

التغيرات المناخية والاحتباس الحراري



عبد الله بن محمد العمري

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - كلية العلوم - جامعة الملك سعود

١٤٤٤ هـ - ٢٠٢٣ م



www.alamrigeo.com





ح عبد الله بن محمد العمري، ١٤٤٣ هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

العمري ، عبدالله بن محمد سعيد

التغيرات المناخية والاحتباس الحراري. / عبدالله بن محمد سعيد

العمري - ط ١ - الرياض، ١٤٤٣ هـ

٢٨ X ٢١,٥ ، ص ١٨٨

ردمك: ١-١٨٠٩-٠٤-٦٠٣-٩٧٨

١- المناخ ٢- الاحتباس الحراري أ. العنوان ب. الموسوعة

١٢٦٣٢ / ١٤٤٣

ديوي ٥٥١,٦

رقم الإيداع ١٢٦٣٢ / ١٤٤٣

ردمك: ١-١٨٠٩-٠٤-٦٠٣-٩٧٨

حقوق طبع الموسوعة محفوظة للمؤلف

مع عدم السماح ببيعها .. ويمكن إعادة طباعتها وتوزيعها مجاناً بدون أي تعديل في الاسم أو المحتوى

تطلب النسخة الورقية المجانية من المؤلف على العنوان التالي:

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود ص.ب 2455 الرياض 11451

الإصدار الإلكتروني من خلال الموقع

www.alamrigeo.com

للاستفسارات والملاحظات الاتصال على:

جوال +966505481215 هاتف +966 11 4676198

البريد الإلكتروني E.mail : alamri.geo@gmail.com



الطبعة الأولى

١٤٤٤ هـ / ٢٠٢٣ م



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ فِي الْأَرْضِ آيَاتٌ لِلْمُوقِنِينَ ﴾

[سورة الذاريات : آية 20]

﴿ And on the Earth are Signs for
Those Whose Faith is Certain ﴾



موسوعة العمري في علوم الأرض





مَهَيِّدُكَ

الحمد والشكر لله الذي ساعدني في إنجاز هذا الجهد المتواضع المرتبط بتأليف الموسوعة العلمية العربية. تهدف الموسوعة العلمية الشاملة في علوم الأرض والبيئة والطاقة إلى تزويد وخدمة الباحثين وطلاب المدارس والجامعات وفئات المجتمع نظراً لمعاناة المهتمين من مشاكل ندرة المراجع العربية في هذا المجال. تشتمل الموسوعة المجانية والتي تعتبر الأضخم عالمياً على 30 كتاب علمي ثقافي موثق ومدعم بالصور والأشكال التوضيحية المبسطة في 6000 صفحة تقريباً تغطي خمسة أجزاء رئيسية:

الجزء الأول مكون من ستة كتب يناقش عمر الأرض وشكلها وحركاتها وتركيبها الداخلي وثرواتها المعدنية والتعدينية والجاذبية الأرضية وعلاقتها بالمد والجزر:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| تقدير عمر الأرض | التركيب الداخلي للأرض |
| شكل الأرض وحركاتها | المعادن والتعدين |
| الجاذبية الأرضية وتطبيقاتها | المد والجزر |

الجزء الثاني من الموسوعة يشتمل على ستة كتب تربط علاقة الأرض بالنظام الشمسي وبالأخص القمر والأغلفة الجوية والمائية والحيوية المحيطة بالأرض. وكذلك دور الزلازل والتفجيرات والبراكين والتسونامي في التأثير على بنية الأرض وكيفية تقليل مخاطرها:

- | | |
|---------------------|------------------------|
| موجات التسونامي | البراكين وسبل مجابقتها |
| الزلازل والتفجيرات | جيولوجية القمر |
| تقييم مخاطر الزلازل | الأغلفة المحيطة بالأرض |





