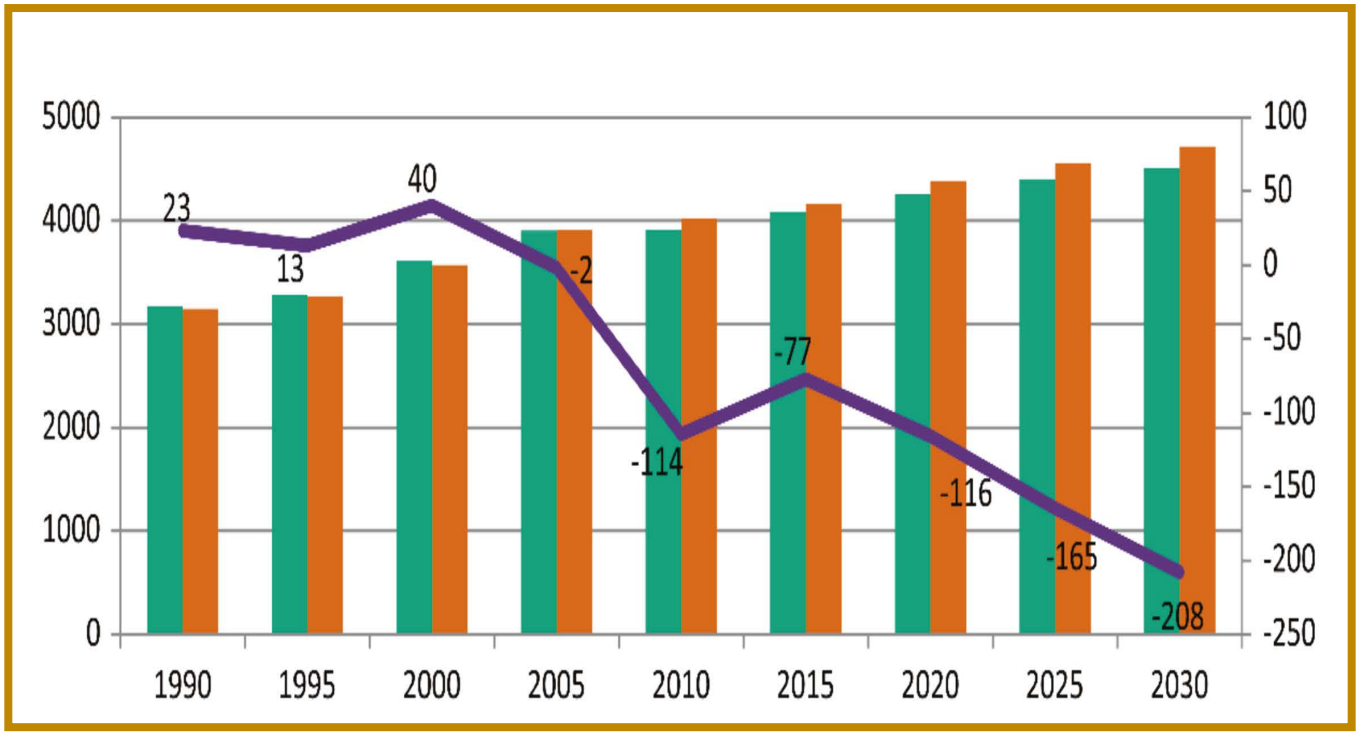
على سبيل المثال، خلال العقد الماضي، زاد الاستهلاك العالمي للطاقة بنسبة 2.5 % سنويًا. ومع ذلك، فمن المتوقع أن ينمو بنسبة 2 % سنويًا خلال العقد المقبل وبنسبة 1.3 % سنويًا بين عامي 2020 و2030م. ونتيجة لذلك، بدءًا من عام 2025م، سيتخلف إجمالي إنتاج الطاقة العالمي عن استهلاك الطاقة العالمي بحوالي 15 مليون طن مكافئ من الطاقة، وسوف يتضاعف هذا الرقم تقريبًا بحلول عام 2030م (كما هو موضح في الشكل الآتي).




إنتاج واستهلاك الطاقة العالمي

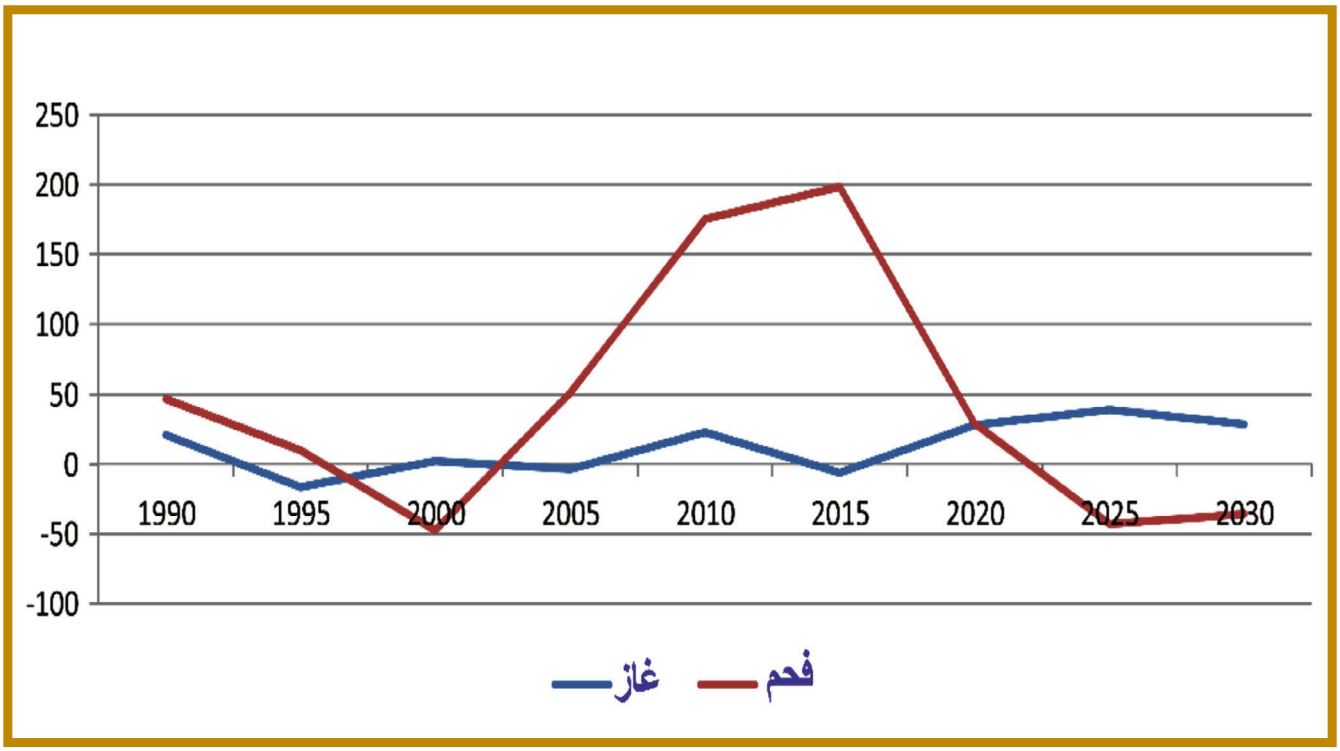
إن عدم التوافق بين إنتاج الطاقة واستهلاكها يعود إلى حد كبير إلى النفط، الذي تجاوز بالفعل ذروته، ولكن الجغرافيا السياسية المستمرة سوف تخلف تأثيراً مدمراً على العرض.

وكما يوضح الشكل الآتي، تجاوز الطلب العالمي على النفط الإنتاج لفترة طويلة، لكن من الطلب الزائد تضخم على مر السنين ومن المتوقع أن يصل إلى 208 مليون طن مكافئ من النفط بحلول عام 2030م.



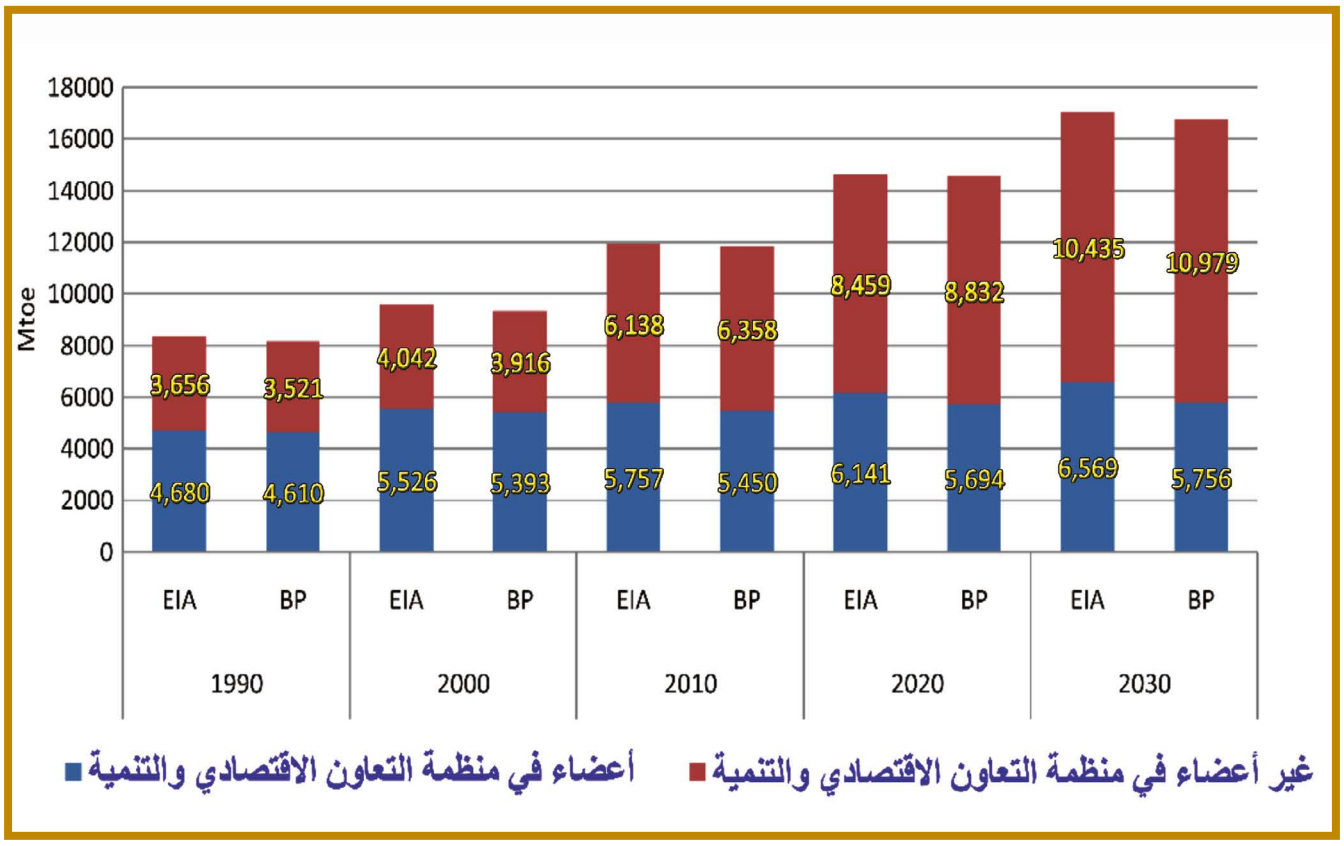

إنتاج واستهلاك النفط العالمي

وبالمثل، سيواجه الفحم أيضًا نقصًا حادًا على الرغم من حقيقة أنه سيكون هناك أيضًا تحول تدريجي عنه لصالح الغاز والوقود غير الأحفوري كما يوحي الشكل الآتي.




الطلب الزائد على الغاز والفحم (مليون طن مكافئ) (Taher & Hajjar, 2014)

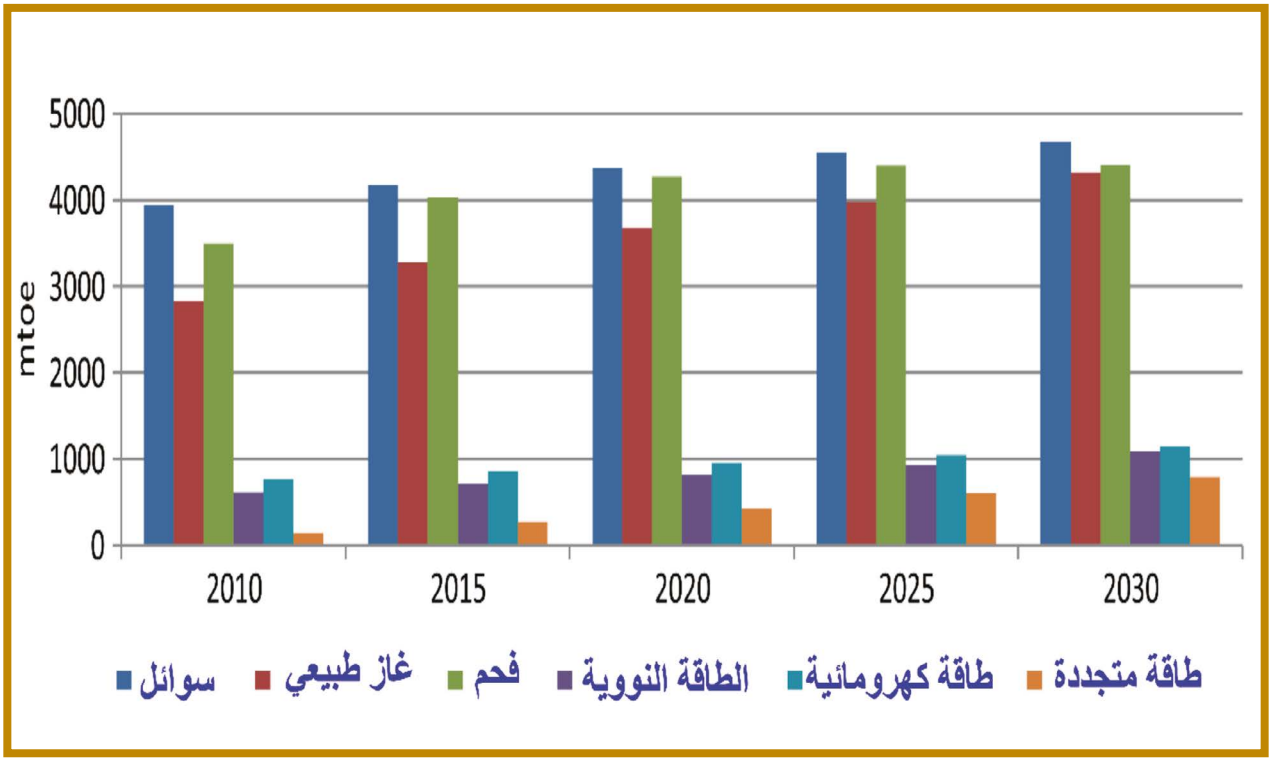
في جوهر الأمر، ستكون الاقتصادات الناشئة والنامية (البلدان غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية) هي المحرك الرئيسي لنمو استهلاك الطاقة حيث يتحول مزيج الوقود تدريجيًا بعيدًا عن النفط والفحم لصالح الغاز والوقود غير الأحفوري (كما هو موضح في الشكل الآتي).




إجمالي استهلاك الطاقة العالمي حسب المنطقة

ومن حيث المستويات المطلقة للاستهلاك، ستمثل الاقتصادات الناشئة خارج منطقة منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) 65 % من الاستهلاك العالمي للطاقة بحلول عام 2030م، مقارنة بنسبة 54 % في عام 2010م (EIA, 2012; BP, 2012). في المقابل، من المتوقع أن يكون استهلاك الطاقة في دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (الدول المتقدمة) في عام 2030م أعلى بنسبة 4 % فقط مما كان عليه في عام 2010م، مع متوسط نمو يبلغ 0.2 % سنويًا في عام 2030م. ومع ذلك، من المتوقع أن يستمر استهلاك الطاقة للفرد في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية. اتجاهه

التنازلي بنسبة 0.2 % سنويًا خلال الفترة 2010–2030م. ومن الجدير بالذكر أنه على الرغم من التحولات التدريجية في مزيج الطاقة خلال العقود المقبلة، إلا أن الوقود الأحفوري سيظل أكثر الأنواع هيمنة من أنواع الطاقة. وعلى وجه الخصوص، سيشكل النفط والفحم أكبر جزء من استهلاك الطاقة على الرغم من أن الطلب على الوقود غير التقليدي سيستمر في الزيادة (كما هو موضح في الشكل الآتي).

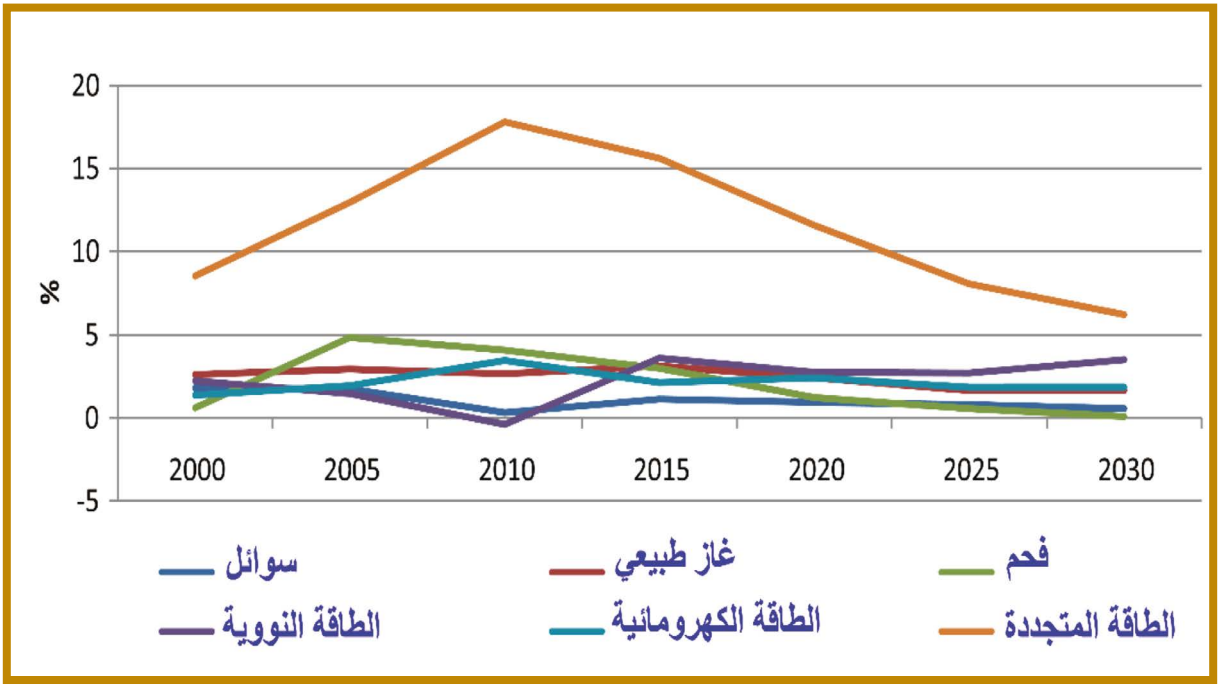



استهلاك الطاقة العالمي حسب نوع الوقود

وفي مجال الوقود الأحفوري، فإن أكبر مساهمة منفردة للوقود في النمو المتوقع في الطاقة العالمية ستأتي من الغاز، والذي من المتوقع أن يمثل 31 % من النمو المتوقع في الطاقة العالمية. وبشكل عام، من المتوقع أن ينمو الغاز بنسبة

2.1 % سنويًا من عام 2010م إلى 2030م، في حين سينمو النفط بأبطأ وتيرة بنسبة 0.7 % سنويًا.

ومع ذلك، فإن الوقود غير الأحفوري سيشهد أسرع نمو بسبب الجهود الحثيثة التي تبذلها البلدان المتقدمة لاستبدال النفط بمصادر بديلة للطاقة. على وجه الخصوص، ستكون الطاقة المتجددة هي الوقود الأسرع نموًا، والذي من المتوقع أن يرتفع بمعدل نمو سنوي متوسط قدره 8.2 % خلال الفترة 2010-2030م (كما هو موضح في الشكل الآتي).




متوسط معدلات النمو السنوي لاستهلاك الطاقة حسب النوع

ومن المتوقع أن يمثل الوقود غير الأحفوري ككل (الطاقة المتجددة والنووية والمائية) 34 % من النمو العالمي في استهلاك الطاقة، ولأول مرة، يصبح إجمالي مساهمة الوقود غير الأحفوري أكبر من مساهمة أي وقود أحفوري وحيد. وهذا

ليس مفاجئا لأن استبدال الوقود هو الهدف الأسمى في الدول المتقدمة التي تستكشف تدريجيا مصادر بديلة للطاقة لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري من الدول المنتجة للنفط، وخاصة من الشرق الأوسط. وعلى وجه الخصوص، سوف تحل الطاقة المتجددة محل النفط في وسائل النقل والفحم في توليد الطاقة في بلدان منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، في حين من المرجح أن يحقق الغاز مكاسب على حساب الفحم في توليد الطاقة. وهذه التحولات مدفوعة بمزيج من أسعار الوقود المرتفعة نسبيا، والابتكار التكنولوجي، والتدخلات السياسية. وفي المقابل، ستستمر البلدان الناشئة والنامية في رؤية التوسع في جميع أنواع الوقود. وستستمر برامج التنمية الاقتصادية في هذه البلدان في خلق شهية للطاقة لا يمكن تلبيتها إلا من خلال التوسع في جميع أنواع الوقود. وفي الواقع، بالنسبة للعديد من البلدان النامية، فإن تأمين الطاقة بأسعار معقولة، بغض النظر عن مصدرها، لدعم التنمية الاقتصادية هو الهدف الحتمي.

## • التقييـــم القطاعـــي

يهيمن توليد الطاقة والنقل والصناعة على نمو استهلاك الطاقة حسب القطاع، وستظل هذه القطاعات تهيمن عليها خلال العقود القادمة. ولا تزال الطاقة المستخدمة لتوليد الكهرباء هي أسرع القطاعات نموا، حيث تمثل 57 % من النمو المتوقع في استهلاك الطاقة الأولية في عام 2030م مقارنة بنسبة 54 % في الفترة 1990–2010م. والواقع أن قطاع الطاقة يشكل أيضاً المحرك الرئيسي لتنويع مزيج الوقود، حيث يمثل الوقود غير الأحفوري، بقيادة الطاقة المتجددة، أكثر من نصف النمو. ومن المتوقع أن ينمو الطلب العالمي على الكهرباء بسرعة أكبر، بنحو 2.6 % سنويا، مقارنة بإجمالي الطاقة على مدى السنوات العشرين المقبلة، وبالتالي فإن مكاسب الكفاءة في توليد الطاقة تعني أنه من المرجح أن تنمو مدخلات الوقود بسرعة أقل من إنتاج الطاقة، بمتوسط 2.1 %

سنويًا خلال الفترة 2010–2030م. وهذا يعني أنه حتى في ظل افتراض النمو الصفري في الطلب على النفط عالميًا، لا يزال يتعين على المملكة العمل بجد لتطوير موارد الطاقة البديلة داخليًا لتقليل استهلاك النفط للاستخدام المحلي في الكهرباء والمياه والنقل.