الجزء الثالث يتألف من ستة كتب يربط كل ما يتعلق بالمشاكل والكوارث البيئية والطبيعية وحلولها والتغيرات المناخية وأهمية التشجير ومعالجة الاحتباس الحراري:

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| المشاكل البيئية وحلولها | الانزلاقات والإنهيارات والفيضانات |
| التغيرات المناخية والاحتباس الحراري | الأمطار والسيول والسدود |
| التشجير: التحديات والحلول | التصحروالجفاف |

الجزء الرابع يتكون من ستة كتب يناقش ارتباط علوم الأرض بالعلوم الأخرى نووياً وطبيياً، وكذلك دور الطاقة المستدامة النظيفة اقتصادياً وبيئياً:

- | | |
|-------------------------|---|
| مستقبل الطاقة في عالمنا | الجيوفيزياء النووية |
| الطاقة الحرارية الأرضية | الجيولوجيا الطبية |
| هل إنتهى عصر النفط؟ | دليل كتابة الرسائل الجامعية والنشر العلمي |

أما **الجزء الخامس** يتألف من ستة كتب متخصصة في العلوم الجيولوجية مكونة من 2020 سؤال وجواب لمساعدة طلاب الجامعات والباحثين وتهيئتهم للاختبارات الشاملة والتأهيلية للدراسات العليا ومزاولة المهنة:

321 سؤال وجواب في تطور الأرض	321 سؤال وجواب في تطور الأرض
358 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء والاستشعار عن بُعد وال GIS	358 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء والاستشعار عن بُعد وال GIS
358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية	358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية
380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية	380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية
303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلازلية الهندسية	303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلازلية الهندسية
300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية	300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية

المؤلف





مقدمة

يعد **تغير المناخ Climate Change** إحدى النظريات العلمية القليلة التي تجعلنا نفحص الأساس الكامل للمجتمع الحديث. إنه تحدٍ يجادل فيه السياسيون، ويضع الدول في مواجهة بعضها بعضاً، ويجعلهم يتساءلون عن خيارات نمط الحياة الفردية، وي طرح في النهاية أسئلة حول علاقة البشرية ببقية الكوكب.

يشير أحدث تقرير للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) إلى أن الأدلة على تغير المناخ لا لبس فيها؛ مع وجود أدلة على مدى المائة عام الماضية من ارتفاع درجات الحرارة العالمية بمقدار 0.8 درجة مئوية وارتفاع مستوى سطح البحر بمقدار 22 سم.

اعتماداً على مقدار تحكمنا في انبعاثات غازات الدفيئة المستقبلية (GHG)، يمكن أن يرتفع متوسط درجة حرارة السطح العالمية بين 2.8 درجة مئوية و5.4 درجة مئوية بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يرتفع مستوى سطح البحر العالمي بما يتراوح بين 52 سم و98 سم وستكون هناك تغييرات كبيرة في أنماط الطقس مع المزيد من الظواهر المناخية المتطرفة. هذه ليست نهاية العالم كما تصورها العديد من دعاة حماية البيئة في أواخر الثمانينيات وأوائل التسعينيات، لكنها تعني زيادة هائلة في البؤس لبلايين البشر.





يعد الحد من انبعاثات غازات الدفيئة تحدياً كبيراً لمجتمعنا العالمي. لا ينبغي الاستهانة بهذا لأنه بعد مرور 30 عاماً من المفاوضات بشأن تغير المناخ، لم يكن هناك أي انحراف في انبعاثات غازات الدفيئة عن المسار المعتاد.

أدى فشل مفاوضات المناخ الدولية، وعلى الأخص في **كوبنهاجن** في عام 2009، إلى انتكاسة التخفيضات العالمية ذات المغزى في انبعاثات غازات الدفيئة لمدة عقد على الأقل. لكن يتنامى التوقع والأمل للمفاوضات المستقبلية وهناك بعض **بصيص الأمل**.

بدأت الصين، التي تعد حالياً أكبر مصدر لغازات الاحتباس الحراري **Global Warming** في العالم، مناقشة التحريض على مخطط وطني لتجارة الكربون. في حين أن الولايات المتحدة، التي تسببت في ثلث التلوث الكربوني في الغلاف الجوي قد وضعت مسؤولية تنظيم انبعاثات ثاني أكسيد الكربون تحت إشراف وكالة **حماية البيئة**، مما يضعها على مرمى حجر من الجدل السياسي في واشنطن.

مع هذا الافتقار إلى اتفاق سياسي، هناك حجة اقتصادية قوية لاتخاذ إجراءات. تشير التقديرات إلى أن معالجة تغير **المناخ** حالياً ستكلف ما بين 2 إلى 3% من الناتج المحلي الإجمالي العالمي مقابل أكثر من 20% إذا أجلنا العمل حتى منتصف القرن.

حتى لو لم تكن التكلفة والفوائد كبيرة، فإن الحجة الأخلاقية حالياً لمنع وفاة **عشرات الملايين** من الناس وتجنب زيادة كبيرة في البؤس البشري يجب أن تكون واضحة. إن إيجاد **حل سياسي دولي أمر حتمي**، فبدون اتفاقية ما بعد عام 2015، فإننا نتطلع إلى زيادات **هائلة** في انبعاثات الكربون العالمية وتغير مناخي حاد.





يجب أن يشمل أي اتفاق سياسي البلدان النامية، مع حماية حقها في التنمية، حيث إنه من الواجب الأخلاقي أن يتمكن الناس في أفقر البلدان من الحصول على مستوى مماثل من الرعاية الصحية والتعليم ومتوسط العمر المتوقع مثل أولئك الذين يعيشون في الغرب.

يجب أيضاً تنفيذ سياسات وقوانين تغير المناخ المستتدة إلى المفاوضات الدولية على المستويين الإقليمي والوطني لتوفير مستويات متعددة من الحوكمة لضمان حدوث هذه التخفيضات في الانبعاثات فعلاً.

هناك حاجة إلى طرائق جديدة لإعادة توزيع الثروة، على مستوى العالم وداخل الدول على حد سواء، لانتشال بلايين البشر من براثن الفقر دون حدوث زيادات هائلة في الاستهلاك، ونضوب الموارد، وانبعاثات غازات الدفيئة. هناك حاجة أيضاً إلى الدعم والمال لمساعدة البلدان النامية على التكيف مع التغيرات المناخية التي ستحدث لا محالة.

لذلك، فإن تغير المناخ يتحدى الطريقة التي ننظم بها مجتمعنا. فهو لا يتحدى مفهوم الدولة القومية مقابل المسؤولية العالمية فحسب، بل يتحدى الرؤية قصيرة المدى للمسؤولين السياسيين.

يحتاج تغير المناخ أيضاً إلى أن يُنظر إليه في سياق التحديات الكبرى الأخرى للقرن الحادي والعشرين: الفقر العالمي، والنمو السكاني، والتدهور البيئي، والأمن العالمي. لمواجهة تحديات القرن الحادي والعشرين، يجب علينا تغيير بعض القواعد الأساسية لمجتمعنا، للسماح لنا بتبني نهج أكثر عالمية وطويل الأجل، وفي القيام بذلك، تطوير حل مريح للجميع يستفيد منه الجميع.





أما بخصوص الاحتباس الحراري فهو يعد من أكثر القضايا العلمية إثارة للجدل في القرن الحادي والعشرين، حيث يمثل تحدياً لبنية مجتمعنا العالمي. تكمن المشكلة في أن الاحتباس الحراري ليس مجرد اهتمام علمي، ولكنه يشمل الاقتصاد وعلم الاجتماع والجغرافيا السياسية والسياسة المحلية واختيار الأفراد لنمط الحياة.