من المرجح أن يظل الفحم هو أكبر مساهم في نمو وقود الطاقة، حيث يمثل 39 %، لكن الوقود غير الأحفوري يلحق بالركب بسرعة. ومن المتوقع أن تساهم مصادر الطاقة غير الأحفورية، مثل الطاقة النووية والمائية وغيرها من مصادر الطاقة المتجددة، بقدر مساهمة الفحم. وتشير التقديرات إلى أنه بحلول عام 2030م، ستوفر مصادر الطاقة المتجددة 11 % من احتياجات العالم من الكهرباء. ويتصدر الاتحاد الأوروبي الطريق، حيث تأتي 26 % من الطاقة من مصادر الطاقة المتجددة بحلول عام 2030م، تليها بقية دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بفارق زمني، ومن ثم تعمل الدول النامية على زيادة حصة مصادر الطاقة المتجددة في استهلاك الطاقة. وبالتالي فإن الدور المتنامي للوقود غير الأحفوري يصبح أكثر وضوحا في العقد التالي حتى عام 2030م، حيث يأتي 75 % من النمو من هذه المصادر والقليل جدا من الفحم وبالتالي، فإن معدل اختراق مصادر الطاقة المتجددة لأسواق الطاقة العالمية يحمل تشابها ملحوظا مع ظهور الطاقة النووية في السبعينات والثمانينات من القرن الماضي. تقود الصناعة نمو الاستهلاك النهائي للطاقة، لا سيما في الاقتصادات سريعة النمو، حيث تمثل 60 % من النمو المتوقع للطلب العالمي النهائي على الطاقة في عام 2030م. ومن المتوقع أن تمثل الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية حوالي 6.5 مليون برميل يوميا من نمو الطلب على النفط في الصناعة، وخاصة في مجال البتروكيماويات.

ومن المتوقع أن يُظهر قطاع النقل أبطأ نمو في الطلب على الطاقة، مع انخفاض الطلب من كتلة منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بسبب تدابير تنويع الطاقة. وتعتمد هذه التدابير إلى حد كبير على السياسات التي يسهلها التقدم التكنولوجي والابتكار وتطورات كفاءة استخدام الطاقة. وفي جوهر الأمر، من المتوقع أن يمثل الوقود الحيوي 23 % من نمو الطلب على طاقة النقل، في حين سيمثل الغاز والكهرباء بين 2 – 13 % على التوالي من نمو الطلب على طاقة النقل. ومع ذلك، فإن دعاة حماية البيئة يشككون في الوقود الحيوي بسبب اعتماده على حرق الغذاء للحصول على الطاقة، والأهم من ذلك أن ندرة الغذاء تشكل مصدر قلق كبير للعالم كله. ولذلك، من المتوقع أن يأتي معظم النمو في الطلب على الوقود السائل (خاصة النفط) في قطاع النقل على مدى العقدين المقبلين من البلدان غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية والتي من المتوقع أن تمثل 14 مليون برميل يوميا. وفي حالة بلدان منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، سوف يتركز الانخفاض في استهلاك النفط في البداية خارج قطاع النقل حيث يمكن للغاز والطاقة المتجددة أن تحل بسهولة محل النفط.

ولكن بعد عام 2015م، من المرجح أن يلعب تحسين كفاءة المحرك دوراً رئيسياً في انخفاض الطلب على النفط في قطاع النقل في بلدان منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية. تواجه مصادر الطاقة المتجددة تحديًا أكثر صعوبة في اختراق سوق وقود النقل، حيث أن 7 % فقط من وقود النقل العالمي سيأتي من مصادر متجددة بحلول عام 2030م (BP, 2012).

## • خيارات لتعزيز أعمال التقنية النظيفة

من التحليل السابق، يبدو أن الاقتصاد العالمي سيخضع لتغيرات كبيرة خلال العقود القادمة والتي ستؤثر بلا شك على التفاعلات بين البيئة والديموغرافيا وثروات الأمم ومزيج الطاقة. المملكة ليست استثناءً، لذا فإن قدرة المملكة على الحفاظ على النمو الاقتصادي والازدهار على المدى الطويل ستعتمد بشكل حاسم على رغبتها وقدرتها على صياغة وتنفيذ سياسات مزيج الطاقة المناسبة، بما في ذلك تقنيات الطاقة النظيفة التي ستمكنها من الاستفادة الكاملة الفرص وتقليل المخاطر المرتبطة بالتحولات العالمية. وبالتالي، للمضي قدمًا، يجب اتخاذ الإجراءات من قبل كل من الحكومة والقطاع الخاص.

ويتعين على الحكومة أن تعمل على صياغة إطار سياسي قوي يتجاوز شعار «العمل كالمعتاد»؛ بل ينبغي لها أن تكون بعيدة المدى وشاملة للجميع وبعيدة النظر بطبيعتها، بما في ذلك تقديم حوافز كافية نحو التصدي لتحديات التصنيع والتحديات البيئية. ويجب على القطاع الخاص أيضًا أن يشارك في قضايا السياسة الوطنية من خلال تقديم الدعم لمبادرات السياسة الحكومية وزيادة الاستثمارات في تقنيات الطاقة النظيفة. وبعبارة أخرى، ينبغي تشجيع ومتابعة الشراكة القوية بين القطاعين العام والخاص في جميع جوانب قضايا الطاقة (السياسة والتمويل والمسؤولية الاجتماعية). ونعدد عددًا من نقاط العمل التي ينبغي للطرفين القيام بها، ونختتمها بدروس من التجارب المستفادة من جميع أنحاء العالم.

# سياسة المملكة في تعزيز الطاقة والبيئة

تواجه المملكة والعديد من الاقتصادات الناشئة والنامية عددًا من التحديات التي تعيق تعزيز الأعمال البيئية. وتشمل هذه التحديات الافتقار إلى أهداف وحوافز متماسكة للخطة الحكومية متوسطة وطويلة الأجل، والتي تتضافر لتقليل قابلية تمويل الاستثمارات البيئية؛ النهج المجزأة والقصيرة الأجل والإرشادية بشكل مفرط في مشتريات القطاع العام والتي تمنع إرسال إشارات طويلة المدى للمبتكرين حول متطلبات الشراء المستقبلية، وبالتالي حاجزا كحاجز أمام الاستثمار الخاص؛ عدم كفاية القدرات والمهارات في بعض قطاعات الأعمال البيئية لتطوير وإدارة سلاسل التوريد وأكثر التقنيات تعقيدا تعقيدا؛ والصعوبات التي يواجهها المبتكرون في الحصول على التمويل التجاري الكافي في مراحل العرض والسوق القريبة من التقنيات الجديدة؛ وعدم كفاية الحوافز لتبني الخدمات البيئية المبتكرة في قطاع الأعمال والاقتصاد الأوسع. وتمثل هذه المشكلات إلى حد كبير مشكلات فشل السوق، الأمر الذي يتطلب استجابات سياسية حاسمة حول المجالات العريضة التالية:

- صياغة خطة وطنية شاملة لمزيج الطاقة وتعميمها في خطط التنمية الوطنية طويلة المدى للمملكة لمواءمة أهداف وغايات الطاقة الشاملة مع أهداف التنمية الصناعية.
- استحداث آلية تمويل خاصة عبر «الصكوك الخضراء» لتسهيل احتضان الأفكار الريادية في مجال تقنيات الطاقة النظيفة.
- تطوير هيكل مناسب للحوافز (القانونية والتنظيمية والمالية والدعوية، وما إلى ذلك) لتسريع نمو أعمال الطاقة النظيفة.

- صياغة استراتيجية قوية للشراكات بين القطاعين العام والخاص في مجال الاستثمار في الطاقة النظيفة وتنميتها.
- ربط مراكز التميز البحثي (أو مراكز البحث والتطوير)، بالصناعات ورواد الأعمال.
- إنشاء مسؤول بيئي يتولى مهمة الإشراف على قضايا البيئة والطاقة واسعة النطاق، بما في ذلك رصد وتقييم وإنفاذ وإدارة الأهداف البيئية الرئيسية.

وسنناقش بعد ذلك طريقة عمل كل نقطة من نقاط العمل السياسية هذه.

## تعميم سياسات مزيج الطاقة في خطط التنمية

هناك حاجة إلى خطة وطنية شاملة للطاقة ينبغي تعميمها في خطط التنمية الوطنية طويلة المدى للمملكة. إن سياسة الطاقة الوطنية في الوقت الحالي مجزأة إلى حد ما بين مختلف السلطات. ونرى أن على وزارة الطاقة صياغة خطة وطنية للطاقة تسمى «الخطة الوطنية لمزيج الطاقة» تتناسب مع الاحتياجات المحلية والعالمية، مع الاستفادة من الخبرات العالمية المختلفة. ويجب أن تحدد هذه الخطة بوضوح الرؤية المستقبلية للمملكة في عالم الطاقة بكل مكوناتها وتفاصيلها، بما في ذلك الأهداف والسياسات والبرامج والجدول الزمني للتنفيذ. كما ينبغي أن تكون لديها آليات فعالة لضمان الالتزام بتقارير أداء دورية ذات مؤشرات أداء واضحة لتوضيح الإنجازات وتذليل العقبات. وينبغي أن تشمل أهداف هذه الخطة تقليل استهلاك النفط محليا وزيادة محتويات الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة الإجمالي. كما يتعين عليها خلق بيئة استثمارية قوية وجذابة في مجال الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة، مع كافة القوانين والقواعد

واللوائح ذات الصلة المطلوبة كافة. إن وجود خطة على المستوى الاستراتيجي الوطني سيمهد الطريق لحل الخلافات والازدواجية التي نراها الآن بين مختلف الأجهزة كافة.

على سبيل المثال، قامت هيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج (ECRA)، بالتعاون مع إحدى الشركات الاستشارية الدولية الكبرى، بوضع خطة لتطوير الطاقة المتجددة. وفي الوقت نفسه، وضعت مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة (KA CARE) أيضًا خطة استراتيجية للطاقة المتجددة للمملكة، في حين عملت وزارة الطاقة ومدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية (KACST) بشكل منفصل على تطوير مبادرات كفاءة الطاقة. ولذلك لا بد من وجود جهة واحدة رفيعة المستوى تضع الخطة الوطنية وتشرف عليها وتنظمها، خاصة إذا كانت هناك إعادة هيكلة جدية لوزارة الصناعة والثروة المعدنية.

وينبغي أن تصبح مثل هذه الوكالة الرسمية مرجعًا أو نقطة محورية للموافقة على أي خطط فرعية أخرى تأتي من الأطراف ذات الصلة لضمان تعميم هذه الجهود ومواءمتها مع الأولويات الوطنية على النحو المعبر عنه في خطة الطاقة الوطنية. وينبغي أن تكون الخطة نفسها طويلة المدى ولكنها ستخضع لمراجعات مستمرة على المدى القصير والمتوسط لتحقيق اقتصاد أخضر مستدام.

## ■ أدوات السياسة لتعزيز الأعمال البيئية

سيتطلب تعزيز الاستثمارات في تقنية الطاقة النظيفة في المملكة قدراً هائلاً من الحوافز والأدوات السياسية، والتي تم استخدام العديد منها من قبل بلدان مختلفة حول العالم. ويمكن تصنيف هذه الأدوات إلى الفئات العامة التالية:

- تمكين بيئة سياسية لتعزيز كفاءة استخدام الموارد ورفع مستوى كفاءة استخدام الموارد داخل الحكومة.
- تعزيز خدمات الطاقة المتجددة.
- تعزيز جهود البحث والتطوير وعرض التقنية.
- تعزيز الأطر المؤسسية وعمليات الشراء.
- تحسين القدرات والمهارات في مجال السلع والخدمات البيئية.
- زيادة نشر المعلومات وبناء القدرات.
- خلق «قابلية مصرفية» للسوق في مجال السلع والخدمات البيئية.
- تقديم دعم أكبر لتنفيذ الابتكار.

## تعزيز كفاءة الموارد

وفقًا لمجلس الطاقة العالمي (2011م)، من المسلم به على نطاق واسع أن كفاءة استخدام الطاقة هي آلية رئيسية لتحقيق التقدم نحو اقتصاد منخفض الكربون، حيث يمكن أن تساهم أيضًا في تحقيق العدالة الاجتماعية عن طريق خفض أسعار الطاقة وزيادة توافر الطاقة. ففي نهاية المطاف، يشكل تعزيز كفاءة استخدام الطاقة أكبر خيار وأرخصه وأسرعه لمعالجة مشاكل الطاقة الرئيسية. وقد حدد TERI (2009) عددًا من أدوات السياسة لتعزيز كفاءة استخدام الموارد، بما في ذلك الآليات التنظيمية والتمويلية وتنمية السوق. ويمكن للمملكة أن تتبنى بعض هذه السياسات لتعزيز كفاءة استخدام الموارد والطاقة. وتشمل هذه ما يأتي:

- تقديم الحوافز المالية.
- تعزيز مؤسسات دعم الصناعة.
- تعزيز المعايير ووضع العلامات.
- تعزيز سياسة المشتريات العامة للمنتجات ذات الكفاءة في استخدام الموارد.
- رفع مستوى كفاءة استخدام الموارد داخل الحكومة.

أحد العوائق الرئيسية أمام انطلاق الأعمال البيئية في المملكة يتعلق بارتفاع التكلفة الأولية لمنتجات وتقنيات الطاقة النظيفة. وتُظهِر الدروس المستفادة من مختلف أنحاء العالم، وخاصة الاتحاد الأوروبي، أن الحوافز المالية وغير المالية لعبت دوراً رئيسياً في تشجيع شركات التقنية النظيفة. وتشمل بعض هذه الحوافز تخفيضات ضريبية على الأجهزة والتقنيات الموفرة للطاقة؛ واستهلاك متزايد؛ وتعريفات التغذية (FITs)؛ إعانات رأس المال والتخفيضات الضريبية؛ اعتمادات الاستثمار؛ والاستثمار العام والضمانات؛ وقروض بأسعار فائدة منخفضة للاستثمارات في الطاقة النظيفة.

وتكثر الأمثلة على سياسة الحوافز الناجحة الخاصة بنظام FIT في أغلب الدول الأوروبية. وتهدف هذه المخططات إلى تشجيع استثمارات القطاع الخاص في توليد الطاقة المتجددة بهدف تطوير إمدادات الطاقة المستدامة لخفض تكاليف إمدادات الطاقة وتوفير أمن الطاقة عن طريق تقليل اعتمادها على الطاقة المستوردة.

على سبيل المثال، في ألمانيا، تمثل الصناديق الاستئمانية الثابتة إعانات إنتاج تُمنح لمنتجي الطاقة المتجددة لضمان أسعار إنتاج الكهرباء التي يتم تحديدها

عادة بعلاوة. وكانت هذه السياسة ناجحة لأنها ضمنت الوصول إلى الشبكة؛ وهي مخصصة لتعزيز التطوير المتساوي لمصادر الطاقة المتجددة من خلال تحديد تعريفات تفاضلية للمناطق التي تعتمد على موارد الرياح؛ وتعريفات متباينة لتعكس تكاليف مختلف تقنيات الطاقة المتجددة في مراحل تنموية معينة لدعم التطوير إلى النطاق التجاري (GIER, 2009).

على الرغم من نجاحها، إلا أن هناك تحديات رئيسية مرتبطة بسياسة الصناديق الاستئمانية، بما في ذلك ما يلي: إنها تتطلب نظام حكم منظمًا إلى جانب وجود مؤسسات داعمة؛ وتحديد التعريفات المناسبة لتجنب «الفقاعات» وتوليد الكهرباء غير الفعال بتكاليف عالية؛ ضمان قدرة النظام على دمج الطاقة المتجددة (على سبيل المثال توسيع الشبكة، وأنظمة تخزين الطاقة للمساعدة في دمج الطاقة المتجددة في الشبكة)؛ وضمان برامج إدارة جانب الطلب للمساعدة في تحقيق التوازن بين إنتاج الكهرباء من الطاقة المتجددة بشكل متقطع.

وبالإضافة إلى الحوافز المالية، هناك حاجة إلى تعزيز الإطار القانوني والتنظيمي، بما في ذلك المؤسسات والوكالات المسؤولة عن القضايا البيئية. ومن ثم، يجب بذل الجهود لتعزيز مؤسسات دعم الصناعة حتى تتمكن من القيام بدور حاسم في توفير الدعم التقني لتطوير وتنفيذ كفاءة استخدام الموارد والإنتاج الأنظف. وبالمثل، ينبغي تشجيع برامج وضع العلامات، مثل علامات Energy Star للمعدات وعلامة Eco Mark للمنتجات، والدعوة إليها حتى يلتزم المصنعون الذين يقومون بتطوير مثل هذه المنتجات بالقواعد. هناك حاجة إلى الدعوة لتثقيف المستهلك بشأن المنتجات والملصقات الصديقة للبيئة فيما يتعلق بالسلع والمعدات الاستهلاكية المعمرة مثل الثلاجات ومكيفات الهواء وسخانات المياه والمنتجات المصنوعة من مواد معاد تدويرها، على سبيل المثال، الورق المعاد تدويره.

في العالم الغربي، يتطلب القانون أن تعرض جميع الثلاجات والمجمدات والغسالات المنزلية الجديدة، وما إلى ذلك، علامة الطاقة. ولكن المعايير الناجحة وخطط وضع العلامات يجب أن تتضمن توفير الحوافز المناسبة لمصنعي الأجهزة الموفرة للطاقة، وتطوير المعايير المناسبة واتخاذ القرارات المستنيرة من قبل المستهلكين بالجملة. وبالتالي، يتعين على الحكومة تقديم حوافز لتشجيع الشركات المصنعة للمنتجات التي تتسم بكفاءة استخدام الطاقة و/أو وضع مثبطات لثنيهم عن إنتاج منتجات لا تتسم بالكفاءة في استخدام الطاقة.

في جوهرها، يمكن لسياسة المعايير ووضع العلامات أن تفتح سوقًا مربحة جدا للخدمات البيئية في المملكة العربية السعودية، بما في ذلك توفير الفرص للعلماء والمهندسين والفنيين ومحترفي التسويق المشاركين في دورة الحياة بأكملها بدءًا من البحث والتطوير والاختبار وحتى تصنيع وبيع المنتجات البيئية. المنتج أو المعدات الخضراء (TERI, 2009).

إن رفع مستوى كفاءة استخدام الموارد داخل الحكومة يجب أن يكون محور السياسة في المملكة لتحقيق الكفاءة المثلى للموارد داخل الاقتصاد. لذلك، هناك حاجة ليس فقط إلى تعاون أفضل بين الوكالات الرئيسية ولكن أيضًا إلى إنشاء «وكالة جديدة لتغيير قواعد اللعبة» (وكالة تنفيذ كفاءة الموارد لتوفير القيادة والاتصالات وإدارة البيانات والتوجيه الاستراتيجي والتخطيط وبناء القدرات).

الهدف من مثل هذه الوكالة أو الهيئة هو رفع مستوى الموارد والقضايا البيئية بشكل كافٍ داخل الحكومة وتحقيق «النفوذ» السياسي اللازم لضمان اتخاذ الإجراءات على الفور. يمكن استخلاص الفوائد المحتملة التالية من رفع مستوى كفاءة استخدام الموارد داخل الحكومة، كما تظهر الدروس المستفادة من تجربة المملكة المتحدة (UKCEED, 2007):

- زيادة مصداقية مبادرات الخطة في هذا المجال من خلال إظهار وجود صوت قوي داخل الحكومة ملتزم بتنفيذها على المدى الطويل.
- توفير منظور بديل لأولئك المكلفين بحماية البيئة.
- المساعدة في تطوير المزيد من الدعم «المشترك» للابتكار المتعلق بكفاءة استخدام الموارد.
- المساعدة في تطوير الشبكات الاجتماعية التقنية الداعمة اللازمة لدعم الابتكارات الجذرية التي تبدو ممكنة في قطاع كفاءة استخدام الموارد بشكل عام.
- تقديم مساهمة مهمة محتملة في تحقيق أهداف الحكومة المتعلقة بتغير المناخ من خلال تسليط الضوء على الروابط بين تقليل النفايات واستعادة الموارد من ناحية، وتخفيض إنبعاثات الغازات الدفيئة من ناحية أخرى. ومن الممكن أيضاً استخلاص عدد من الدروس السياسية بشأن كفاءة استخدام الطاقة من البلدان الناجحة في مختلف أنحاء العالم. في الصين على سبيل المثال، قدمت الحكومة سياسة أطلق عليها اسم «برنامج 1000 مؤسسة في الصين»، والتي تهدف إلى تحسين كفاءة استخدام الطاقة في أكثر 1000 مؤسسة صناعية شديدة الاستهلاك للطاقة في الصين، والتي تتجمع في تسع صناعات بهدف تقليل استهلاك الطاقة لكل عام. وحدة من الناتج المحلي الإجمالي بنسبة 20 % بين عامي 2005 و2010م (World Energy Council, 2011). وتشمل آليات تحقيق الهدف المنشود الاتفاقيات التي يتم التفاوض عليها بين الحكومة والشركات واسعة النطاق في الصناعات الرئيسية المستهلكة للطاقة والتي تتطلب من الشركات صياغة أهداف كفاءة الطاقة؛ وإنشاء نظام للإبلاغ عن استخدام الطاقة؛

وإجراء عمليات تدقيق الطاقة؛ وصياغة خطة للحفاظ على الطاقة؛ واعتماد حوافز للحفاظ على الطاقة؛ والاستثمار في تحسين كفاءة استخدام الطاقة، وتتبع قصة نجاح مثل هذه المبادرة السياسية من حقيقة أنها تستند إلى مبادئ توجيهية بسيطة وأولية تقدم سياسة الجزرة والعصا المالية لتشجيع الامتثال والتخلص التدريجي من المؤسسات غير الفاعلة. وبالتوازي مع ذلك، قدمت الحكومة مبادئ توجيهية هرمية لتعليم وتدريب القوى العاملة الصناعية لمساعدة الشركات (World Energy Council, 2011).

ويمكن استعارة الدروس السياسية المتعلقة بالمعايير ووضع العلامات من برامج وضع العلامات على الطاقة في البرازيل والولايات المتحدة. في البرازيل، أدخلت الحكومة برنامجاً لوضع العلامات على المعدات المنزلية ذات الكفاءة في استخدام الطاقة والمعدات المستهلكة للطاقة بهدف زيادة الإنتاج الوطني من المعدات والأجهزة المنزلية ذات الكفاءة في استخدام الطاقة؛ وتحويل سوق المنتجات الموفرة للطاقة من خلال التطور التقني؛ وإعلام المستهلكين بكيفية شراء المزيد من الأجهزة الموفرة للطاقة.

تتألف آلية تحقيق أهداف هذه السياسة من ضمان أن نظام وضع العلامات يستند إلى «مقياس من خمس نقاط مقابل الحد الأدنى من معايير أداء الطاقة التي وضعتها الحكومة (MEPS)»؛ مكافأة أفضل المنتجات أداءً؛ ويتم اختبار المنتجات من قبل منظمات اختبار مستقلة (World Energy Council, 2011). ويعمل البرنامج بشكل جيد لا بد أن يركز أولا على المنتجات التي ساهمت بشكل كبير في الاستهلاك المنزلي للكهرباء؛ وهذا يتطلب وضع العلامات الإلزامية على الأجهزة المنزلية الشائعة؛ وإنشاء سوق محلية للأجهزة منخفضة الطاقة.

وفي حالة الولايات المتحدة الأمريكية، قدمت الحكومة برنامج Energy Star الذي يهدف إلى الحد من تلوث الهواء وانبعاثات الغازات الدفيئة واستهلاك الطاقة من خلال تشجيع شراء المنتجات الموفرة للطاقة. ويهدف أيضًا إلى توفير معلومات موثوقة حول كفاءة الطاقة ومن ثم تحويل السوق للمنتجات الموفرة للطاقة بالإضافة إلى زيادة حصة السوق بشكل كبير من المنتجات الموفرة للطاقة بمرور الوقت. ولتحقيق أهداف السياسة هذه، تسمح الآلية بإرفاق ملصقات خاصة بالمنتجات التي تزيد من كفاءة استخدام الطاقة بنسبة 10–25 % عن الحد الأدنى من المعايير الفيدرالية (World Energy Council, 2011).

## ■ إيجاد القدرة المصرفية في السوق

إن إشارات الحكومة للتوقعات بشأن الأهداف المستقبلية والأنظمة التنظيمية وظروف السوق والاتجاهات التقنية يمكن أن يكون لها تأثير قوي على ابتكار الأعمال البيئية من خلال تحفيز الاستثمار في توقع المكافآت المستقبلية. تتمثل إحدى وسائل الإشارة المرغوبة في قيام الحكومة بإنشاء رؤية طويلة المدى في مجالات الابتكار البيئي الرئيسية، وتحديد مسارات الابتكار نحوها ووضع أهداف لرصد التقدم ودفعه. التدابير الإضافية التي من شأنها أن تزيد من مصداقية وفعالية السياسات والتدابير الحكومية، كما كان الحال في المملكة المتحدة، هي كما يأتي (UKCEED, 2007):

- الإعفاءات الضريبية للمواد المستردة بإعادة التدوير.
- نظام ضريبي أكثر ملاءمة لنهج «الخدمة».
- تعزيز التنسيق بين السياسات الحكومية والاستثمارات على المستوى الإقليمي

والمحلي من أجل تحقيق تحسين أفضل لنتائج الطاقة والموارد، على سبيل المثال. فيما يتعلق بالمبادرات الحالية بشأن «المنازل الخالية من الكربون» و«المدن البيئية المستدامة».

- منع التخلص من جميع المواد القابلة للاسترداد في مكب النفايات.

## تحسين سياسة المشتريات الحكومية للمنتجات البيئية

وفي المملكة ودول الشرق الأوسط الأخرى، يكون الابتكار البيئي مقيدًا بعوامل العرض والطلب. وعلى جانب الطلب، هناك نقص في الطلب الواضح والموثوق على السلع والخدمات البيئية، في حين يشكل الافتقار إلى البحث والتطوير مصدراً رئيسياً للقيود على جانب العرض. وستتطلب معالجة هذه القضايا من الحكومة اتخاذ الإجراءات المناسبة لتشجيع أنشطة البحث والتطوير وتعبئة سلسلة التوريد لتقديم الابتكارات البيئية.

في الواقع، في جميع أنحاء العالم، ساعدت أنشطة البحث والتطوير التي تمولها الحكومة في تطوير عدد من التقنيات الموفرة للطاقة والموفرة للموارد، بما في ذلك تقنيات الطاقة المتجددة مثل توربينات الرياح والأجهزة عالية الكفاءة. وهناك أيضا حاجة إلى تشجيع الإدارة الذكية لسلسلة التوريد. أحد الإجراءات الرئيسية من هذا النوع، والذي يمكن أن يساعد أيضًا في توفير المزيد من التمويل المصرفي، سيكون تقديم دعم أكبر لمشتريات الالتزام الآجل، على غرار ما يتم الحصول عليه في المملكة المتحدة (EIAG,2006). مع زعم الأخير أن: «يجب على الحكومة أن تقود القطاع العام في تحديد الالتزامات لشراء الحلول المبتكرة وإنشاء طرق واضحة لسوق القطاع العام لموردي الحلول المبتكرة». الالتزام المستقبلي للمشتريات هو القدرة على توفير رؤية أكبر للسوق للمبتكرين وحلول أفضل وأكثر استدامة للمشترين نظرًا لأنها تركز على النتائج

بدلاً من منتجات محددة، كما أن البائعين أكثر استعدادًا للاستثمار لتحقيق وفورات الحجم.

وفقًا لـ TERI (2009)، فإن المبادرات السياسية التي تشجع شراء التقنيات الخضراء (مثل المصابيح الفلورية المدمجة ووحدات الطاقة الشمسية الكهروضوئية) من قبل القطاع العام ستزيد الطلب على هذه المنتجات وتساعد على إنشاء قاعدة سوقية. وسيساعد ذلك أيضًا على خفض تكلفة تصنيع منتجات التقنية الخضراء، وبالتالي المساعدة في خفض أسعار هذه المنتجات إلى مستويات يمكن تحملها بالنسبة للمستخدمين النهائيين.

## ■ تعزيز الأطر المؤسساتية

إن الهيكل المؤسساتي الحالي للأعمال البيئية في المملكة ضعيف من حيث القوى العاملة والمعرفة الفنية والموارد وسلسلة التوريد. ولذلك، فمن الأهمية بمكان أن يتم تعزيز الأجهزة المؤسسية القائمة لتوفير وظائف الرقابة بفعالية وكفاءة لتنظيم ومراقبة وتسهيل تقديم الخدمات البيئية في المملكة. على سبيل المثال، قد يعتمد نجاح نماذج الشراكة بين القطاعين العام والخاص في جمع نفايات البلدية الصلبة وتخزينها والتخلص منها على مصداقية وقدرة المؤسسات المسؤولة بشكل مباشر على صياغة مثل هذه المبادرات. وبالمثل، فإن كفاءة تقديم خدمات كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة على المستوى المحلي لها أهمية قصوى وهذا يتطلب أطرًا مؤسسية قوية لضمان عدم اضطرار المستخدمين النهائيين إلى الاعتماد على الدعم الخارجي للصيانة المنتظمة وصيانة التقنيات. وسيؤثر الافتقار إلى نظم الإدارة والتنفيذ الفاغلة على استدامة ممارسات كفاءة استخدام الطاقة على المدى الطويل، ومن هنا تأتي الحاجة إلى تعزيز الهياكل المؤسسية المرتبطة بتكنولوجيات الطاقة النظيفة.

## تحسين القدرات والمهارات

يشكل نقص المهارات ورأس المال البشري عائقًا رئيسيًا أمام ابتكار الأعمال البيئية في المملكة. وتتعلق هذه المهارات بكل من المهارات التقنية (مثل البرمجيات أو التقنية البيئية) والمهارات المتعلقة بالأعمال التجارية اللازمة لتحويل القطاع الذي يعتمد إلى حد كبير على المقاولين إلى قطاع أكثر استباقية وذي قيمة مضافة أعلى. سيؤدي تحسين قدرات ومهارات المواطنين إلى تعزيز البنية التحتية للمملكة وقدرتها على القيام بالابتكار والبحث والتطوير في مجال التقنية الخضراء. وسيتطلب ذلك اتباع نهج متعدد الجوانب، بما في ذلك برامج التدريب الفني على التقنيات الموفرة للطاقة، وبناء وتعزيز قدرات الجامعات الهندسية والعلمية لتدريب ونقل المعرفة للطلاب في مجال تقنيات الطاقة والبيئة.

يجب على نظام الجامعات أن يزود الطلاب ليس فقط بالمعرفة والمهارات في مجال تقنيات الطاقة المتجددة والمجالات الأخرى ذات الصلة ولكن أيضًا بالفهم المتعمق للجوانب الاجتماعية والاقتصادية لسياسة الطاقة والبيئة. يجب أن تشمل الأدوات التربوية محاضرات ودروس تعليمية وورش عمل وزيارات ميدانية للمواقع الصناعية والبلدية ومدافن النفايات. وينبغي تشجيع التعاون الخارجي مع الجامعات في كل من البلدان المتقدمة والنامية لتسهيل تبادل المعرفة والدروس والخبرات المتعلقة باقتناء تقنيات الطاقة النظيفة وتقديمها. ويرتبط نشر المعلومات بتنمية القدرات والمهارات، نظرا للنقص الواضح في الوعي بتقنيات الطاقة النظيفة والمكاسب المحتملة الناشئة عن تحسين كفاءة الطاقة في المملكة. سيختلف نوع المعلومات التي يجب نشرها باختلاف مجموعات أصحاب المصلحة (الصناعات، عامة الناس، وما إلى ذلك). ومن المهم تطوير قواعد بيانات شاملة ومواقع إلكترونية وأدلة ودراسات حالة فيما يتعلق بمعدات وممارسات الاستخدام الفاعل للطاقة، حيث سيساعد ذلك الشركات الجديدة والمتوسعة على تقييم الخيارات المتاحة قبل اتخاذ قرار بشأن استخدام المعدات التقنية الجديدة.

في أوروبا، يعد مجلس قطاع مهارات الطاقة ومرافقها الجهاز الرائد لتنمية المهارات في معظم قطاعات الخدمات البيئية، والذي قام بعدد من المبادرات، بما في ذلك مقترحات لتغيير المتطلبات التنظيمية لتشغيل مرافق إدارة النفايات من أجل عكس الطبيعة المتغيرة للصناعة وتوفير مرونة تشغيلية أكبر. ونتيجة لذلك، أدى هذا إلى تغييرات في متطلبات التدريب بناءً على توصيات المعهد المعتمد لإدارة النفايات (CIWM) والمجلس الاستشاري للتدريب في صناعة إدارة النفايات (WAMITAB)، وكلاهما يوفر طرق اعتماد لتلبية معايير تنظيمية أكثر مرونة.

## ■ دعم أكبر لتنفيذ الابتكار

إن أكبر ما يحتاج إلى الدعم الحكومي لابتكار التقنية النظيفة تكون في مراحل العرض والسوق المبكرة. ونتيجة لذلك، ينبغي لجهود السياسات أن تركز على المساعدة في تطوير مناهج منخفضة التكلفة لتقييم الابتكار في المراحل المبكرة والتي يمكن أن توفر بعض المعلومات المؤكدة للمستثمرين والعملاء وأصحاب المصلحة الآخرين. وهناك أيضاً حاجة إلى المساعدة في إنشاء خطة لتوجيه الأعمال التجارية تستهدف على وجه التحديد قطاع السلع والخدمات البيئية. ويعد هذا الدعم أمراً حتمياً نظراً لأنه من الصعب على المبتكرين من المؤسسات الصغيرة تلك متوسطة الحجم العثور على رأس مال المخاطرة لعرض التقنيات والمهارات الجديدة والوصول إلى مراحل قريبة من السوق في العديد من البلدان النامية. معلومات أفضل عن الموارد والخدمات البيئية لقد اجتذبت قنوات أعمال الموارد البيئية (مثل الطاقة المتجددة وكفاءة استخدام الطاقة) مناقشات كبيرة في السنوات الأخيرة.

في المقابل، حظيت أعمال الخدمات البيئية، مثل الاستشارات البيئية، باهتمام منخفض نسبيًا في المناقشات حول السياسات والتقنيات البيئية بسبب نقص المعلومات حول حجمها وخصائصها. وبالتالي، لا بد من تكثيف الجهود لجمع

وتخزين البيانات حول هذه الخدمات البيئية لتوفير النوع المناسب من دعم السياسات للمستثمرين المحتملين. إن الحصول على معلومات أفضل عن الأداء الابتكاري للخدمات البيئية سيكون مفيدًا أيضًا للرصد وتحديد المشكلة.

## • قضايا التمويل

وبالإضافة إلى الحوافز المالية، ينبغي للحكومة أن تسعى إلى تسهيل الاستثمارات البيئية من خلال آليتي تمويل مبتكرتين: الصكوك الخضراء والشراكة بين القطاعين العام والخاص بشأن التقنيات الخضراء. وتشبه الصكوك الخضراء السندات الخضراء التي كان البنك الدولي رائدا فيها على مدى العقود الماضية لجمع الأموال لتمويل مجموعة واسعة من المشاريع الخضراء في البلدان النامية. ومنذ ذلك الحين، حذت مؤسسات التنمية المتعددة الأطراف الأخرى حذوها، مثل بنوك التنمية الآسيوية، وبنك التنمية الأفريقي، وبنك التنمية للبلدان الأمريكية. وفي أعقاب الأزمة المالية العالمية عام 2008م، بدأت حكومة الولايات المتحدة أيضًا في تبني فلسفة السندات الخضراء لدعم الاستثمارات في متعددة النظيفة كوسيلة لمعالجة البنية التحتية والتحديات البيئية بالإضافة إلى خلق فرص عمل للشباب العاطلين عن العمل. وبالطريقة نفسها يجب على حكومة المملكة العربية السعودية طرح صكوك خضراء خاصة لتكون بمثابة حاضنة لبرنامج التقنية الخضراء في المملكة. وسيتم بعد ذلك توزيع عائدات الصكوك الخضراء على شكل منح وقروض وحوافز واتفاقيات تعاون وجوائز للمؤسسات، وخاصة الشركات الصغيرة والمتوسطة العاملة في أنشطة الطاقة النظيفة. وسيكون لبرنامج الصكوك الخضراء، والذي يمكن استخدامه لمدة استحقاق مدتها 10 سنوات، القدرة على الحفاظ على مستوى عالٍ من

الاستثمار في المشاريع الخضراء بعد انتهاء برامج الصكوك الخضراء، حيث سيتم توليد الإيرادات اللازمة للحفاظ على المخطط وتنميته بمرور الوقت من عدد من المصادر الرئيسية، بما في ذلك سداد القروض والعائد على حصص الأرباح المحققة من المنتجات/العمليات التي تم تطويرها بدعم من المنح. ويعكف البنك الدولي حاليا على استكشاف إمكانيات طرح الصكوك الخضراء في عدد من البلدان النامية لتمويل مشاريع تنموية أو بيئية منخفضة الكربون. وينبغي للمملكة استكشاف سبل التعاون مع البنك الدولي والبنك الإسلامي للتنمية وصندوق النقد الدولي بشأن آلية التمويل المبتكرة هذه لتعزيز تطوير تقنيات الطاقة النظيفة في المملكة.

وتشكل الشراكات بين القطاعين العام والخاص أيضًا أداة مبتكرة أخرى لتمويل التقنيات الخضراء في المملكة. لقد قامت المملكة بتجربة الشراكة بين القطاعين العام والخاص على نطاق محدود في تطوير البنية التحتية، ولكن نجاح مثل هذه المخططات كان مختلطًا بسبب عدد من القضايا المؤسسية والتنظيمية بالإضافة إلى عدم كفاية هياكل الدعم. وينبغي للحكومة أن تعالج هذه القضايا، وأن تطبق هذا المبدأ لتمويل استثمارات التقنية الخضراء.

## • دور القطاع الخاص

تعتبر أنشطة ريادة الأعمال في كل مكان من صلاحيات القطاع الخاص إلى حد كبير، ولكن يمكن للحكومة أن تلعب دوراً رئيسياً من خلال توفير بيئة مواتية للقطاع الخاص للعمل دون عوائق لا مبرر لها. وبالتالي، في حين ينبغي على الحكومة أن تسعى إلى توفير الدعم الكافي لتعزيز أنشطة الأعمال في مجال تقنيات الطاقة النظيفة في المملكة، وينبغي للقطاع الخاص أيضاً أن يقوم بدور

أكثر استباقية في الاستثمارات الخضراء من خلال مجموعة واسعة من آليات التمويل، بما في ذلك إنشاء رأس المال الاستثماري الأخضر، والأسهم الخاصة، والصناديق البيئية، وبنوك التنمية الخضراء. إن آليات تمويل القطاع الخاص للتكنولوجيات النظيفة منتشرة بالفعل على نطاق واسع وشعبية في البلدان المتقدمة وبعض الاقتصادات الناشئة بسبب التغييرات التنظيمية والحوافز السياسية المقدمة لأنشطة الطاقة الخضراء، مما يعزز القابلية المصرفية لهذه الاستثمارات. وقد تم تسليط الضوء في هذا الكتاب على مجموعة واسعة من مبادرات القطاع الخاص بشأن التقنيات الخضراء في جميع أنحاء العالم؛ ويجب بذل الجهود لتشجيع القطاع الخاص في المملكة على تحمل التحدي نحو تبني آليات التمويل المبتكرة هذه لمنح المملكة العربية السعودية ميزة المحرك الأول في تقنيات الطاقة النظيفة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا (Taher & Hajjar, 2014). ومن الإجراءات الأخرى التي تحتاج المملكة إلى معالجتها هي زيادة المستوى العام للشفافية المؤسسية من أجل تخفيف مخاوف المستثمرين المحليين والأجانب فيما يتعلق بالمخاطر الاقتصادية المحتملة. لقد تم تحقيق بعض الخطوات المهمة في سوق رأس المال السعودي لجعله أحد الأسواق الأفضل تنظيمًا في المنطقة والذي سمح الآن للمستثمرين الأجانب بالمشاركة مع ضمان عدم المساس بالرقابة التنظيمية.

المملكة لم تقف ساكنة، ففي عام 2010م، سمحت هيئة السوق المالية بأول صناديق الاستثمار المتداولة والتي ستسمح للمستثمرين الأجانب غير المقيمين بالتداول فيها. وهذا من شأنه أن يفتح سوق رأس المال السعودي بشكل أكبر أمام المستثمرين الأجانب دون تعريضه لتدفقات «الأموال الساخنة» المضاربة. ومع ذلك، للمضي قدمًا، لا تزال هناك حاجة لزيادة عمق واستقرار وتطور الأسواق المالية المحلية من خلال تعزيز درجة أعلى من الشفافية، ومشاركة

أكبر من قبل المؤسسات، بدلاً من الأفراد، والمستثمرين، وأسواق السندات الأعمق. سيؤدي إدخال قانون الرهن العقاري السعودي إلى إضافة عمق إلى سوق رأس المال السعودي مع إمكانية إنشاء شركة حكومية من نوع «فاني ماي Fannie Mae» لشراء الرهون العقارية من المؤسسات المالية وضخ السيولة في سوق العقارات. سيؤدي ذلك إلى تعميق القطاع وتوفير قناة أكثر أمانًا للاستثمار، حيث تصبح الشركة الحكومية المقترحة في الواقع المشتري الرئيسي لقروض المنازل المؤهلة من جهات الإصدار المؤسسية ولديها تفويض بتوريق هذه القروض إلى أوراق مالية مدعومة بالرهن العقاري وبيعها للمستثمرين من خلال الصكوك أو السندات الإسلامية وإنشاء سوق ثانوية سائلة. وتشير الدراسات في قطاع العقارات إلى وجود سوق كبيرة غير مستغلة، وخاصة للإسكان ميسور التكلفة لذوي الدخل المتوسط إلى المنخفض، والذي، إذا تمت إضافته إلى المشاريع الضخمة الجارية، سيضيف إلى سوق العقارات المقدر بنحو 730 مليار دولار على مدى عقد من الزمن.

## • التحديات الاقتصادية المستقبلية

تقدم المملكة العديد من البرنامج المهمة وستشهد السنوات القليلة المقبلة برنامج خصخصة أكثر نشاطاً في بعض القطاعات الرئيسية مثل المياه والطيران وكذلك الخدمات المصرفية والمشتريات الحكومية. لقد أدت الخصخصة الناجحة لشركة التعدين السعودية «معادن» إلى فتح قطاع التعدين أمام شراكة القطاع الخاص السعودي والأجنبي، وستؤكد المملكة أيضًا على المزيد من الشراكة بين القطاعين العام والخاص في السنوات المقبلة، خاصة في مشاريع بناء المدن الكبرى. وستعمل هذه المدن الكبرى الجديدة على تقليل الضغط على المراكز الحضرية الكبيرة وإنشاء مراكز اقتصادية إقليمية وتجمعات جديدة حول الصناعات الرئيسية لتوفير التنوع الاقتصادي الإقليمي. وفي القطاع المالي،

حصلت المملكة على ائتمان دولي بفضل الطريقة التي تمكنت بها من توجيه القطاع المالي السعودي دون أن يتأثر بتداعيات الأزمة المالية العالمية. سيصبح قطاع الشركات العائلية السعودية محورًا للرقابة الحكومية، مع الحاجة إلى مزيد من الشفافية وحوكمة الشركات كشرط للبقاء في القطاع الخاص، في أعقاب نداء التنبيه الذي أطلقه هذا القطاع الاقتصادي المهم بعد الكوارث المالية خلال عام 2009م.

وستلعب المملكة دورًا أكثر أهمية في المنظمات الدولية مثل مجموعة العشرين، فضلاً عن المؤسسات متعددة الأطراف مثل صندوق النقد الدولي والبنك الدولي. وسوف تستمر المملكة في انتهاج سياسات الاستثمار الفائضة المحافظة، دون التنويع أكثر مما ينبغي من الأوراق المالية الأمريكية التقليدية، وسوف يركز صندوق الثروة السيادية الصغير (سنابل) الذي أنشأته على الاستثمارات الدولية ذات القيمة المضافة التي يمكن أن تجتذب نقل التكنولوجيا وخلق فرص العمل. إن خلق فرص العمل سيظل أحد الأهداف الرئيسية لسياسة المملكة في المستقبل المنظور. ويجب إيلاء المزيد من الاهتمام للمؤسسات ذات الحجم الصغير والمتوسط، لأنها أكثر جاذبية من حيث خلق فرص العمل مقارنة حجما. وسيساعد ذلك على تنويع الاقتصاد، وتقليل الاعتماد على تقلبات أسعار النفط، وإنشاء جيل جديد من رواد الأعمال في القطاع الخاص لدفع الاقتصاد إلى الأمام. وقد تم اتخاذ خطوة بزيادة المخصصات لقروض الشركات الصغيرة والمتوسطة من خلال بنك الائتمان السعودي والضمانات الحكومية من خلال البنوك التجارية السعودية. ومن المتوقع تقديم المزيد من الدعم لهذا القطاع في المستقبل، لا سيما في بناء «مجموعات صناعية» حول الصناعات الرئيسية مثل البتروكيماويات حيث تتمتع المملكة بميزة نسبية ويمكنها تكرار تجارب بلدان أخرى مثل اليابان التي نجحت في دمج الشركات الصغيرة والمتوسطة

مع الشركات الكبرى. وتحاول المملكة أن تفعل الشيء نفسه من خلال مجمع بتروكيماويات أرامكو السعودية وسوميتومو بترو رابغ في المملكة. سيظل الاستثمار الأجنبي محور التركيز الرئيسي للمملكة، لكن التركيز المستقبلي سينصب على شراكات الاستثمار الأجنبي المباشر النوعية وتراخيصها بدلاً من التركيز على التدفقات النقدية الكمية. وسيتم إيلاء المزيد من التركيز والأولوية للشركات التي تجلب التقنية والخبرة في مجالات مثل تقنية المعلومات والطاقة المتجددة (خاصة الطاقة الشمسية) والأمن الغذائي وتحلية المياه وإعادة تدويرها.

من خلال جهود الهيئة العامة للاستثمار في المملكة (SAGIA)، تم تقليل عبء ممارسة الأعمال التجارية في المملكة، والهيئة واثقة من أن الإصلاحات الإدارية والبيروقراطية الحكومية العامة والخاصة ستضمن جلوس المملكة على طاولة عالية من الاستثمار. مع الدول «العشر الأولى» من حيث القدرة التنافسية العالمية وسهولة ممارسة الأعمال التجارية.

بينما يبجاهل معظم المعلقين هذه الطموحات كونها مجرد أمنيات، إلا أنه بحلول عام 2010م تفوقت المملكة على غيرها من دول الشرق الأوسط وأكثر ودول مجلس التعاون الخليجي روعة في تصنيفها العالمي. والمفتاح هو الحفاظ على عملية الإصلاح في جميع أقسام البنية التحتية للحكومة السعودية. ونظراً للطبيعة غير المنتظمة للإيرادات السعودية، التي تعتمد على تقلبات أسعار النفط، كانت هناك بعض المناقشات حول إنشاء «صندوق استقرار النفط» من قبل المملكة لاستخدامه عندما تنخفض أسعار النفط كاحتياطي للطوارئ. وقد يتحقق ذلك في السنوات القليلة المقبلة، لكن المشكلة تكمن في وضع مبادئ توجيهية شفافة بشأن آليات التخفيض التدريجي وعملية الرقابة. ومن الممكن أن تكون التجربة النرويجية في إدارة مثل هذه الاحتياطيات أحد هذه المبادئ التوجيهية.