ينتج الاحترار العالمي عن الزيادة الهائلة في غازات الدفيئة، مثل ثاني أكسيد الكربون، في الغلاف الجوي، الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري وإزالة الغابات. هناك دليل واضح على أننا قمنا بالفعل برفع تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى أعلى مستوى لها خلال النصف مليون سنة الماضية وربما لفترة أطول.

يعتقد العلماء أن هذا يتسبب في ارتفاع درجة حرارة الأرض بشكل أسرع من أي وقت آخر خلال الألف سنة الماضية على الأقل. أعلن أحدث تقرير صادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)، الذي بلغ 2600 صفحة من المراجعة والتحليل المفصلين للبحوث المنشورة، أن الشكوك العلمية المتعلقة بالاحتباس الحراري قد جرى حلها بشكل أساسي.

يوضح هذا التقرير أن هناك دليلاً واضحاً على ارتفاع درجات الحرارة العالمية بمقدار 0.6 درجة مئوية وارتفاع مستوى سطح البحر بمقدار 20 سم خلال القرن العشرين. كما يتوقع توليف الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ أن ترتفع درجات الحرارة العالمية بما يتراوح بين 1.4 درجة مئوية و5.8 درجة مئوية ويمكن أن يرتفع مستوى سطح البحر بما يتراوح بين 20 سم و88 سم بحلول عام 2100. بالإضافة إلى ذلك، ستصير أنماط الطقس أقل قابلية للتنبؤ بها وسيزداد حدوث الظواهر المناخية المتطرفة، مثل: (العواصف، والفيضانات، والجفاف).





سنعالج في هذا العمل مجموعة من الموضوعات المتعلقة بالتغير المناخي والاحتباس الحراري العالمي. حيث إننا سنقدم الأدلة العلمية على وجودهما الحقيقي، كما أننا سنرد على المشككين فيهما، وفي الختام سنقدم مجموعة من الحلول المقترحة للحد من تأثيرهما محلياً وعالمياً.



تُظهر هذه الصورة إزالة الغابات الاستوائية الشديدة في شيانغ ماي، تايلاند. تساعد إزالة الأشجار، التي تمتص ثاني أكسيد الكربون أثناء نموها، على تسريع تغير المناخ. كما أنه يجفف التربة السطحية عن طريق تعريضها لأشعة الشمس. يمكن للتربة السطحية الجافة أن تهب بعيداً، مما قد يؤدي إلى نقطة تحول بيئية لا رجعة فيها، التي لا يمكن بعدها للغابة أن تنمو مرة أخرى في المنطقة.





التغيرات المناخية

يعد تغير المناخ في المستقبل أحد التحديات المحددة للقرن الحادي والعشرين، إلى جانب التخفيف من حدة الفقر، والتدهور البيئي، والأمن العالمي. تكمن المشكلة في أن «تغير المناخ» لم يعد مجرد اهتمام علمي، ولكنه صار يشمل الاقتصاد وعلم الاجتماع والجغرافيا السياسية والسياسة الوطنية والمحلية والقانون والصحة على سبيل المثال لا الحصر.

سنبحث فيما يأتي في دور غازات الدفيئة (GHGs) في تلطيف المناخ العالمي الماضي، ولماذا تتزايد منذ الثورة الصناعية، ولماذا تعتبر حالياً ملوثات خطيرة. وسنتعرف على أي البلدان تنتج معظم غازات الدفيئة وكيف تتغير مع التطور السريع.