## نحو اقتصاد دائري أكثر استدامة

إن الاعتماد على النفط قدم فرصاً وتحديات لاقتصاد المملكة. فمن ناحية، مكّنها من أن تصبح قوة عالمية في مجال الطاقة وبناء بنية تحتية واسعة النطاق وبرامج اجتماعية؛ ومن ناحية أخرى، فقد جعل الاقتصاد عرضة لتقلبات أسعار النفط العالمية، مما يعرضه للتقلبات الاقتصادية. إدراكًا للحاجة إلى تنويع اقتصادها وتقليل الاعتماد على النفط، بدأت المملكة إصلاحات اقتصادية واسعة النطاق في إطار خطة رؤية 2030م. وتهدف هذه الرؤية طويلة المدى إلى تحويل المملكة إلى اقتصاد أكثر توازناً واستدامة من خلال تطوير القطاعات غير النفطية، وجذب الاستثمار الأجنبي، وتشجيع ريادة الأعمال، وخلق فرص عمل لعدد السكان المتزايد. يعد التحول نحو الاقتصاد الدائري عنصرًا حاسمًا في هذه الأجندة الطموحة، حيث إنها لا تسعى فقط إلى تقليل الاعتماد على النفط ولكن أيضًا دفع الابتكار وكفاءة الموارد والتنمية المستدامة في قطاعات الاقتصاد الأخرى.

كما سبق ذكره في الفصل الرابع، بأن الاقتصاد الدائري عبارة عن نظام اقتصادي يتم فيه استخدام الموارد وإعادة استخدامها في حلقة مغلقة. وهذا يعني أنه بدلاً من إرسال النفايات إلى مكب النفايات، يتم استعادة المواد واستخدامها مرة أخرى. لدى المملكة خطط طموحة لتصبح رائدة في الاقتصاد الدائري العالمي، وقد أصدرت خارطة طريق للاقتصاد الدائري تحدد أهدافها للسنوات القادمة. الهدف من الاقتصاد الدائري هو القضاء على النفايات والتأكد من استخدام الموارد بكفاءة. ويتضمن أيضًا خططًا لدعم الشركات التي تقوم بالتحول إلى الاقتصاد الدائري. تعد خارطة طريق الاقتصاد الدائري خطوة مهمة إلى الأمام بالنسبة للمملكة. حددت المملكة عدة أهداف للاقتصاد الدائري، بما في ذلك معدل إعادة تدوير النفايات البلدية بنسبة 81 %، ومعدل

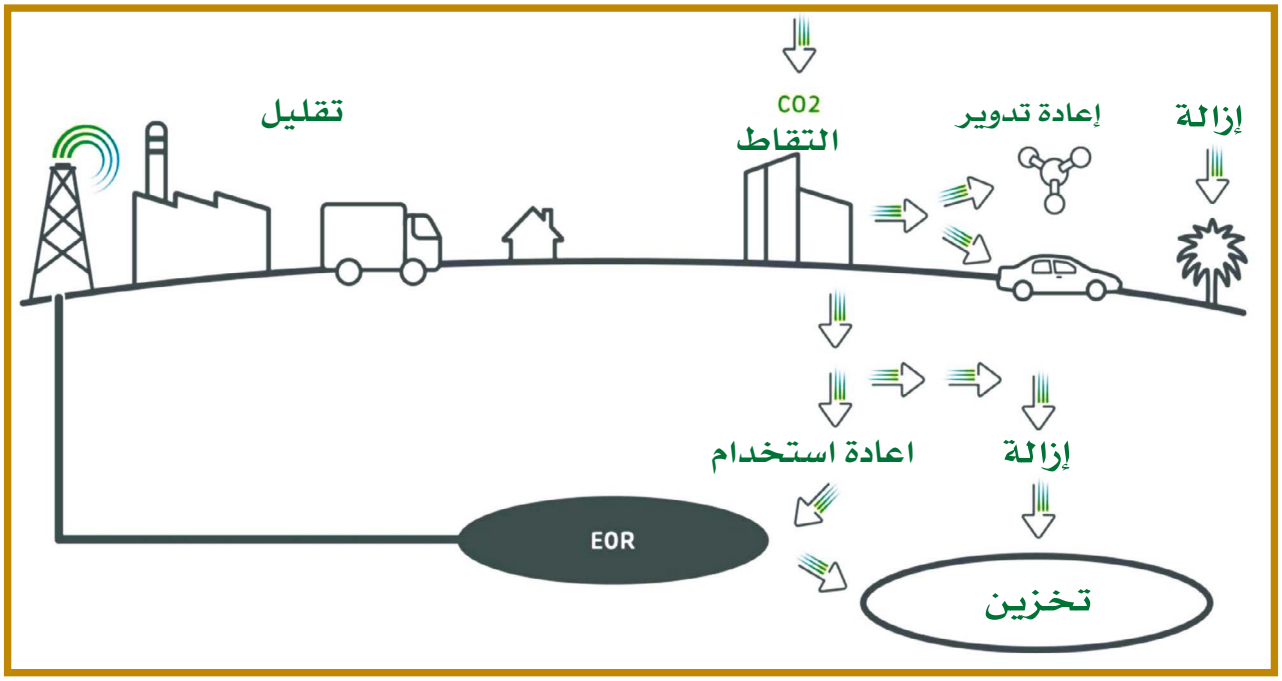
استرداد 60 % لنفايات البناء، ومعدل إعادة التدوير أو المعالجة بنسبة 85 % للنفايات الصناعية الخطرة. يعد إنشاء مراكز الاقتصاد الدائري ومراكز الابتكار بمثابة منصة للتعاون بين الجهات الحكومية والشركات ورواد الأعمال. تعمل هذه المراكز على تسهيل تبادل المعرفة واحتضان الأعمال والبحث والتطوير في الممارسات المستدامة والدائرية.

## • البرنامج الوطني لاقتصاد الكربون

هناك هدفان رئيسيان من أهم أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة يجب مراعاتهما: مدن ومجتمعات مستدامة، وطاقة نظيفة وبأسعار معقولة. يعد البرنامج الوطني للاقتصاد الدائري للكربون (CCENP) مبادرة مهمة أطلقتها المملكة لمعالجة تغير المناخ وتعزيز التنمية المستدامة. ويهدف البرنامج إلى تحقيق اقتصاد دائري للكربون من خلال دمج مبادئ الاقتصاد الدائري مع استراتيجيات الحد من الكربون، وبالتالي تقليل انبعاثات الكربون وتعزيز النمو الاقتصادي. يركز CCENP على ثلاث ركائز رئيسية: إزالة الكربون، والاقتصاد الدائري، وكفاءة الطاقة. ومن خلال هذه الركائز، يهدف البرنامج إلى الاستفادة من تقنيات احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS)، وتشجيع إعادة استخدام منتجات الكربون الثانوية، وتعزيز كفاءة استخدام الطاقة عبر القطاعات.

يؤكد CCENP على نهج الاقتصاد الدائري من خلال تشجيع إعادة استخدام وإعادة تدوير المنتجات الثانوية للكربون. ويستلزم ذلك إيجاد طرق مبتكرة للاستفادة من ثاني أكسيد الكربون المحتجز، مثل تحويله إلى موارد قيمة أو مواد أولية لمختلف الصناعات. ومن خلال اعتماد مبادئ الاقتصاد الدائري، يهدف البرنامج إلى تقليل توليد النفايات وزيادة كفاءة الموارد إلى أقصى حد، مما يساهم في استخدام أكثر استدامة وكفاءة للموارد القائمة على الكربون.

علاوة على ذلك، يركز برنامج CCENP على تعزيز كفاءة الطاقة عبر القطاعات لتقليل الاستهلاك الإجمالي للطاقة وانبعاثات الغازات الدفيئة. ويتضمن ذلك تعزيز التقنيات الموفرة للطاقة، وتحسين العمليات الصناعية، وتنفيذ أنظمة إدارة الطاقة لتحسين الإنتاجية مع تقليل التأثير البيئي.




رسم توضيحي للبرنامج الوطني لاقتصاد الكربون الدائري في المملكة، (المصدر: aramco.com)

تعمل مبادرات الاقتصاد الدائري للكربون على تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وتعزيز كفاءة استهلاك الوقود، والحفاظ على المياه، وإنشاء مواد الجيل التالي التي تجعل المنتجات الاستهلاكية أكثر خضرة. بعد ذلك يتم إزالة ثاني أكسيد الكربون عن طريق احتجازه وحقنه في الخزانات الجوفية. وبعدها يستخدم الذكاء الاصطناعي والبيانات الضخمة لتقليل الانبعاثات من خلال مراقبة استهلاك الطاقة وتحسين العمليات، وتحسين المعالجة والتحليل الزلزالي، وتحسين طرق استخلاص النفط الخام، وتعزيز إنتاجية آبار النفط.

## • مبـــادرات مدينـــة نيـــوم

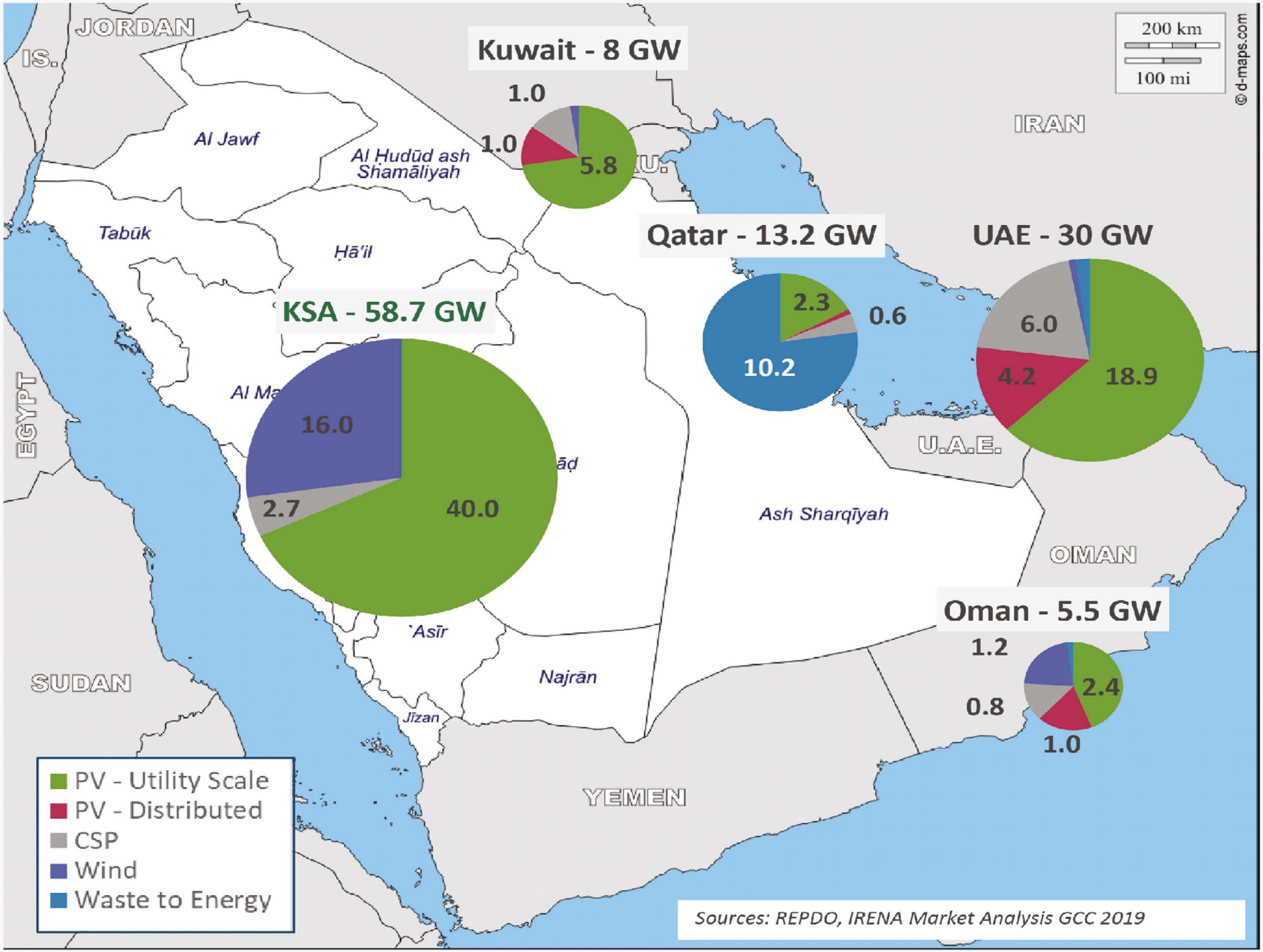
تشترك نيوم أيضًا في اقتصاد الكربون الدائري، وهو إطار لإدارة وتقليل أي انبعاثات كربونية من الطاقة المتجددة. إنه نظام حلقي مغلق يتضمن العناصر الأربعة: التخفيض، وإعادة الاستخدام، وإعادة التدوير، والإزالة. تعمل نيوم على دمج مبادئ الاقتصاد الدائري في جميع جوانب البناء والتشغيل. على سبيل المثال، في مدينة نيوم الصناعية المتقدمة والنظيفة (أوكساجون)، تعمل على تعظيم التآزر بين مختلف الصناعات، مما يساعد الشركات المصنعة على إغلاق الحلقة المتعلقة بالنفايات. من أكبر مساهمة نيوم في الاقتصاد الدائري من خلال المواد التي تُستخدم لبناء نيوم: 90 % من مدخلات الخام اللازمة لأساسات البيئات الحضرية المختلفة التي يتم بناؤها تأتي من مخلفات هدم نيوم.

بالإضافة إلى خطط الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الساحلية، فإن المملكة منافس حقيقي مؤهل ليكون رائدًا في السوق في تطوير الهيدروجين الأخضر. من الواضح أن إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة المتجددة سيتطلب كميات هائلة إضافية من قدرات الطاقة المتجددة، التي يجب أن تتمركز حول الموانئ والمناطق الصناعية للاستفادة من سلاسل التوريد حال تصدير الهيدروجين كما هو متوقع (Hasan and Shabaneh 2021).

# مشاريع الطاقة المتجددة ودورها في تحقيق الرؤية 2030

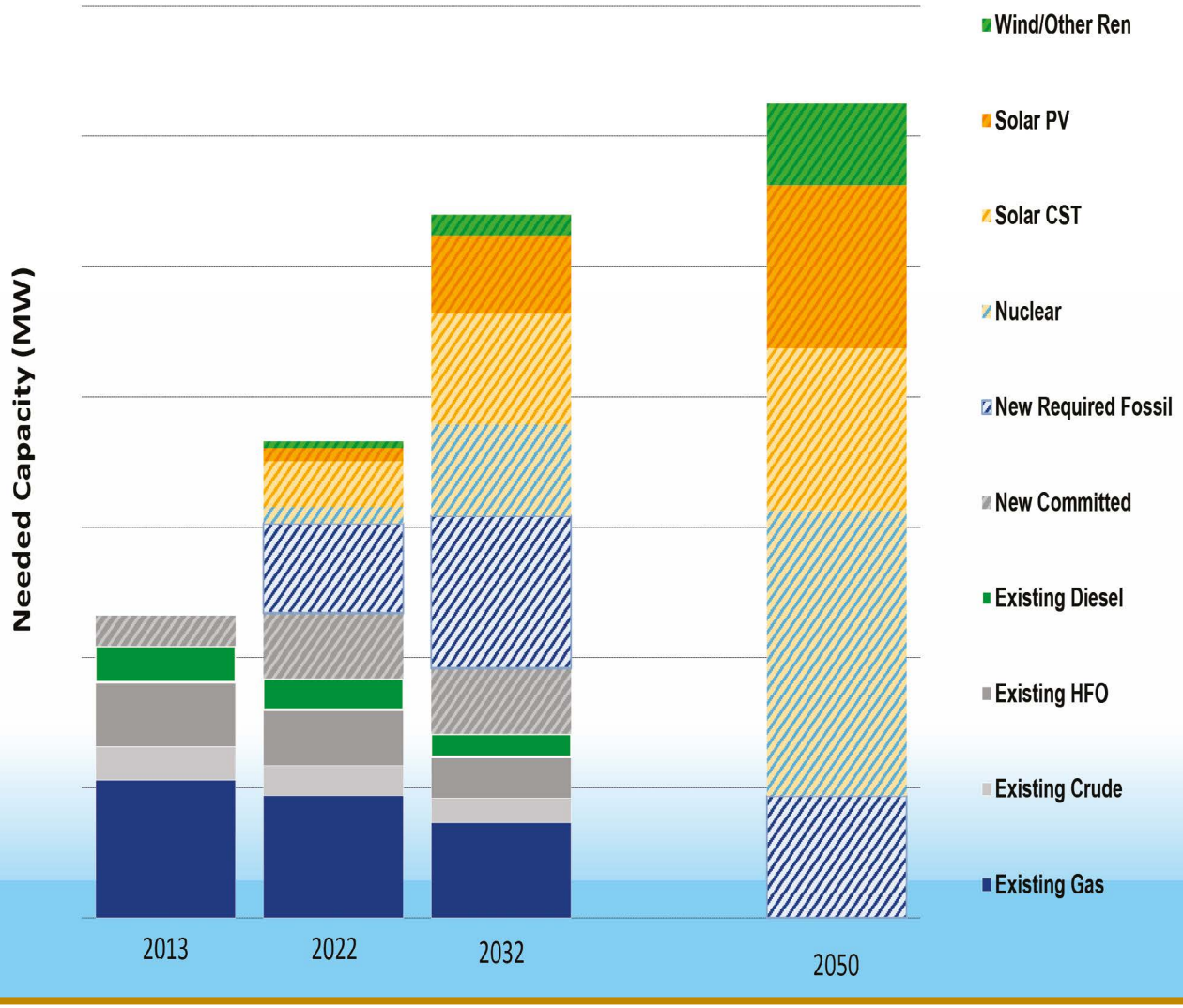
أصبحت دول مجلس التعاون الخليجي، بما في ذلك المملكة ، واحدة من أكبر 25 دولة في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون للفرد. شهدت المملكة زيادة سريعة في استهلاك الكهرباء خلال العقود الماضية لأسباب عديدة. بما في ذلك الزيادة السكانية والنمو الاقتصادي السريع والدعم الحكومي لأسعار الكهرباء. في عام 2021م، كشفت المملكة عن هدف طموح واستراتيجي لتحقيق صافي انبعاثات صفرية بحلول عام 2060م. وكان هذا بمثابة بداية مرحلة جديدة في سعي البلاد لتطوير الطاقة الخضراء. ومن ضمن جهودها لتعزيز كفاءة الطاقة، اتخذت المملكة مؤخرًا خطوات عملية لخفض دعم الطاقة.

تقع الطاقة الشمسية في قلب رؤية المملكة 2030، تستقبل كمية كبيرة من الإشعاع الشمسي، مما يوفر إمكانات عالية للطاقة الشمسية. ومع ذلك، هناك تحدٍ كبير يتمثل في تعزيز استخدام الطاقة الشمسية بين الناس. وبحسب الهيئة العامة للإحصاء، فإن نسبة الأسر التي تستخدم الطاقة الشمسية في السعودية لم تتجاوز 1.6 % في المتوسط عام 2018م. ومن ناحية أخرى، بلغت نسبة الأسر التي ترغب في استخدام التقنية الكهروضوئية في منازلها 52.3 %، وهي نسبة تعكس مستوى استعداد مقبول. ومع ذلك، أطلقت المملكة مؤخرًا العديد من المشاريع الرئيسية في مجال الطاقة الشمسية على نطاق واسع. ومع ذلك، فإن طاقة الرياح هي الفئة الأسرع نموًا بسبب الطلب المتزايد على الحلول المستدامة، وتعد ضرورة مكافحة تغير المناخ محركًا قويًا. مع تقدم تقنية الرياح، تنخفض التكاليف، مما يجعل طاقة الرياح خيارًا تنافسيًا وواعيًا بيئيًا، مما يزيد من تسريع ظهورها في مشهد الطاقة المتجددة.

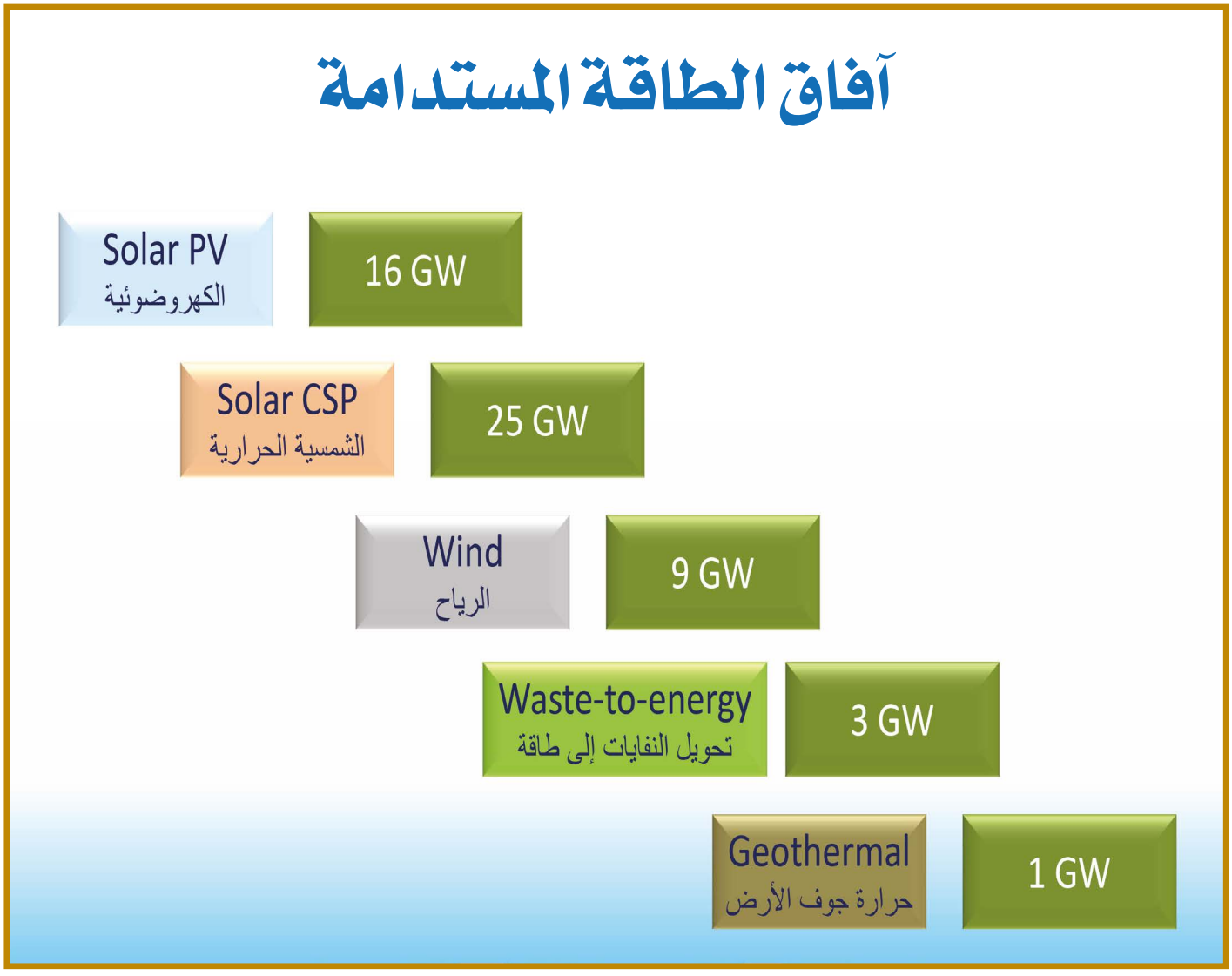

Kuwait - 8 GW
1.0
1.0
5.8
Qatar - 13.2 GW
2.3
0.6
10.2
UAE - 30 GW
6.0
4.2
18.9
KSA - 58.7 GW
16.0
2.7
40.0
Oman - 5.5 GW
1.2
0.8
2.4
1.0
200 km
100 mi
© d-maps.com
JORDAN
IRAN
Al Jawf
Al Ḥudūd ash Shamāliyah
Tabūk
Ḥā'il
EGYPT
U.A.E.
Ash Sharqīyah
OMAN
SUDAN
'Asīr
Najrān
Jīzan
YEMEN
PV - Utility Scale
PV - Distributed
CSP
Wind
Waste to Energy
Sources: REPDO, IRENA Market Analysis GCC 2019

زادت المملكة من استخدامها للطاقة المتجددة في السنوات الأخيرة، مع التركيز على طاقة الرياح و الطاقة الشمسية. وتتمتع بواحدة من أكبر القدرات الإنتاجية للطاقة المتجددة في دول مجلس التعاون الخليجي بنسبة 19 % و18 % على التوالي من إجمالي إنتاج طاقة الرياح والطاقة الشمسية في دول مجلس التعاون الخليجي. يتضمن هدف رؤية 2030م تطوير 40 جيجاوات من القدرة الشمسية الكهروضوئية (PV) و 2.7 جيجاوات من قدرة الطاقة الشمسية المركزة (CSP). ومن المتوقع أن يصل سوق الطاقة المتجددة السعودي إلى أكثر من مليونين دولار بحلول عام 2028م. تزايد عدد السكان، وارتفاع الطلب على الكهرباء، وزيادة الاستثمارات في الطاقة الشمسية ومشاريع الرياح هي من بين العوامل الرئيسية المستخدمة في تقدير حجم السوق (GRC, 2022).

# استهداف القدرة المتجددة




استهداف القدرة المتجددة إلى عام 2032م، (المصدر: KACARE, 2012)




آفاق الطاقة المستدامة في المملكة، (المصدر: KACARE, 2012)

## • التحديات والفرص التي تواجه الطاقة الشمسية

إن ظروف وفرة الإشعاع الشمسي بمثابة ركائز ممتازة وداعمة لتسخير مصادر الطاقة المتجددة بشكل فعال. كما أن كبر مساحة المملكة يخلق فرصًا لتنفيذ مشاريع الطاقة الشمسية الإستراتيجية على نطاق واسع علاوة على البنية التحتية المتطورة للمملكة تساهم في إنشاء شبكة كهرباء موثوقة وتسهيل توزيع الطاقة بكفاءة.

وفي المقابل يواجه قطاع الطاقة الشمسية أيضًا بعض نقاط الضعف حيث ان هناك حاجة لمزيد من تحسين القدرات التقنية المتقدمة لتعظيم كفاءة وإنتاج تقنيات الطاقة الشمسية. ويشكل ارتفاع استهلاك الطاقة السنوي للفرد تحديا في تلبية الطلب المتزايد على الطاقة على نحو مستدام، وعدم كفاية الوعي حول فوائد الطاقة الشمسية يزيد من عرقلة اعتمادها على نطاق واسع.

ومع ذلك، فإن قطاع الطاقة الشمسية أمامه العديد من الفرص للاستفادة من نقاط قوته والتغلب على أي نقاط ضعف. إن المشاركة الفعالة في المواثيق الدولية المعنية تفتح الأبواب أمام التعاون وتبادل الخبرات مع الشركاء الإقليميين والدوليين، مما يعزز تبادل المعرفة والتقدم التكنولوجي. توفر السوق الناشئة لتقنيات الطاقة الشمسية أيضًا فرصًا استثمارية جذابة.

وعلى الرغم من هذه الفرص، يجب أن يظل قطاع الطاقة يقظا بشأن التهديدات المحتملة. تتطلب درجة الحرارة العالية الحرارة في المملكة معالجة خاصة لتقنيات الطاقة الشمسية لضمان الأداء الأمثل وطول العمر. تتطلب موجات الغبار حلول تنظيف كهروضوئية فعالة للحفاظ على كفاءة الألواح الشمسية. وقد تؤثر التقلبات في أسعار النفط على توافر الأموال العامة، مما

يؤثر على السلامة المالية للقطاع. علاوة على ذلك، فإن عدم استقرار سلاسل التوريد العالمية بسبب الوباء يشكل تحديات في تأمين المكونات الأساسية لمشاريع الطاقة الشمسية. أصبحت الطاقة المتجددة ذات أهمية متزايدة في المملكة على مدى السنوات القليلة الماضية

منحت المملكة مشروعان للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقيمة تقديرية تبلغ 453 مليون دولار كجزء من اتفاقية شراء الطاقة (PPA) التي ستزيد الطاقة الإنتاجية للمملكة إلى أكثر من 1 جيجاوات. وسوف يساعد هذا في مواءمة المملكة مع هدفها المتمثل في استخلاص 50 % من احتياجاتها من الكهرباء المحلية من مصادر متجددة بحلول عام 2030م. كما أعلنت وزارة الطاقة أنها ستقدم حوافز لمطوري مشاريع الطاقة تسمح لهم بالاستفادة من بعض المزايا والإعفاءات الجمركية. إن سعي المملكة نحو مستقبل أكثر اخضرارًا يخلق فرصًا كبيرة للشركات في قطاع الطاقة المتجددة. ومن خلال تبني تقنيات الطاقة المتجددة وممارسات الاستدامة، لا تستطيع الشركات تقليل بصمتها الكربونية فحسب، بل يمكنها أيضًا الحصول على ميزة تنافسية في السوق العالمية سريعة التغير. ويجب أن يكون مستقبل الطاقة متاحاً وبأسعار معقولة ومستداماً في المقام الأول.

في الواقع هناك طلب متزايد على الطاقة في جميع أنحاء العالم، و80 % من الاستخدام الحالي للطاقة يعتمد على الوقود الأحفوري. إن تحقيق التنمية المستدامة من الاهداف المهمة للجميع. وفي هذا السياق، يبدو أن استخدام موارد الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية هو أحد أكثر الطرق كفاءة وفعالية لتحقيق هذا الهدف لأن الطاقة المتجددة وفيرة عالميًا وتحمل وعودًا بيئية واقتصادية ضخمة.

## مشاريع الطاقة الشمسية الرئيسية

تعود جهود المملكة في أبحاث الطاقة الشمسية وتطبيقاتها إلى منتصف السبعينيات. وشمل ذلك مزارع الطاقة الشمسية الكهروضوئية وتحلية المياه بالطاقة الشمسية الحرارية، من بين أمور أخرى. بدأت المملكة مؤخراً العديد من المشاريع الإستراتيجية في مجال الطاقة الشمسية. ومن المتوقع أن يوفر كل من هذه المشاريع المزيد من الفرص الاقتصادية، وخلق فرص العمل، ودفع التنمية الاقتصادية المستدامة. ونذكر بعض المشاريع البارزة في هذا الصدد على النحو التالي:

### ■ مشروع محطة سكاكا للطاقة الشمسية

مشروع سكاكا للطاقة الشمسية، هو مشروع للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 300 ميجاوات، يقع في منطقة الجوف. تتم إدارة المشروع من قبل وزارة الطاقة ويتألف من 1.2 مليون لوح شمسي مذهل موزعة على مساحة 6 كيلومتر مربع. توفر المحطة تخفيضًا سنويًا قدره 606 ألف طن من انبعاثات الكربون وتولد ما يكفي من الكهرباء لتشغيل 44000 منزل. بدأ المشروع عملياته في يونيو 2021م ومن المتوقع أن يعوض 10.5 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون خلال فترة عمله..

### ■ مشروع نيوم للطاقة الكهروضوئية الهيدروجينية

سوف يتم شرحه بالتفصيل لاحقا . هو مشروع لتطوير أكبر منشأة للهيدروجين الأخضر في العالم في موقع نيوم. تبلغ قيمة الاستثمار الإجمالية للمشروع 8.4 مليار دولار. وتهدف إلى الريادة وتسريع اعتماد الهيدروجين الأخضر من خلال إنتاج 600 طن يوميًا من الهيدروجين الخالي من الكربون على أن يتم الانتهاء منه في نهاية عام 2026م. المشروع مدعوم بالكامل بالطاقة

المتجددة بنسبة 100 %، يمثل خطوة مهمة نحو مستقبل خالٍ من الكربون في المملكة ويضع المملكة كشركة رائدة عالميًا في ثورة الهيدروجين.

## ■ مشروع سدير للطاقة الشمسية الكهروضوئية

يقع هذا المشروع في الرياض، قيد التطوير من قبل شركتي أكوا باور وأرامكو السعودية. ومن المتوقع أن تولد المحطة 1500 ميجاوات بمجرد اكتمالها في عام 2024م. ومن المقرر أن تصبح واحدة من أكبر محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية ذات التعاقد الفردي في العالم. وتبلغ تكلفته أكثر من 900 مليون دولار، ومن المتوقع أن يوفر 07 % من إجمالي الطاقة المتجددة في المملكة بحلول عام 2030م.

## ■ مشروع الشعيبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية

من المقرر أن تصبح أكبر منشأة للطاقة الشمسية في الشرق الأوسط، وسيتم بناء مجمع الشعيبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية في الشعيبة، منطقة مكة المكرمة. ومن المقرر أن تتعاون الشركة القابضة للمياه والكهرباء وأكوا باور لتطوير المشروع لإنتاج ما يكفي من الكهرباء لتزويد 350 ألف منزل بالطاقة. يتم تشغيل المشروع بحلول عام 2025م، وسوف يمثل خطوة أخرى نحو مستقبل أكثر اخضرارًا للمملكة.

## مشاريع الرياح الرئيسية

### ■ مشـــروع دومـــة الجنـــدل للريـــاح

يقع مشروع دومة الجندل على بعد 900 كيلومتر شمال الرياض في منطقة الجوف، وهو أول مشروع لطاقة الرياح على نطاق المرافق في المملكة العربية السعودية. وهي تتألف من 99 توربينة رياح، كل واحدة منها قادرة على توليد الكهرباء لما يصل إلى 70 ألف منزل في المملكة. قامت مجموعة بقيادة EDF Renewables ومصدر بتطوير المشروع بقدرة 400 ميجاوات، مما أدى إلى خلق وهو يتألف من 600 فرصة عمل أثناء البناء. تم ربط المشروع رسميًا بالشبكة في عام 2021م وأصبح جاهزًا للعمل بكامل طاقته في عام 2022م، بتكلفة تقدر بنحو 500 مليون دولار.

### ■ مشـــروع نيـــوم لريـــاح الهيدروجـــين الأخضـــر

مشروع نيوم لطاقة الرياح الهيدروجينية الخضراء هو مشروع لطاقة الرياح البرية بقدرة 1370 ميجاوات يقع في تبوك. يتم تطويره بواسطة شركة أكوا باور. المشروع حاليا في مرحلة السماح. ومن المتوقع أن يدخل المشروع مرحلة التشغيل التجاري في عام 2026م.

### ■ محطـــة ينبـــع لطاقـــة الريـــاح

محطة ينبع لطاقة الرياح هي مشروع لطاقة الرياح البرية بقدرة 850 ميجاوات في المدينة المنورة. يقوم مكتب تطوير مشاريع الطاقة المتجددة بتطوير هذا المشروع. ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل المشروع بحلول عام 2025م. والمشروع حاليًا في مرحلة الإعلان عنه. وهي مملوكة لمكتب تطوير مشاريع الطاقة المتجددة. شراء الملف الشخصي هنا.

- **مزرعة رياح ينبع**

تقع محطة ينبع لطاقة الرياح بقدرة 700 ميجاوات في المدينة المنورة. وهي مملوكة للشركة السعودية لشراء الطاقة. ومن المتوقع أن يتم التشغيل التجاري للمشروع في عام 2026م.

- **مزرعة الغاط للرياح**

مزرعة رياح الغاط هي مشروع طاقة رياح بري بقدرة 600 ميجاوات. وتقع في مدينة الرياض. سيتم تطويرها من قبل الشركة السعودية لشراء الطاقة. ومن المتوقع أن يتم تشغيل المشروع بحلول عام 2026م.

- **مزرعة وعد الشمال للرياح**

من المتوقع أن يتم تشغيل مشروع طاقة الرياح البرية، في مزرعة وعد الشمال، بقدرة 500 ميجاوات، بحلول عام 2026م. ويتم تطويره من قبل الشركة السعودية لشراء الطاقة.

## مشاريع الطاقة الحرارية الأرضية

تمتلك المملكة أيضًا موارد هائلة من الطاقة الحرارية الأرضية ويتركز نشاط الطاقة الحرارية الأرضية في المملكة في المقام الأول على السهل الساحلي الغربي على طول ساحل البحر الأحمر، وحقول الحمم البركانية المعروفة باسم الحرات المنتشرة عبر الدرع العربي، والصخور الجرانيتية حول وشمال حائل، والتسلسل الطبقي السميك في الجانب الشرقي من الدرع العربي، وحوض الربع الخالي. وتُعد منطقة جازان نظامًا حراريًا أرضيًا واعدًا، يضم عددًا من الينابيع الساخنة ذات الصلة الهيكلية، تبلغ درجة حرارة سطحها من 46 إلى 78 درجة مئوية.

تشير الطاقة الحرارية الأرضية إلى الحرارة التي تنشأ من أعماق باطن الأرض. يتم تخزين هذه الحرارة في الصخور والسوائل تحت قشرة الأرض، ويمكن العثور عليها في الصهارة. ولتسخير هذه الطاقة في توليد الكهرباء، يتم حفر الآبار إلى أعماق تتراوح بين 400 إلى 5000 متر للوصول إلى الخزانات الجوفية للبخار والسوائل الساخنة، والتي تستخدم بعد ذلك لتشغيل توربينات متصلة بالمولدات الكهربائية. توفر الطاقة الحرارية الأرضية طاقة أساسية مستدامة يمكن استخدامها لتدفئة/ تبريد المناطق، وتحلية المياه، وحتى توليد الكهرباء . تهدف هذه التقنية الى تقليل بعض التحديات التي تواجهها عند استخدام مصادر الطاقة المتجددة الأخرى (مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والهيدروجين). بالإضافة إلى ذلك، فإن استخراج الطاقة الحرارية الأرضية، باستخدام ثاني أكسيد الكربون يمكن أن يتيح تقنية احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS). إن توليد الطاقة الحرارية الأرضية ليس موسميًا ولا يتأثر بالظروف الجوية، مما يعني أن إمدادات الطاقة من محطات الطاقة الحرارية الأرضية ثابتة وبالتالي أكثر موثوقية.

مبادرة التنقيب عن طاقة الأرض الحرارية في المملكة وتقييمها من أهم المبادرات، وهي مبادرة يشترك فيها برنامج تطوير الصناعة الوطنية والخدمات اللوجستية مع هيئة المساحة الجيولوجية . قامت هذه المبادرة بالبحث والتنقيب عن مكامن طاقة الأرض الحرارية بطريقة متخصصة في بعض مناطق الحرّات. كذلك قامت جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية وطاقة بحفر بئر ضحلة بعمق 400 متر في حرم الجامعة لرصد ومراقبة مشاريع توليد الطاقة الحرارية الأرضية المستقبلية في المملكة.

إن إطلاق برنامج طاقة الأرض الحرارية الخاص بالمملكة واعتماد إضافته إلى مزيج الطاقة السعودي هو أمر في غاية الأهمية في هذه المرحلة التي تسعى فيها المملكة للوفاء بالتزاماتها الدولية في اتفاق باريس للتقليل من الانبعاثات الكربونية والوصول إلى الحياد الصفري (طيبة 2022م).

يهدف مشروع نيوم للهيدروجين الأخضر الذي يعمل بالطاقة المتجددة لإنتاج الأمونيا والهيدروجين الأخضر لتوفير حلول مستدامة لقطاع النقل العالمي، ومواجهة تحديات التغير المناخي، من خلال حلول عملية لتخفيض الانبعاثات الكربونية. يهدف المشروع الذي يشارك في تطويره وتنفيذه كل من «نيوم» و«أير برودكتس» و«أكوا باور» إلى تبني أحدث الطرق المبتكرة لتوفير قدرة إنتاجية موحّدة تبلغ حوالي 4 جيجا وات من الطاقة المتجددة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والتخزين.

بحلول عام 2026م ينتظر أن يصبح جاهزاً لإنتاج الهيدروجين، ومن ثم تصديره إلى الأسواق العالمية، ليُستخدم وقوداً حيوياً يغذي أنظمة النقل

والمواصلات. وسينتج المشروع العملاق نحو 650 طن متريً من الهيدروجين الأخضر النظيف يومياً، و1.2 مليون طن متري من الأمونيا الخضراء سنوياً، ليساهم بذلك في الحد من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، بما يعادل 3 ملايين طن متري سنوياً.

يعتمد المشروع على تقنية مثبتة الفاعلية حيث سيجمع بشكل متكامل بين توليد ما يزيد على 4 جيجا وات من الطاقة المتجددة المستمدة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والتخزين، بالإضافة إلى إنتاج الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي، باستخدام تقنية «ثيسن - كراب»، وإنتاج النيتروجين عن طريق فصل الهواء باستخدام تقنية «إير برودكت» ، وإنتاج الأمونيا الخضراء باستخدام تقنية «هالدور توبوز».

## ■ لماذا الهيدروجين الأخضر؟

الهيدروجين هو أكثر العناصر الكيميائية وفرة في الطبيعة. وكما أشارت وكالة الطاقة الدولية، فقد تضاعف الطلب العالمي على الهيدروجين لاستخدامه كوقود ثلاث مرات منذ عام 1975م ووصل إلى 70 مليون طن سنويًا في عام 2018م. بالإضافة إلى ذلك، يعد الهيدروجين الأخضر مصدرًا للطاقة النظيفة التي ينبعث منها بخار الماء فقط ولا يترك أي بقايا على عكس الفحم والنفط.

تعد إزالة الكربون أحد الأهداف التي حددتها البلدان في جميع أنحاء العالم لعام 2050م. ولتحقيق ذلك، تعد إزالة الكربون من إنتاج عنصر مثل الهيدروجين، مما يؤدي إلى ظهور الهيدروجين الأخضر، لأنه مسؤول حاليًا عن أكثر من 2 % من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية. تعتمد هذه التقنية على توليد الهيدروجين وهو وقود عالمي وخفيف وعالي التفاعل من خلال عملية كيميائية

تعرف بالتحليل الكهربائي. تستخدم هذه الطريقة تيارًا كهربائيًا لفصل الهيدروجين عن الأكسجين الموجود في الماء. إذا تم الحصول على هذه الكهرباء من مصادر متجددة، فسننتج طاقة دون انبعاث ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي.

وكما تشير وكالة الطاقة الدولية، فإن طريقة الحصول على الهيدروجين الأخضر من شأنها أن توفر 830 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون المنبعثة سنويا عندما يتم إنتاج هذا الغاز باستخدام الوقود الأحفوري. وعلى نحو مماثل، فإن استبدال كل الهيدروجين الرمادي في العالم سوف يتطلب 3000 تيرا وات/ساعة سنويًا من مصادر الطاقة المتجددة الجديدة .

## ■ مزايا الهيدروجين الأخضر

- مستدام بنسبة 100 %: الهيدروجين الأخضر لا ينبعث منه غازات ملوثة سواء أثناء الاحتراق أو أثناء الإنتاج.
- يحتوي الهيدروجين على ما يقرب من ثلاثة أضعاف الطاقة التي يحتويها الوقود الأحفوري، مما يجعله أكثر كفاءة.
- قابل للتخزين: يتميز الهيدروجين بسهولة تخزينه، مما يسمح باستخدامه لاحقاً لأغراض أخرى وفي أوقات غير مباشرة بعد إنتاجه.
- متعدد الاستخدامات: يمكن تحويل الهيدروجين الأخضر إلى كهرباء أو غاز صناعي واستخدامه في الأغراض التجارية أو الصناعية أو التنقل.

## عيـــوب الهيدروجـــين الأخضـــر

- التكلفة العالية: الطاقة من المصادر المتجددة، والتي تعتبر أساسية لتوليد الهيدروجين الأخضر من خلال التحليل الكهربائي، تكون أكثر تكلفة لتوليدها، مما يجعل الحصول على الهيدروجين أكثر تكلفة.
- استهلاك عالٍ للطاقة: يتطلب إنتاج الهيدروجين بشكل عام والهيدروجين الأخضر بشكلٍ خاص طاقة أكبر من أنواع الوقود الأخرى.
- قضايا السلامة: الهيدروجين عنصر شديد التطاير وقابل للاشتعال، ولذلك يلزم اتخاذ تدابير سلامة واسعة النطاق لمنع التسرب والانفجارات.

# سلاسل القيم في صناعة النفط

تمت دراسة مجموعة السلع الصناعية المختلفة في سلسلة قيمة الطاقة المتجددة والموضحة بالنسبة لـ 3 مصادر للطاقة المتجددة وهي: طاقة الرياح, الطاقة الشمسية الكهروضوئية PV الطاقة الشمسية المركزة (الحرارية) CSP. هناك عدد قليل من عناصر سلسلة قيمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية محلية في المملكة. أعظم قيمة مضافة في سلسلة القيمة هي تصنيع الخلايا. يضيف الاستثمار في تصنيع الخلايا الداخلية قيمة، لكنه يعتمد على الإنفاق على البحث والتطوير. إنها معرضة لخطر التقادم.

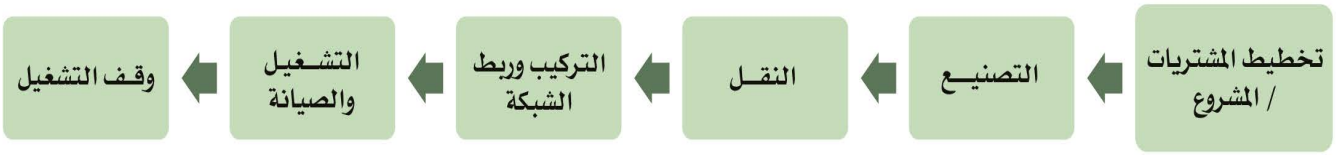
يركز البحث والتطوير في مجال الخلايا القائمة على السيليكون على زيادة مكاسب الكفاءة العقلية: تقليل حجم المواد وتحسين البنية، مثل أكبر الخلايا حجما، والوصلات غير المتجانسة، والنوع n، ونصف الخلية. التغيير التخريبي سيأتي من جديد من المواد التقنية الخلوية، على سبيل المثال، البيروفسكايت، والأغشية الرقيقة، والنقاط الكمومية، والمواد العضوية. حاليًا، تهيمن تقنيات الجيل الأول على سوق الطاقة الكهروضوئية مع تحول متزايد إلى تقنيات الجيل الثاني والثالث التي توفر كفاءة أعلى وتكلفة أقل أو حالات استخدام أحدث.

سلاسل القيم في الطاقة السمشية الكهروضوئية، (المصدر: SIDF, 2022)

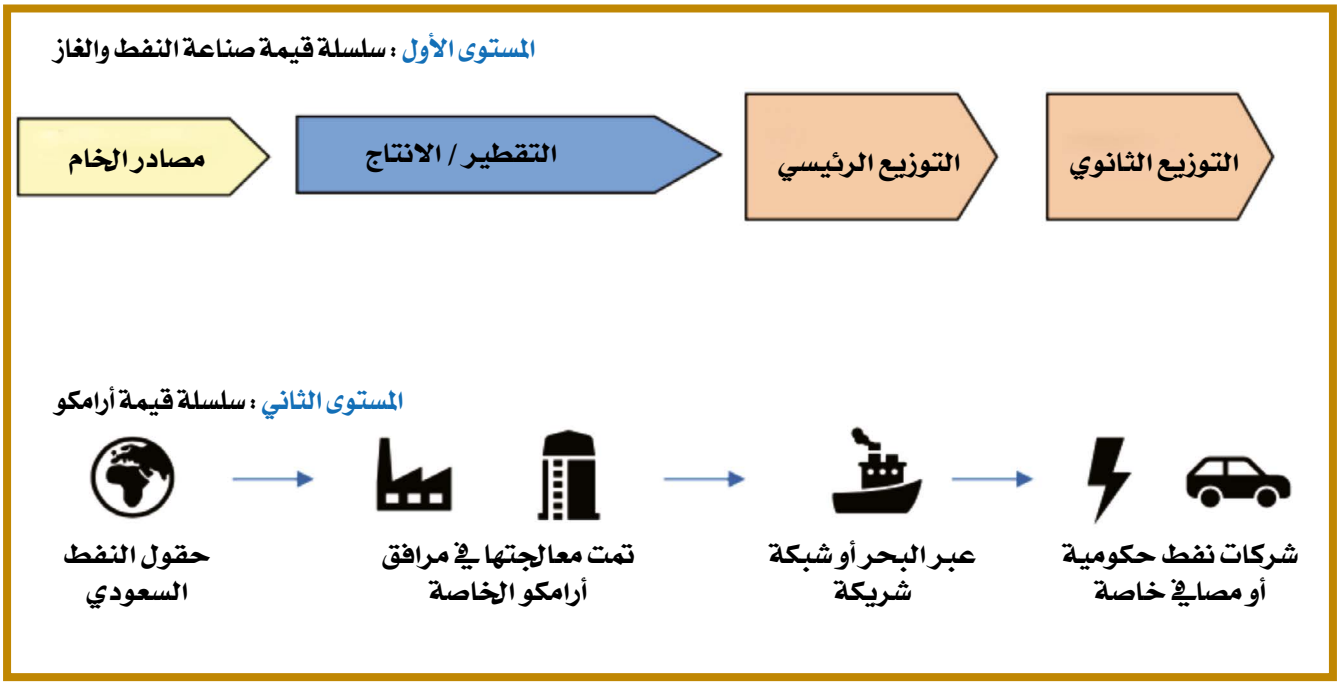
تطوير سلاسل القيم، (المصدر: KACARE, 2012)

# تحليل سلاسل القيم

تحليل سلسلة القيمة لمشاريع الطاقة المتجددة يسمح لصناع السياسات بالتخطيط مسبقاً ومعرفة الوظائف التي ستكون متاحة، وما إذا كانت القوى العاملة متاحة، والمجالات التي ستستهدفها لتحقيق أهداف التوطين التي تتوافق مع إستراتيجية التنمية في الدولة. تفرض الوكالة الدولية للطاقة المتجددة سلسلة قيمة خطية في تحليلها للرياح الساحلية والطاقة الشمسية الكهروضوئية ( KS-2023--DP15-ARA ).

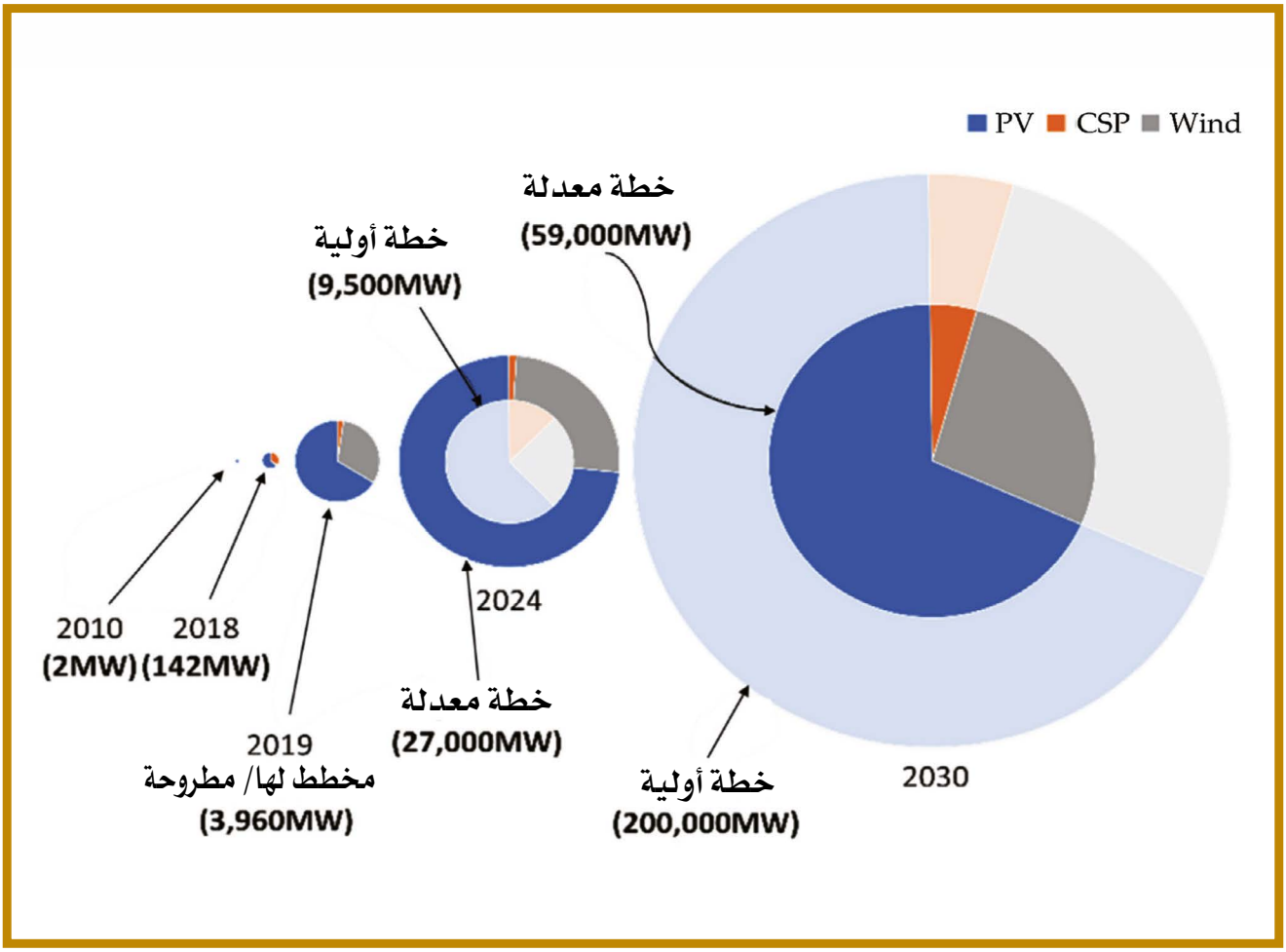



تبدأ السلسلة بتخطيط المشروع، الذي يتضمن اختيار الموقع، ودراسات الجدوى الاقتصادية، بالإضافة إلى عقود الهندسة والتأمين. وتستمر العملية للتصنيع، مما يستلزم انتاج الألواح والوحدات الشمسية للطاقة الشمسية الكهروضوئية، وتوربينات الرياح. ومرحلة النقل تشمل شحن المنتجات المصنعة إلى الموقع النهائي وتتضمن التركيب وربط الشبكة. كذلك تجميع المعدات في الموقع النهائي وليس فقط توصيل المخرجات بالشبكة الوطنية فعليًا، ولكن أيضًا تلبية المتطلبات التنظيمية التي تضمن التوافق. عمليات التشغيل والصيانة هي عملية التشغيل والإدارة اليومية للمرفق، وأخيرًا، في نهاية سلسلة القيمة في دورة حياة المصنع، تكون مرحلة إيقاف التشغيل، حيث تفريغ الموقع وتفكيك المعدات وإعادة تدويرها.


المستوى الأول : سلسلة قيمة صناعة النفط والغاز
مصادر الخام
التقطير / الانتاج
التوزيع الرئيسي
التوزيع الثانوي
المستوى الثاني : سلسلة قيمة أرامكو
حقول النفط السعودي
تمت معالجتها في مرافق أرامكو الخاصة
عبر البحر أو شبكة شريكة
شركات نفط حكومية أو مصافي خاصة

# مركبات سلاسل قيم الطاقة المتجددة (المصدر: KACARE, 2012)

| الشمسية الحرارية CSP | العناصر | الشمسية الكهروضوئية PV | العناصر | التقنية | العناصر |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 حوض | • Collector<br>• Mirror<br>• Absorber<br>• EPC & O&M<br>• Molten Salts<br>• HTF<br>• Steam turbine and generator<br>• Storage Tank<br>• Other power block elements<br>• Minor elements | 3 فيلم رقيق | • Integrated Module Factory<br>• EPC & O&M<br>• Inverter<br>• Rest of balance of system | 6 رياح | • Blades<br>• Towers<br>• EPC & O&M<br>• Gearbox<br>• Generator<br>• Power converter<br>• Nacelle housing and assembly<br>• Bearings<br>• Minor elements |
| 2 برج | • Heliostat<br>• Mirror<br>• EPC & O&M<br>• Receiver<br>• Molten Salts<br>• Steam turbine and generator<br>• Storage tank<br>• Other power block elements<br>• Minor elements | 4 HCPV | • Integrated Module Factory<br>• Tracking System<br>• EPC & O&M<br>• Inverter<br>• Rest of balance of system | 7 من المخلفات الى الطاقة | • EPC & O&M<br>• Steam Turbine<br>• Boiler<br>• Grate<br>• Other power block elements<br>• Minor elements |
| | | 5 سيليكون | • EPC & O&M<br>• Poly Silicon manufacturing<br>• Inverter<br>• Wafer<br>• Cell<br>• Module<br>• Rest of balance of system | 8 الحرارية الارضية | • EPC and O&M<br>• Steam Turbine<br>• Heat exchanger<br>• Condenser<br>• Minor elements |




سلاسل القيم في الطاقة السمشية الكهروضوئية (PV)، (المصدر: SIDF, 2022)

يوضح الشكل خطة وزارة الطاقة تركيب ما يقرب من 60 جيجاوات من الطاقة المتجددة بحلول عام 2030م، والتي تتكون من 40 جيجاوات من الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV)، و 16 جيجاوات من الرياح و 2.7 جيجاوات من الطاقة الشمسية المركزة (CSP) Alghamdi et al., 2022

إن وجود 0.36 جيجاوات فقط من القدرة المركبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية في عام 2020م يعني أن المملكة بحاجة إلى التوسع بأكثر من 110 أضعاف قدرتها الحالية على الطاقة الشمسية الكهروضوئية لتصل إلى 40 جيجاوات بحلول عام 2030م. يغطي مشروع مزرعة الطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 300 ميجاوات حاليًا في سكاكا مساحة تبلغ مساحتها حوالي 6 كيلومتر مربع. ولتحقيق هدف بقدرة 40 جيجاوات بنفس كثافة المنطقة، سيتطلب الأمر حوالي 800 كيلومتر مربع. ومن الواضح أن مثل هذا التوسع سيتطلب سلسلة توريد قوية ومحسنة وفهمًا للمحتوى المحلي لتحقيق الهدف الطموح البالغ 40 جيجاوات.

إن الاندفاع في اتجاه إزالة الكربون من سلاسل القيمة العالمية يمثل أيضا فرصة عظيمة للتعجيل بالانتقال إلى صافي الصِفر. ولأن شبكات الإنتاج تعتمد على قدرة الشركات على زيادة الكفاءة عبر سلسلة التوريد، فمن الممكن أن تضطلع هذه الشركات بدور مهم في دفع أجندة صافي الصِفر عبر الحدود والقطاعات. وقد تعهدت العديد من هذه الشركات بالفعل بتحقيق الحياد الكربوني بحلول عام 2050م.

تهدف المملكة إلى تكثيف اعتماد قطاع الطاقة المتجددة، لتوطين 30 % على المدى القصير و60 % على المدى الطويل من سلسلة القيمة. ولتحقيق ذلك، يجب أن يكون سوق المحتوى المحلي كبيرًا بما يكفي لتوفير القدرة المخططة لذلك. وعلى الرغم من أن المملكة تتمتع بموارد ممتازة من طاقة الرياح والطاقة الشمسية، إلا أن سلسلة التوريد الحالية ومجموعات المهارات ليست كافية للتوسع المستقبلي المخطط له في مجال الطاقة المتجددة.

خارطة طريق لنشر طاقة بديلة، (المصدر: KACARE, 2012)

# سلاسل التوريد في النفط والغاز

تعد صناعة النفط والغاز نظامًا معقدًا وديناميكيًا يحتاج إلى التكامل والتنسيق في جميع مراحله من أجل التشغيل الفاعل للصناعة، حيث يسمح التكامل المناسب بتحكم أكبر في العملية برمتها، وتحسين التعرف على الفشل ونقاط التحسين المحتملة في المنتجات والعمليات. وبهذه الطريقة، يتم التنبؤ باستمرار القدرة التنافسية واستدامة الصناعة. وفي هذا السياق، يؤدى تنفيذ التقنيات المتقدمة إلى خفض التكاليف وزيادة الكفاءة وتقليل التأثير البيئي إلى الحد الأدنى.

إن التشغيل الفاعل للأصول في صناعة النفط والغاز له تأثير كبير على الاقتصاد العالمي والمجتمع بأكمله. تتطلب الأنشطة المشاركة في هذه الصناعة تخطيطًا دقيقًا ورسم خرائط للعمليات لتحسين نتائج الأعمال. ورغم أنه يحرك تدفقات رأسمالية ضخمة ويوظف الملايين من البشر، فإن المخاطر الكارثية أصبحت وشيكة في هذا القطاع. وفي هذا المجال تظهر مفاهيم Upstream و Midstream وDownstream، والتي تشير إلى تنظيم سلسلة التوريد ومواصفاتها، والتي تستهدف المراقبة المثلى للعمليات المتضمنة في كل مرحلة. تعمل هذه القطاعات معًا لحل التحديات التي ينطوي عليها استكشاف وإنتاج ونقل وتخزين وتكرير وتوزيع النفط والغاز الطبيعي والمنتجات المشتقة.

سوف نقوم بوصف الخصائص الرئيسية لكل قطاع من هذه القطاعات، وما هي التحديات التي يجب التغلب عليها لمواصلة الإنتاج بأقل قدر من الخسائر وربحية معززة.

## المنبـــــع Upstream

يشمل قطاع صناعات المنبع البحث عن حقول النفط والغاز تحت الأرض أو تحت البحر، وحفر الآبار الاستطلاعية، ومن ثم حفر وتشغيل الآبار واستخراج النفط و/أو الغاز الطبيعي إلى السطح. بالإضافة إلى استخدام تقنيات غير

شائعة مثل التكسير الهيدروليكي، والاستخلاص المعزز للنفط (EOR)، وميثان طبقة الفحم (CBM) لاستخراج البترول والغاز الطبيعي من الآبار الجوفية. وقد برز توجه كبير نحو إلحاق الغاز غير التقليدي بصناعات المنبع وبما حصل من تطورات مشابهة في معالجة ونقل الغاز الطبيعي المسال. تتطلب المخاطر والتحديات الكامنة في هذا القطاع حلولاً تقنية متقدمة لضمان استخراج الموارد بشكل آمن وفعال.

**مرحلة المنبع:** تشير مرحلة المنبع إلى نقطة البداية للإنتاج وهي تشمل بدورها المراحل التالية:

- **الاستكشاف**

في هذا الجزء يبدأ علماء الجيولوجيا وخبراء هندسة النفط في البحث عن المناطق والتكوينات الصخرية التي يشتبه وجود احتياطي نفطي فيها، يعتمد هؤلاء حالياً في عملهم على مجموعة من التقنيات التكنولوجية وأجهزة المسح الجيولوجي الحديثة والتصوير الزلزالي التي لها نتائج دقيقة إلى حدٍ ما، بينما كان يعتمد المستكشفون الأوائل على ظهور علامات سطحية في المنطقة لمعرفة مكان وجود احتياطيات، مثل التسربات النفطية. تعتبر عملية الاستكشاف ذات مخاطر عالية وتكاليف باهظة بشكل عام، لكن مع ذلك عند استكشاف موقع حقل منتج يكون عائد استخراج النفط والغاز منه كافيًا لاسترداد التكاليف المدفوعة كافة.

- القدرة المستدامة القصوى للإنتاج في أرامكو السعودية 12 مليون برميل يوميا.
- احتياطيات حقل الجافورة غير التقليدي وصلت لـ 200 تريليون قدم مكعب من الغاز.

- **الحفر أو التنقيب**

بعد العثور على الموقع الصحيح يتم تحديد استراتيجية التنقيب عن النفط والغاز المناسبة للبدء بعملية الحفر وما هو مستوى الإنتاج الإجمالي منه اعتمادًا على التقرير الصادر عن لجنة الاستكشاف.

تؤثر الأعماق التي يلزم عمليات الحفر أن تصل إليها وصلابة الصخور وبعد الموقع والظروف الجوية السائدة أثناء الحفر على المدة اللازمة للانتهاء، كذلك التقنيات والمعدات المستخدمة والمناطق التي يتم فيها الحفر لها دورها المؤثر على عملية الحفر، يوفر استخدام التقنيات الحديثة في الحفر مزايا مختلفة، كتوفير الوقت وتكاليف التشغيل، وكذلك خفض خطر التأثير البيئي.

## • الاســـتخراج

عندما يصل الحفر إلى البئر النفطي يتم تقدير إجمالي الإنتاج المتوقع منه، كم ألف أو مليون أو مليار برميل أو متر مكعب سيتم إنتاجه يوميًا منه، يجب أيضًا تصنيف البئر تبعًا لكثافة النفط أو حجم الكبريت فيه.

التصنيف من حيث الكثافة يكون بالقول بأن البئر ذو كثافة منخفضة إذا بلغ الوزن النوعي له (API) نسب مرتفعة، وذو كثافة عالية عندما يكون الوزن النوعي له منخفضًا.

أمّا بالنسبة للكبريت يقال عن البئر حامضي إن كان معدل الكبريت فيه عاليا، وحلوًا إن بلغت درجة الكبريت فيه مستوى منخفضًا، يكون عادةً سعر النفط الخام الخفيف والحلو أعلى ومرغوبًا أكثر بسبب سهولة تكريره. بالنسبة للغاز فقد يسمى الغاز المصاحب للنفط وهو الذي يطفو أعلى الهيدروكربونات أو يكون غير مصاحب حيث البئر يحتوي على الغاز وحده، كذلك الأمر إمّا أن يكون حامضيًا أو حلوًا.

موضوع تحديد طبيعة البئر أمر ضروري جدا لتحديد نوع المعالجة أو التكرير اللازم ونوع الأنابيب التي سوف تنقل به شركة النفط والغاز تلك المواد المطلوب إنتاجها وألا تكون عرضة للتآكل، بعد الانتهاء من كل ذلك تبدأ عملية الاستخراج الفعلية من المكامن الجوفية، يتم في هذه الخطوة إجراء عمليات التكسير وإعادة تدوير سائل التكسير.

## مرحلة منتصـــــف الطريـــــق Midstream

وهـي ثانـي مراحـل إنتـاج النفـط والغـاز، وتشـمل: الأنشـطة المتعلقـة بالنقـل والتخزيـن والمعالجـة والخدمـات اللوجسـتية للنفـط الخـام والغـاز الطبيعـي والمنتجات المشـتقة، بمـا في ذلـك اسـتخدام البنـى التحتيـة المحـددة القـادرة علـى نقـل المـوارد بأمـان إلـى نقطـة الإنتـاج. هـذا هـو المـكان الـذي سـيتم فيـه تكريـر المـواد الخـام وتحويلهـا إلـى منتجـات نهائيـة. منتصـف الطريـق هـو الجسـر بـين المنبـع والمصـب، ويربـط الاستكشـاف والإنتـاج بالمسـتخدمين النهائيـين. تعـد خطـوط الأنابيـب والخزانـات والمحطـات بنيـة تحتيـة مهمـة لقطـاع النقـل الأوسـط، حيـث أنهـا تسـمح بالنقـل الآمـن والفعـال لهـذه المـوارد عبـر مسـافات طويلـة.

وباعتبارهـا تحديًـا رئيسـيًا، فـإن منتصـف الطريـق يشـكل مخاطـر وقـوع حـوادث بيئيـة وأخـرى متعلقـة بالسـلامة، والتـي يمكـن أن يكـون لهـا عواقـب وخيمـة. ولذلـك، فـإن العثـور علـى التطبيـق الصحيـح للتقنيـة المتقدمـة للمسـاعدة في المراقبـة المسـتمرة والتعـرف المبكـر علـى الحـالات الشـاذة في خطـوط الأنابيـب أمـر ضـروري لضمـان التشـغيل الآمـن الفاعـل لهـذه البنـى التحتيـة الضخمـة.

### التخزيـــــن

موضـوع التخزيـن مـن أكثـر الأمـور حساسـيةً لمواكبـة الطلـب الدولـي والمحلـي ومنـع نقـص التوريـدات والتناقـض في العـرض، إضافـة إلـى ضمـان سـلامة جميـع العمـال. تُخـزن عـادةً الغـازات الطبيعيـة في مسـتودعات جوفيـة مثـل الخزانـات المسـتنفدة، في حـين يخـزن النفـط الخـام والمشـتقات النهائيـة في مسـتودعات فـوق الأرض.

## النقـــــل

مرحلة مكملة للصناعة، يبدأ النقل من لحظة استخراج المخزون من باطن الأرض وإيصاله إلى منشآت المعالجة والتكرير، وينتهي بنقل المشتقات النهائية إلى المستهلكين النهائيين.

- تملك أرامكو السعودية 50 مليون كيلومتر من خطوط النقل البري.
- تملك أرامكو السعودية 55 معملا لفصل الزيت عن الغاز.
- تشغل أرامكو السعودية 40 رصيفا بحريا للشحن و200 ناقلة نفط شهريا.

بينما يُنقل الغاز الطبيعي عبر خطوط الأنابيب فإن النفط الخام غير المكرر عبر الناقلات وخطوط الأنابيب، في حين تُنقل المنتجات البترولية النهائية بعد المعالجة والتكرير إلى الأسواق عبر الشاحنات والناقلات البحرية وعربات السكك الحديدية وأيضا خطوط الأنابيب.

## مرحلة المصـــب Downstream

مرحلة المصب هي المرحلة الثالثة والنهائية من عملية إنتاج النفط والغاز وهي المرحلة التي يصل فيها المنتج إلى المستهلك النهائي وتشمل: تكرير وتوزيع منتجات النفط والغاز.. وقبل ذلك، تمر العملية عبر المصافي ومصانع البتروكيماويات ومحطات الوقود بالتجزئة لتحويل النفط الخام إلى منتجات مشتقاته مثل: الغازولين، والديزل ووقود الطائرات، وزيت التدفئة، والمنتجات البتروكيماوية.

في هذه المرحلة غالبا ما تكون العمليات معقدة وتستخدم تقنيات عالية الخطورة تتضمن التسخين والتقطير وخزانات الضغط لتحقيق المنتج النهائي.

بالإضافة إلى الحاجة إلى فنيين من القوى العاملة ذوي المهارات العالية، تتطلب هذه العملية أيضًا أدوات مراقبة الحالة المثالية للتشغيل المستمر وتجنب الحوادث.

## التكرير والمعالجة

تقوم هذه المرحلة على تكرير النفط الخام ومعالجة الغاز الطبيعي وإزالة كافة السوائل والغازات غير الهيدروكربونية منهم وتحويلهم إلى منتجات بترولية تُستخدم في العديد من الأغراض، مثل التدفئة وتزويد المركبات بالوقود وصناعة المواد البلاستيكية والبتروكيماوية. تتضمن عملية تكرير النفط عددًا من العمليات المختلفة وفقًا للمنتج النهائي المطلوب، إذ تحتوي مصافي النفط على وحدات الفصل والتقطير والتكسير وإعادة التشكيل وغيرها، في حين تحتوي محطات معالجة الغاز على وحدات الفصل والتحلية والتقطير والتجفيف والتبريد والضواغط وغيرها.

- القدرة التكريرية لأرامكو السعودية لعام 2022م وصلت لـ 7,1 مليون برميل.
- مكاسب قطاع المصب لأرامكو السعودية لعام 2022م وصلت لـ 79 مليار ريال تقريبا.
- إنتاج أرامكو السعودية للكيماويات لعام 2022م وصل لـ 56 مليون طن.

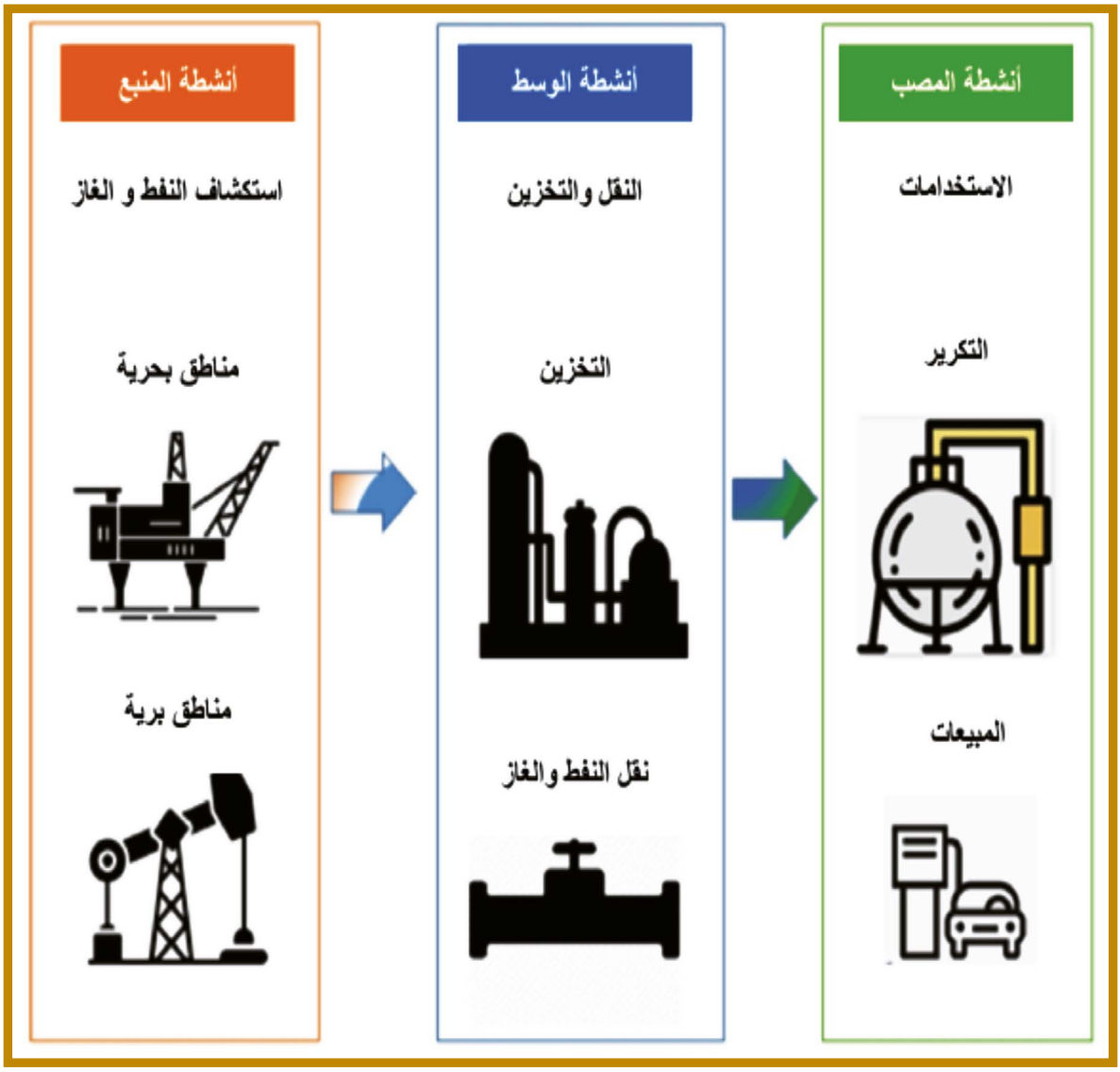
## التوزيع

التوزيع هو الخطوة الأخيرة في إنتاج النفط والغاز، حيث تُنقل المشتقات النهائية وتوزع على المستهلكين النهائيين، بما فيهم تجار التجزئة والجملة والشركات التجارية والهيئات الحكومية والمستهلكين الصناعيين ومزودي الطاقة وغيرهم.

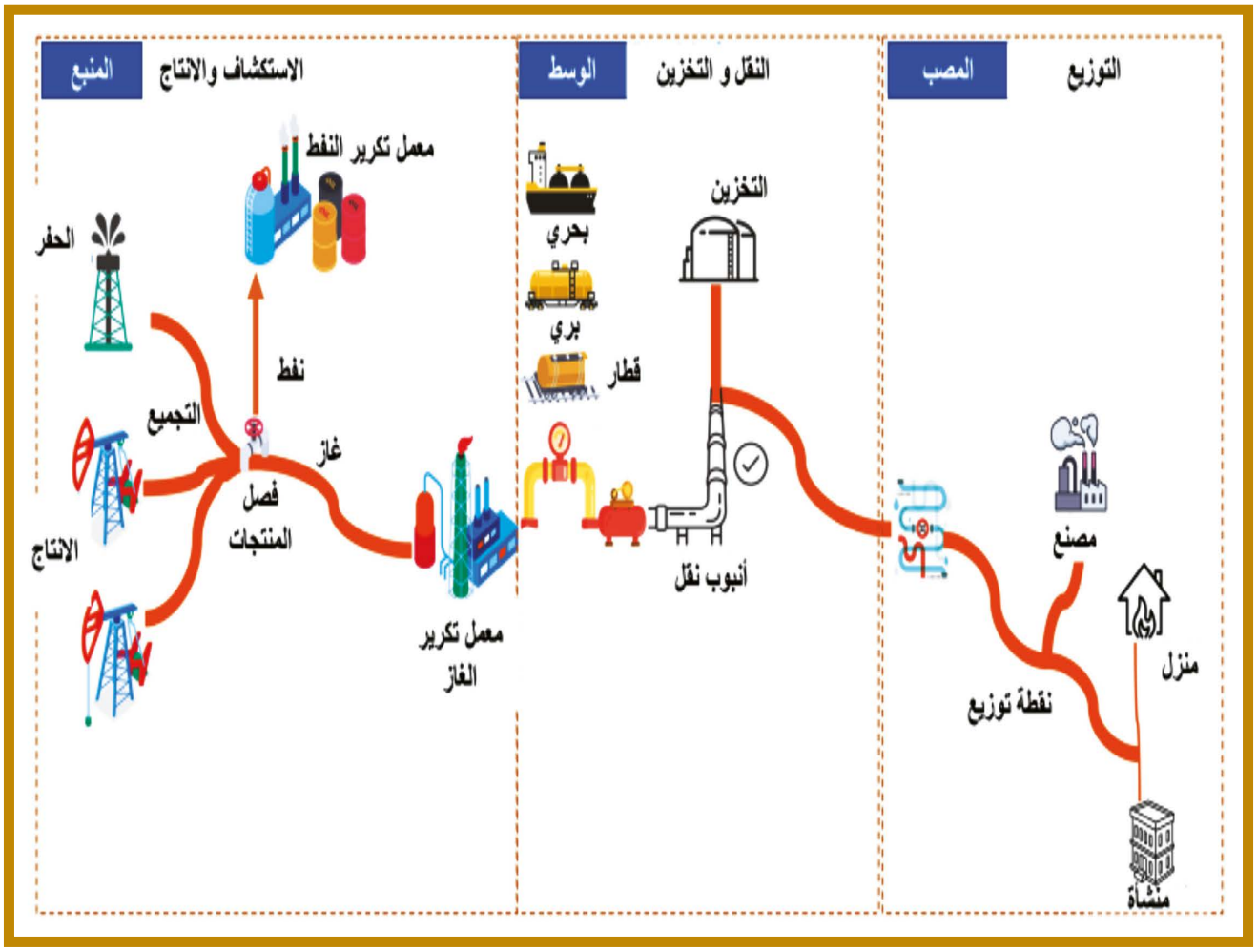
- عدد المحطات التابعة لأرامكو السعودية للتوزيع حول العالم وصلت لـ 17000 محطة.

## أوجه الشبه والاختلاف بين مراحل قطاعات صناعة النفط والغاز

| الأنشطة | | العمليات الرئيسية | الأصول | التحديات |
|---|---|---|---|---|
| Upstream المنبع | يشير مصطلح المنبع إلى مرحلة الاستكشاف والإنتاج في صناعة النفط والغاز. ويشمل تحديد المواقع والمسح والحفر واستخراج النفط الخام والغاز الطبيعي من الخزانات الجوفية. وهذا يشمل كلا من الأنشطة البرية والبحرية. | الاستكشاف، وتحليل الخزان، والحفر، واستكمال الآبار، والإنتاج. | تشمل الأصول الأولية حقول النفط والغاز (حقوق الأراضي والمعادن)، ومنصات الحفر، ومنصات الإنتاج، والآبار | يواجه قطاع التنقيب والتنقيب تحديات تتعلق بالشكوك الجيولوجية، ومخاطر الحفر، والامتثال التنظيمي، وتقلب أسعار النفط والغاز. |
| Midstream منتصف الطريق | تتضمن الأنشطة المتوسطة نقل وتخزين وتسويق النفط والغاز بالجملة. إنه يسد الفجوة بين قطاعي المنبع والمصب | النقل عبر خطوط الأنابيب أو السكك الحديدية أو الشاحنات أو السفن. التخزين في الصهاريج أو غيرها من المرافق؛ والتسويق للتوزيع بالجملة. | تشمل الأصول المتوسطة خطوط الأنابيب، وصهاريج التخزين، والمحطات، والبنية التحتية للنقل | ضمان الحركة الآمنة والفعالة لكميات كبيرة من النفط والغاز، والامتثال التنظيمي، وقيود سلسلة التوريد، وإدارة الخدمات اللوجستية. على سبيل المثال، تشكل زيادات الإنتاج في حوض بيرميان تحديًا فيما يتعلق بقدرة البنية التحتية الحالية لخطوط الأنابيب على استيعابها. وفي بعض الأحيان، لا تكون القدرة الاستيعابية كافية لتوصيل النفط والغاز إلى وجهته في الوقت المناسب |
| Downstream المصب | المرحلة النهائية هي مرحلة التكرير والمعالجة، حيث يتم تحويل النفط الخام إلى منتجات مكررة ومواد كيميائية. ويشمل أيضًا توزيع وبيع هذه المنتجات للمستهلكين | التكرير وتصنيع البتروكيماويات وتوزيع وبيع المنتجات المكررة بالتجزئة | تشمل الأصول النهائية المصافي ومصانع البتروكيماويات وشبكات التوزيع ومنافذ البيع بالتجزئة (محطات الوقود). | الامتثال التنظيمي، وتحسين عمليات التكرير، وإدارة سلاسل التوريد، والاستجابة للتغيرات في طلب المستهلكين في جميع أنحاء العالم |




تنظيم سلاسل التوريد في النفط والغاز من خلال مفاهيم المنبع والوسط المصب




مراحل انتقال سلاسل التوريد الثلاثة من المنبع (الاستكشاف والانتاج) إلى المصب (التوزيع) عبر الوسط (النقل والتخزين).

موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

# المراجـــــع

## المراجـــع العربية

صندوق التنمية الصناعية السعودي، سلسلة قيمة الألومنيوم في المملكة. 2022م.

مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة، (1431هـ)، بناء قطاع الطاقة المتجددة في المملكة العربية السودية.

مركز الخليج للأبحاث، (2022)، صناعة الطاقة المتجددة في المملكة العربية السعودية.

ملتقى أسبار 2023م، تقرير رقم 105.

موليغان، كيان (2023م)، إمكانات الطاقة المتجددة لتوفير فرص عمل في المملكة العربية السعودية: تحليل سلسلة القيمة، مركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية ( كابسارك).

هيئة المساحة الجيولوجية، 1435هـ، الأحجار الكريمة: أنواعها وخصائصها.

## المراجـع الأجنبية

**Abzalov M Z, (2007),** Granitoid hosted Zarmitan gold deposit, Tian Shan belt, Uzbekistan. Econ Geol 102(3):519–532.

**Abzalov M Z, (2010),** Optimisation of ISL resource models by incorporating algorithms for quantification risks: geostatistical approach. In: Technical meeting on in situ leach (ISL) uranium mining, InternationalAtomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria, 7–10 June, 2010.

**Abzalov M Z, Menzel B, Wlasenko M, Phillips J, (2010),** Optimisation of the grade controls procedures at the Yandi iron-ore mine, Western Australia: geostatistical approach. Appl Earth Sci 119 (3):132–142.

**Abzalov M Z, Drobov SR, Gorbatenko O, Vershkov AF, Bertoli O, Renard D, Beucher H, (2014),** Resource estimation of in-situ leach uranium projects. Appl Earth Sci 123(2):71–85.

**Abzalov, Marat, (2016),** Applied Mining Geology, Springer International Publishing, Switzerland.

**Al-Attas, Abdullah M., (2002),** The role of the non-oil minerals sector in the economic growth of Saudi Arabia. PhD thesis, University of Leeds.

**Almulhim, T and Al Yousif, M. (2022).** An Analysis of Renewable Energy Investments in Saudi Arabia: A Hybrid Framework Based on Leontief and Fuzzy Group Decision Support Models, Saudi Central Bank**.**

**Al-Shabanah, Salah, (2024),** Saudi Arabia's Mining Sector: A Robust Pillar of Vision 2030, https://www.linkedin.com/pulse/saudi-arabias-mining-sector-robust-pillar-vision-2030-salah-yfldf/

**Angelov, P.P., Soares, E.A., Jiang, R., Arnold, N.I., & Atkinson, P.M. (2021).** Explainable artificial intelligence: an analytical review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining andKnowledge Discovery, 11(5), e1424.https://doi.org/10.1002/widm.1424.

**Annels, AE, (1991),** Mineral deposit evaluation, a practical approach. Chapman and Hall, London, p 436.

**Annual Report for the Fiscal Year, (2010),** Saudi Industrial Development Fund.

**Australasian Legal Information Institute Tasmanian Consolidated Acts. (1995).** Workplace Health and Safety Act. www.austlii.edu.au/au/legis/tas/consol_act/whasa1995250/. Accessed September 2009.

**Australian Resources & Investment. (2021).** Ethical considerations of artificial intelligence in mining. https://www.australianresourcesandinvestmen t.com.au/2021/06/07/ethical-considerationsof-artificial-intelligence-in-mining/

**Australian Transport Safety Bureau. (2003).** Articulated Truck Fatalities. Monograph 15.www.infrastructure.gov.au/ roads/safety/publications/2003/Truck_Crash_5.aspx. Accessed May 2009.

**Bartos, P.J. (2002),** SX-EW copper and the technology cycle, Resources Policy.

**Bartos, P.J. (2007),** Is mining a high-tech industry? Investigations into innovation and productivity advance, Resources Policy.

**Batterham, R. (2006),** Sustainability—the next chapter, Chemical Engineering Science.

**Belkin, A. (2015).** "Self-Assembled Wiggling Nano-Structures and the Principle of Maximum Entropy Production". Sci. Rep. 5: 8323. Bibcode:2015NatSR...5E8323B. doi:10.1038/srep08323. PMC 4321171.

**Bern, Gianna, (2011),** Investing in energy, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

**Bicycle calculator – speed, weight, wattage etc. (2009).**"Bike Calculator". Archived from the original on 2009-05-13.

**Bingham, Evelyn L. Jessup, (2011),** SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

**Bobrowsky, Matt. (2024),** "SCIENCE 101: Q: What Is Energy?". JSTOR. Science and Children. pp. 61–65. doi:10.1080/19434812.2021.12291716. ISSN 0036-8148.

**Böhmer, M., & Kucera, M. (2013),** Prospecting and Exploration of Mineral Deposits (ISSN) (2nd ed.). Elsevier Science.

**Boosting Circularity Across Saudi Arabia is an Economist Intelligence Unit (EIU) report produced for PepsiCo Middle East 2021.**

**Braithwaite, J., and Grabosky, P. (1985).** Occupational Health and Safety Enforcement in Australia. Report to the National Occupational Health and Safety Commission. Canberra, Australia: Australian Institute of Criminology.

**British Medical Association. (1987).** Living with Risk. Chichester Sussex, UK: John Wiley and Sons.

**Burton, Edward, (2016),** Business and Entrepreneurship in Saudi Arabia: Opportunities for Partnering and Investing in Emerging Businesses, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

**Bureau of Meteorology. (2009).** Warm season storms. www.bom.gov.au/weather/wa/sevwx/perth/storms_warm.shtml. Accessed May 2009.

**Carlsson, D. (2005),** Supply chain management in forestry-case studies at Södra Cell AB, Eur J Oper Res.

**Cazes, S. (2021, December).** The impact of artificial intelligence on the labor market: What do we know so far?: OECD.

**Charles Kittel, Walter D Knight, Malvin A Ruderman, (2006),** Berkeley Physics Course Volume 1. The Laws of Thermodynamics Archived at the Wayback Machine including careful definitions of energy, free energy, et cetera.

**CHRISGAS, (2010),** Clean Hydrogen-rich Synthesis gas, Publishable Final Activity Report.

**Collier, P., (2007).** The Bottom Billion: Why the Poorest Countries are Failing and What Can Be Done About It. Oxford University Press, Oxford.

**Conca, J. (2018, September 26).** Blood Batteries - Cobalt And The Congo. Forbes. https://www.forbes.com/sites/jamesconca/201 . 8/09/26/blood-batteries-cobalt-and-thecongo/

# المراجـــع


**Corbeil, Jean-Claude & Ariane Archambault, (2009),** The Visual Dictionary of Science & Energy, QA International, Montreal.

**Corrigan, Caitlin and Paloma Laye, (2022),** The Use of AI in the Mining Industry – Insights and Ethical Considerations, Institute for Ethics in Artificial Intelligence, Technical University of Munich, Munich.

**Cottrell, Sir Alan, (1995),** An Introduction to Metallurgy, 2ed, The Institute of Materials, London.

**Crowson, Phillip C.F., (2011),** SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

**Curley, Robert, edited, (2012),** Renewable and alternative energy, 1st ed., Encyclopedia Britannica, Inc. Britannica, Rosen Educational Services, LLC. https://www.oecd.org/publications/the-impactof-artificial-intelligence-on-the-labour-market-7c895724-en.htm

**Darling, Peter, (2011),** SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

**Dyson, N. (2019, September 5).** BHP to double autonomous trucks at Jimblebar. Mining Magazine. https://www.miningmagazine.com/innovation/news/1331400/bhp-to-double-autonomoustrucks-at-jimblebar

**Earney, Fillmore C.F., (2002),** Marine Mineral Resources, Routledge, London and New York.

**Eckelman, M. (2010),** Facility-level energy and greenhouse gas life-cycle assessment of the global nickel industry, Resources, Conservation and Recycling.

**Egging R.G. (2006),** Examining market power in the European natural gas market, Energy Policy.

**Elliot, Dave (2014).** "Flights of fancy: airborne wind turbines". Institute of Physics, Environmental Research Web.

**E. Noether's Discovery of the Deep Connection Between Symmetries and Conservation Laws". (2011),** Physics.ucla.edu. 1918-07-16.

**Evans, Robin and Deanna Kemp, (2011),** SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

**Feynman, Richard (1964).** The Feynman Lectures on Physics; Volume 1. US: Addison Wesley. ISBN 978-0-201-02115-8. Archived from the original on 2022-07-30. Retrieved 2022-05-04.

**Filippou, Dimitrios & Michael G. King, (2011),** R&D prospects in the mining and metals industry, Resources Policy, Volume 36, Issue 3.

**Floridi, L., & Cowls, J. (2019).** A Unified Framework of Five Principles for AI in Society. Harvard Data Science Review, 1(1). https://doi.org/10.1162/99608f92.8cd550d1

**Fontes, C., Hohma, E., Corrigan, C.C. & Lütge, C. (2022).** AI-powered public surveillance systems: why we (might) need them and how we want them. Technology and Society, 71. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102137

**Fuerstenau, Maurice C. and Kenneth N. Han, (2011),** SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

**Ge, S., Wang, F.-Y., Yang, J., Ding, Z., Wang, X., Li, Y., Gielen, D. (2003),** CO2 removal in the iron and steel industry, Energy Conversion and Management.

**Goldspot Discoveries. (n.d.).** Goldspot discoveries helps monarch mining find new gold-rich zones at the BEAUFOR Gold deposit using artificial intelligence. GoldSpot Discoveries Corp. https://goldspot.ca/news/goldspot-discoverieshelps-monarch-mining-find-new-gold-richzones-at-the-beaufor-gold-deposit-usingartificial-intelligence/

**Granitzio, F., & S. Naitza, G.Oggiano, F. Secchi, (2015),** The Jibal Qutman deposit: first notes on a new gold discovery in the Arabian Shield, Firenze.

**Goovaerts P., (1997),** Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, New York.

**Hammond, Joseph, (2023),** Saudi Arabia Looks To Mining As Way To Diversify Its Economy, https://www.forbes.com/sites/zengernews/2023/01/03/saudi-arabia-looks-to-mining-as-way-to-diversify-its-economy/?sh=5ff2bc4a5eaa

**Harper, Douglas, (2007),** "Energy". Online Etymology Dictionary. Archived from the original on October 11, 2007.

# المراجـــع


**He, M., Zhang, Z., Ren, J., Huan, J., Li, G., Chen, Y., & Li, N. (2019).** Deep convolutional neural network for fast determination of the rock strength parameters using drilling data.

**Hilson G. (2006),** Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future?, Journal of Cleaner Production.

**Hitzman, M.W. (2002),** R&D in a "declining" industry (mining): support for the development of revolutionary technologies?, Technology in Society.

**Hopkins, A. (1999).** A culture of denial: Sociological similarities Between the Moura and Gretley mine disasters.

**Humphreys, D. (2001),** Sustainable development: can the mining industry afford it?, Resources Policy.

**Humphreys, D. (2010),** The great metals boom: a retrospective, Resources Policy.

**Hyder, Z., Siau, K., & Nah, F. (2019).** Artificial Intelligence, Machine Learning, and Autonomous Technologies in the Mining Industry. Journal of Database Management, 30(2), 67–79. https://doi.org/10.4018/jdm.2019040104

**IAEA Nuclear Energy Series, (2014),** Managing Environmental Impact Assessment for Construction and Operation in New Nuclear Power Programs, Vienna.

**Idrees, O. (2001),** Similar to Saudi Investment, Ma'aden Establishing a New Mining Fund. Al Riyadh Newspaper,No. 11973,11 /April, p. 13.

**IEA. (2021).** The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, International Energy Agency, Paris. https://www.iea.org/reports/therole-of-critical-minerals-in-clean-energytransitions

**International Council on Clean Transportation: Hydrogen for Heating? (2021),** Decarbonization options for household in the European Union in 2050.

**International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, (2019),** 123, 104084. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104084

**Ito, Akihito; Oikawa, Takehisa (2004).** "Global Mapping of Terrestrial Primary Productivity and Light-Use Efficiency with a Process-Based Model. Archived 2006-10-02 at the Wayback Machine" in Shiyomi, M. et al. (Eds.) Global Environmental Change in the Ocean and on Land.

**Jaffe, Robert L.; Taylor, Washington, (2018).** The Physics of Energy. Cambridge University Press. p. 611. ISBN 9781107016651. Archived from the original on 2022-07-30. Retrieved 2022-05-22.

**Jeswiet, J., & Szekeres, A. (2016).** Energy Consumption in Mining Comminution. Procedia CIRP, 48, 140–145. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250

**Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, (2019),** 13(6), 1246–1255. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.09.005

**Joy, J., (1999a).** An introduction to engineering risk management. Lecture presented at Minerals Industry Safety and Health Centre, Queensland, Australia. www.mishc.uq.edu.au/ugmodules/mod1.1ERMintro.pdf. Accessed May 2009.

**Joy, J., (1999b).** A systems-based analysis of 25 system safety accident investigations (SSAIs) of major mining events. In Proceedings of the NSW Mining and Quarrying Industry OHS Conference, Terrigal, New South Wales, Australia.

**Jung, D., & Choi, Y. (2021).** Systematic review of machine learning applications in mining: Exploration, exploitation, and reclamation.

**Kaack, L., Donti, P.L., Strubell, E., Rolnick, D. (2020).** Artificial Intelligence and Climate Change: Opportunities, considerations, andInstitute for Ethics in Artificial Intelligence Technical University of Munich https://ieai.sot.tum.de/ IEAI Research Brief 8 policy levers to align AI with climate change goals. E-Paper. Heinrich-Böll Stiftung.

**Kappal, S. (2017, October 13).** The Biggest Challenges in Implementing AI. dzone.com. https://dzone.com/articles/the-biggestchallenges-in-implementing-ai

**Khaligh, Alireza & Omer C. Onar, (2010),** Energy Harvesting, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.

**King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy** (2023). Building the Renewable Energy Sector in Saudi Arabia

**Klotz, R. Rosenberg, (2008),** Chemical Thermodynamics – Basic Concepts and Methods, 7th ed., Wiley Kittel and Kroemer (1980). Thermal Physics. New York: W.H. Freeman. ISBN 978-0-7167-1088-2.

**Krige D, (1951),** A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. J Chem Metall Min Soc S Afr 52:119–139

**Larsson, S. & Heintz, F. (2020).** Transparency in Artificial Intelligence. Internet Policy Review, 9 (2). https://doi.org/10.14763/2020.2.1469.

**Laurence, D.C. (2002).** Investigating the influence of the regulatory environment on the safety performance of the mining work force. Unpublished Ph.D. thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia.

**Laurence, D.C. (2008).** Challenges and opportunities for sustainable mining practices in the Asia-Pacific region. Lecture presented at School of Mining Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia. Unpublished. www.mining.unsw.edu.au/lectures/KFL/UNSW _KennethFinlay_pp_2008.pdf. Accessed May 2009.

**Laurence, David, (2011),** SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

**Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K. et al. (2020).** The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. Nature Communications 11, 4823. https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9

**Lee-Moreno, José L., (2011),** SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

**Lee, Sunggyu, & James G. Speight, Sudarshan K. Lewis, John S., (2015),** Asteroid Mining 101: Wealth for the New Space Economy, Deep Space Industries Inc.

**Lofts, G; O'Keeffe D; et al. (2004).** "11 – Mechanical Interactions". Jacaranda Physics 1 (2 ed.). Milton, Queensland, Australia: John Wiley & Sons Australia Ltd. p. 286. ISBN 978-0-7016-3777-4.

**Loyalka, (2007),** Handbook of alternative fuel technologies, Taylor & Francis Group, LLC.

**Lsleyen, E., Duzgun, S., & McKell Carter, R. (2021).** Interpretable deep learning for roof fall hazard detection in underground mines.

**Ma'aden, (2022),** Annual Report. https://www.maaden.com.sa/ar, (2024).

**Mackenzie, Wood. (2020, October 29).** The Energy Transition Will Be Built With Metals. Forbes. https://www.forbes.com/sites/woodmackenzie/ 2020/10/29/the-energy-transition-will-be-builtwith-metals

**Maizels, A. (1994),** The Continuing Commodity Crises of Developing Countries. World Development. Vol. 22, No. 11.

**Martyushev, L.M.; Seleznev, V.D. (2006).** "Maximum entropy production principle in physics, chemistry and biology". Physics Reports. 426 (1): 1–45. Bibcode:2006PhR...426....1M. doi:10.1016/j.physrep.2005.12.001.

**Matheron, G., (1963),** Principles of geostatistics. Econ Geol 58(8):1246–1266

**Matheron, G, (1968),** Osnovy prikladnoi geostatistiki (Basics of applied geostatistics). Mir, Moscow.

**MCA (Minerals Council of Australia). (2009).** Safety Performance Report 2006/7. www. minerals.org.au/_data/assets/pdf_file/0020/32384/2006_07_Safety_ Performance_Report_v1.pdf. Accessed May 2009.

**McKee, D. J.(1991),** Automatic flotation control: a review of 20 years of effort, Minerals Engineering.

**Michaelides, Efstathios E. (Stathis), (2012),** Alternative Energy Sources, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

# المراجـــع


**Michalski., B., (1997),** The Mineral Industry of Saudi Arabia. Minerals Yearbook-, International Review, Vol. III. United States Department of Interior, Ruston: Bureau of Mines. Minerals, 11(2), 148. https://doi.org/10.3390/min11020148

**Misner, Thorne, Wheeler, (1973).** Gravitation. San Francisco: W.H. Freeman. ISBN 978-0-7167-0344-0.

**Murphy, P. (2019, April 2).** How AI technology can make mining more productive. IBM. https://www.ibm.com/blogs/client-voices/aitechnology-mining-productive/

**Nelson, Michael G., (2011),** SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

**Nertney, R.J. (1987).** Process Operational Readiness and Operational Readiness Follow-On. DOE 76-45/39, SSDC-39. Washington, DC: U.S. Department of Energy.

**NSW (New South Wales) Government Legislation. (1983).** Revised 2000. Occupational Health and Safety Act. www.legislation.nsw.gov.au/fullhtml/inforce/act+40+2000+FIRST+0+N. Accessed September 2009.

**Resources. (1998–2002).** Minerals and Petroleum: Major Investigations. www.dpi.nsw.gov.au/minerals/safety/major-investigations. Accessed May 2009.

**Nuclear Energy** | Definition, Formula & Examples | nuclear-power.com". Nuclear Power. Archived from the original on 2022-07-06. Retrieved 2022-07-06.

**ÓhÉigeartaigh, S.S., Whittlestone, J., Liu, Y., Zeng, Y. & Liu, Z. (2020),** Overcoming Barriers to Cross-cultural Cooperation in AI Ethics and Governance. Philos. Technol. 33, 571–593. https://doi.org/10.1007/s13347-020-00402-x

**Onsager, L. (1931).** "Reciprocal relations in irreversible processes". Phys. Rev. 37 (4): 405–26. Bibcode:1931PhRv.37.405O. doi:10.1103/PhysRev.37.405.

**Ontario Ministry of Labor. (2000).** The Internal Responsibility System in Ontario Mines. www.gov.on.ca/LAB/ann/00-75 be.htm. Accessed March 2001.

**Pereira, N. (1999).** Report into and Management of Roof Fall Fatalities in NSW Coal Mines. New South Wales, Australia: Department of Mineral Resources. Unpublished report.

**Pitzer, C.J., ed. (2000).** A Study of the Risky Positioning Behavior of Operators of Remote Control Mining Equipment. Report MGD-5004. New South Wales, Australia: Department of Mineral Resources.

**Plimer, Ian R., (2013),** Exploring for Gold and Copper in Saudi Arabia, Global Mining Finance conferences.

**Presley, John R., (1984),** A GUIDE TO THE SAUDI ARABIAN ECONOMY, THE MACMILLAN PRESS LTD, New York.

**Raji, I.D., Gebru, T., Mitchell, M., Buolamwini, J., Lee, J., & Denton, E. (2020).** Saving Face: Investigating the Ethical Concerns of Facial Recognition Auditing .Proceedings of the 3rd AAAI/ACM Conference on Artificial Intelligence, Ethics, and Society (AIES), ACM (2020).

**Ramady, M.A., (2010),** The Saudi Arabian Economy, DOI 10.1007/978-1-4419-5987-4_15, 479, Springer Science Business Media, LLC.

**Reason, J., (1990).** Human Error. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

**Reason, J. (1997).** Managing the Risks of Organizational Accidents. Hampshire, UK: Ashgate Publishing.

**Reports issued by the Saudi Geological Survey between the years (2000-2022).**

**Retrieved on May-29-09". (2010).** Uic.edu. Archived from the original on 2010-06-04.

**Robens, A. (1972).** Safety and Health at Work: Report of the Committee 1970–72. Cmnd 5034. London: Her Magesty's Stationery Office.

**Roche, C., Wall, P.J. & Lewis, D. (2022).** Ethics and diversity in artificial intelligence policies, strategies and initiatives. AI Ethics. https://doi.org/10.1007/s43681-022-00218-9

**Roe, A.R. (2016, November 17).** Like it or not, poor countries are increasingly dependent on mining and oil & gas. UNUWIDER. https://www.wider.unu.edu/publicatio n/ it-or-not-poor-countries-are-increasinglydependent-mining-and-oil-gas

# المراجـــع


**Roos A. et al. (2001),** Production strategies in the Swedish softwood sawmilling industry, For Policy Econ.

**Roylett, B., Russell, I., Raman, R., and Blyth, D. (1991).** Analysis of Accidents from Strata Movements in Pillar Extraction in New South Wales Coal Mines. Internal report. New South Wales, Australia: Department of Mineral Resources.

**Sachs, J.D., Warner, A.M., (1995).** Natural resource abundance and economic growth. Natl. Bur. Econ. Res. Work. Pap. Ser. Working Paper 5398.

**Sachs, J.D., Warner, A.M., (2001).** The curse of natural resources. Eur. Econ. Rev. 45, 827–838.

**Salai, Martin, X., Subramanian, A., (2003).** Addressing the Natural Resource Curse: An Illustration from Nigeria. NBER Work. Pap. 9804.

**Saudi Railways Organization, (1996),** Techno-economic Feasibility Study; National Rail Plan. Phasell Draft Final Report. London: Parsons Brinckerhoff (Europe) Ltd.

**Saudi Arabia Renewable Energy Industry Outlook.** Gulf Research Center, 2022

**Schwarz H.G., (2003),** Modelling investment and implementation of technological progress in metal industries Theory and application to the German primary aluminium industry. Resource Policy.

**Schwarz H.G., (2006),** Economic materials-product chain models: current status, further development and an illustrative example. Ecol Econ.

**Sengupta, M., (2021).** Environmental impacts of mining: Monitoring, restoration and control. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003164012

**Singer, Marcos & Patricio Donoso, (2008),** Upstream or downstream in the value chain?, Journal of Business Research, Volume 61, Issue 6.

**Singh, S. & L.B. Sukla, S.K. Goyal, (2020),** Mine waste & circular economy, Materials Today: Proceedings.

**Smith, Crosbie, (1998).** The Science of Energy – a Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain. The University of Chicago Press. ISBN 978-0-226-76420-7.

**Spencer, C. H. (1999),** Industrial Minerals of Saudi Arabia and their Uses in New Materials. Internal Report. Jeddah: DMMR.

**Stoelhorst J.W. et al., (2004),** On explaining performance differentials: marketing and the managerial theory of the firm, J Bus Res.

**Stonge, Gracia, (2011),** Energy development, First Edition, The English Press, Delhi.

**Summary Statements of Accidents and Incident Reports. (Accessed May 2009).** www.dme.qld.gov.au/mines/ssarchive.cfm.

**Sustainable Development Solutions Network, World Economic Forum.** Institute for Ethics in Artificial Intelligence Technical University of Munich https://ieai.sot.tum.de/ IEAI Research Brief 9 https://www.undp.org/publications/mappingmining-sdgs-atlas.

**Taher, N., B. Hajjar, (2014),** Energy and Environment in Saudi Arabia: Concerns and Opportunities, DOI 10.1007/978-3-319-02982-5_6, Springer International Publishing Switzerland.

**Teng, S., Liu, Z., Ai, Y., & Chen, L. (2022).** Making standards for smart mining operations: Intelligent Vehicles for Autonomous Mining Transportation. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 7(3), 413–416. https://doi.org/10.1109/tiv.2022.3197820

**Time Invariance". (2010),** Ptolemy.eecs.berkeley.edu. Archived from the original on 2011-07-17.

**The Hamiltonian, (February 2007).** MIT Open Courseware website 18.013A Chapter 16.3.

**Toivonen R. (2002),** Integration of roundwood markets in Austria, Finland and Sweden, For Policy Econ.

**TroncosoJ.J. et al. (2005),** Forestry production and logistics planning: an analysis using mixed-integer programming, For Policy Econ.

**Tucker, A. (2020).** The Citizen Question: Making Identities Visible Via Facial Recognition Software at the Border. IEEE Technology and Society Magazine, 39 (4), 52-59. https://doi.org/10.1109/MTS.2020.3031847

**U.K. Health and Safety Executive. (1974).** Health and Safety at Work Act. www.hse.gov.uk/legislation/hswa.htm. Accessed September 2009.

**U.K. Office of Public Sector Information. (1954).** Mines and Quarries Act. www.opsi.gov.uk/RevisedStatutes/Acts/ ukpga/1954/cukpga_19540070_en_1. Accessed May 2009.

**United Nations Environmental Program (UNEP). (2019).** Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing Extractive Industries Towards Sustainable Development – Summary for Policymakers and Business Leaders.

**United Nations Environment Programme. (2022, September 20).** https://www.unep.org/resources/report/mineral-resource-governance-21st-century United Nations Environmental Program (UNEP). Can the Democratic Republic of the Congo's mineral resources provide a pathway to peace? https://www.unep.org/news-andstories/story/can-democratic-republic-congosmineral-resources-provide-pathway-peace

**United Nations. (2021, May).** Transforming Extractive Industries for Sustainable Development. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/sg_policy_brief_extractives.pdf

**UNSDSN. (2016).** Mapping Mining to the Sustainable Development Goals: An Atlas. Columbia Center on Sustainable Investment, United Nations Development Programme, UN.

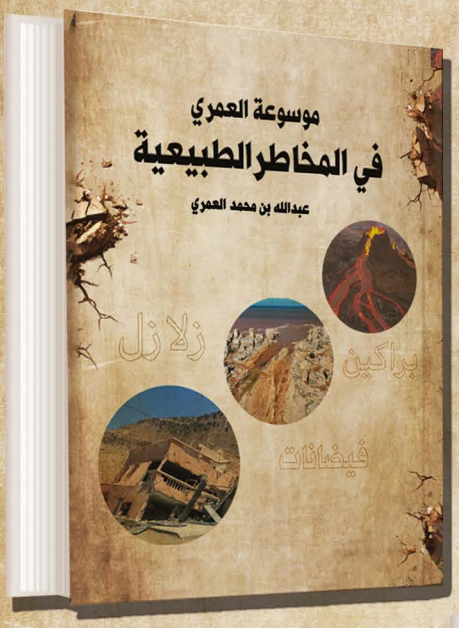
**Victor, D.G. (2019).** How Artificial Intelligence will affect the Future of Energy and Climate. A BluePrint for the Future of AI. Brookings Institute, 10 January 2019.

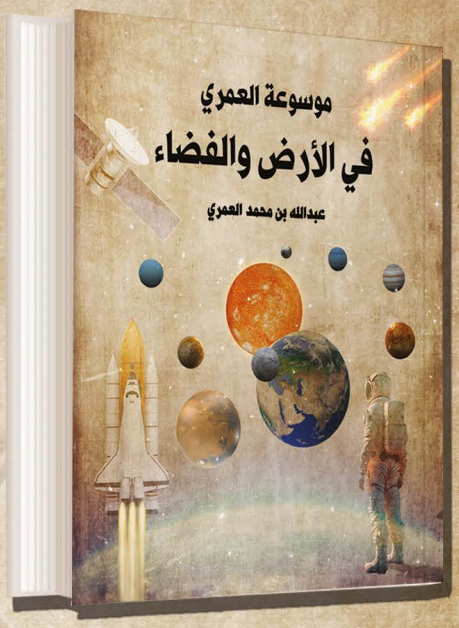
**Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., Felländer, A., Langhans, S.D., Tegmark, M. & Nerini, F. F. (2020).** The role of Gas Monitoring Sensor Networks. Lecture Notes in 0Computer Science, 90–105. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77690-1_6

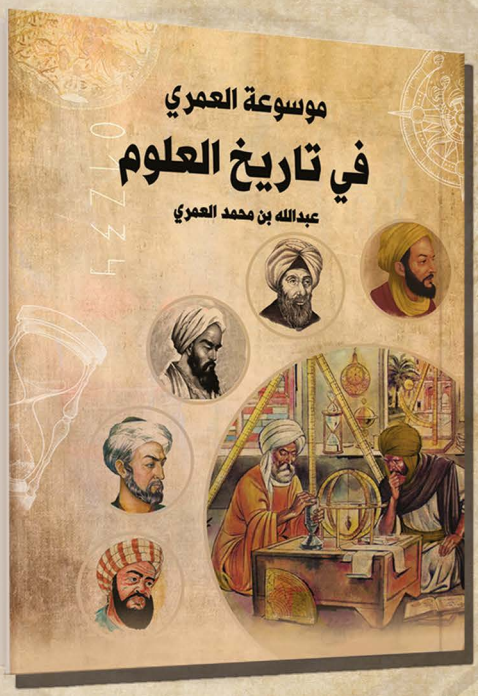
**World Investment Report, (2023),** Investing in sustainable energy for all, (UNCTAD/WIR/2023) - 05 Jul 2023. https://aenert.com/countries/asia/energy-industry-in-saudi-arabia/# https://www.fdmgroup.com/blog/ai-in-energy-sector/

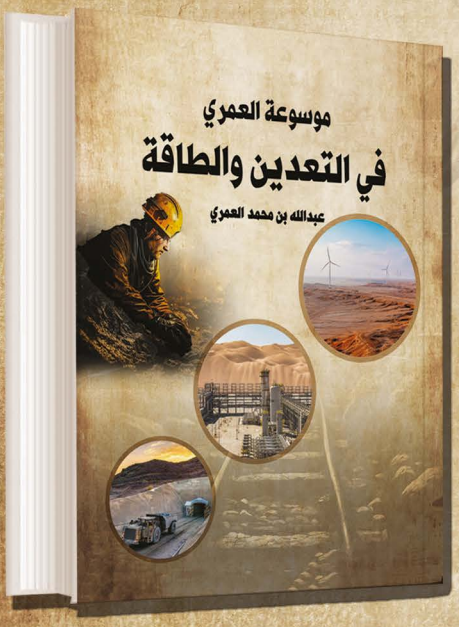
**Zhao, J., Gao, J., Zhao, F., & Liu, Y. (2017).** A Search-and-Rescue Robot System for Remotely Sensing the Underground Coal Mine Environment. Sensors, 17(10), 2426. https://doi.org/10.3390/s17102426

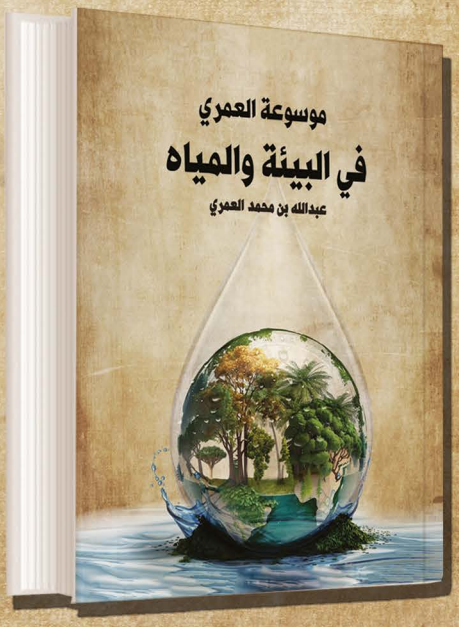
# تم بحمد الله



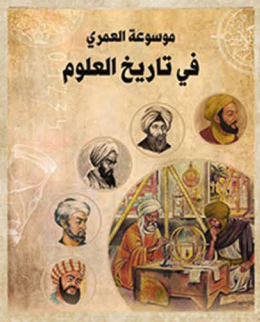



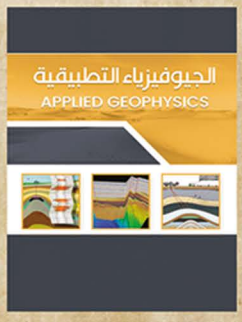

www.alamrigeo.com

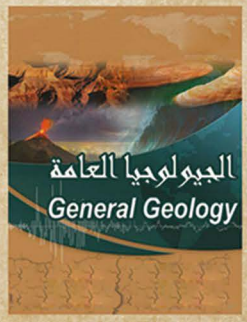
موسوعة العمري في التعدين والطاقة
Alamri's Encyclopedia of Mining & Energy

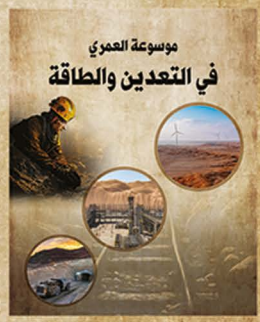
يتمتع الأستاذ الدكتور عبدالله بن محمد العمري بمسيرة علمية حافلة امتدت لأكثر من خمسة وثلاثين عامًا، حيث شغل منصب أستاذ علم الزلازل ورئيس قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء في جامعة الملك سعود بالرياض، ويعمل مشرفاً على مركز الدراسات الزلزالية ورئيساً للجمعية السعودية لعلوم الأرض. يعمل العمري باحثاً رئيساً في 13 مجموعة عمل أمريكية وألمانية ومستشاراً محلياً ودولياً في العديد من الجمعيات والهيئات داخل المملكة العربية السعودية وخارجها. أسس ورأس تحرير أول مجلة عربية للعلوم الجيولوجية تحت إشراف الناشر الألمانيSpringer وتمحورت أبحاثه العلمية حول نمذجة ومحاكاة ميكانيكية الزلازل والحد من مخاطرها، واستكشاف المياه الجوفية العميقة وتحديد مكامن الطاقة الحرارية الأرضية إلى جانب أعماله البحثية، يبذل العمري جهوداً حثيثة على نشر المعرفة، إذ ألف موسوعات وكتبًا تعليمية تخصصية تهدف إلى إثراء المكتبة العربية بمواد تعليمية متفردة، ومن أبرز إنجازاته تأسيس أول موسوعة جيولوجية رقمية للمملكة العربية السعودية في عام 2024، حيث اشتملت على جميع الثروات الاقتصادية والظواهر الجيولوجية فيها. ونشر أكثر من 220 ورقة بحثية وأنجز أكثر من 60 مشروعاً بحثياً و 74 تقريراً علمياً، بالإضافة الى تأليفه موسوعة تعليمية من 30 كتاباً و 5 موسوعات علمية تخصصية و 3 كتب أكاديمية في علوم الأرض .حصل على العديد من الجوائز ودروع التكريم المحلية والعالمية نظير إنجازاته العلمية المتميزة.

## إصدارات المؤلف






www.alamrigeo.com

العبيكان للنشر
Obeikan Publishing

ردمك: 978-603-05-0533-3