• ما الفرق بين المناخ والطقس؟

يحتاج أي استكشاف لتغير المناخ إلى توضيح المقصود بالمناخ باعتباره مفهوماً متميزاً عن الطقس. في جوهر الأمر فإن الطقس هو المظهر اليومي للمناخ. يُحدد مناخ منطقة من خلال الظروف الجوية طويلة الأجل بما في ذلك التغيرات الموسمية. تكمن المشكلة في أن الطقس في حد ذاته ظاهرة متغيرة: إذا لم يكن الأمر كذلك، فسنواجه صعوبة أقل في الوصول إلى تنبؤات أكثر دقة على المدى الطويل. وبالتالي، إذا تغير مناخ منطقة ما، فلا يمكننا تمييز ذلك إلا على مدى فترة طويلة من الزمن بمجرد فصل تغير المناخ المحتمل عن تقلبات الخلفية الطبيعية للطقس. وبالمثل، يشير الفيزيائيون والمهندسون إلى ما يسمونه نسبة الإشارة إلى الضوضاء، وهذا ينطبق على التيارات الكهربائية أو الإشارة الكهرومغناطيسية، سواء أكان بثاً إذاعياً تجارياً أم من جُرم نجمي.





وكذلك الحال مع تغير **المناخ**، تكمن المشكلة في فصل إشارة صغيرة لتغير **المناخ** عن ضوضاء طقس خلفية كبيرة. على سبيل المثال، صيف شديد الحرارة (أو جفاف، أو رياح موسمية غزيرة، أو أيًا كان ...) بحد ذاته لا يعني تغير **المناخ**. من ناحية أخرى، قد يكون لعقد أو أكثر من تلك الأمور على التوالي أهمية مناخية.

قبل أن **نستكشف** تغير **المناخ** وبخاصة المشكلات الحالية، نحتاج أولاً إلى أن نكون على دراية ببعض المفاهيم والظواهر التي تؤدي إلى الاحترار العالمي الحالي.

• الدفئة الطبيعية لكوكب الأرض

تُحدد درجة حرارة كوكب الأرض من خلال **التوازن** بين الطاقة الواردة من الشمس وفقدانها مرة أخرى في الفضاء. من الأشعة الشمسية قصيرة الموجة الواردة إلى الأرض (بشكل أساسي الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي) التي يمر معظمها تقريباً عبر الغلاف الجوي **دون تدخل**.

الاستثناء الوحيد هو الأوزون الذي -بفضل الله- يمتص الطاقة في مجال الأشعة فوق البنفسجية عالي الطاقة مما يحد من مدى وصوله إلى سطح الأرض؛ لأنه ضار جداً بالخلايا والحمض النووي. ينعكس نحو ثلث الطاقة الشمسية مباشرة إلى الفضاء. يجري امتصاص الطاقة المتبقية عن طريق كل من الأرض والمحيط. ومن شأن هذا أن يسخنها، ثم تشع هذا الدفء المكتسب مثل الأشعة تحت الحمراء **طويلة الموجة** أو الإشعاع الحراري. تُعرف غازات





الغلاف الجوي، مثل: بخار الماء وثاني أكسيد الكربون (CO2) والميثان (CH4) وأكسيد النيتروز (N2O) باسم غازات الاحتباس الحراري (GHGs) لأنها يمكن أن تمتص بعضاً من هذا الإشعاع طويل الموجة، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الغلاف الجوي. جرى قياس هذا التأثير في الغلاف الجوي ويمكن إعادة إنتاجه مراراً وتكراراً في المختبر.

نحن بحاجة إلى تأثير الاحتباس الحراري هذا لأننا بدونها، ستكون درجة حرارة الأرض أكثر برودة على الأقل 35 درجة مئوية، مما يجعل متوسط درجة الحرارة في المناطق المدارية نحو 10 درجة مئوية تحت الصفر.

منذ الثورة الصناعية، بقينا نحرق الوقود الأحفوري (النفط، والفحم، والغاز الطبيعي) المترسب منذ مئات الملايين من السنين، مما أدى إلى إطلاق الكربون مرة أخرى في الغلاف الجوي، مثل: ثاني أكسيد الكربون والميثان، مما زاد من تأثير الاحتباس الحراري ورفع درجة حرارة الأرض. في الواقع نحن نحرق ضوء الشمس المتحجر.

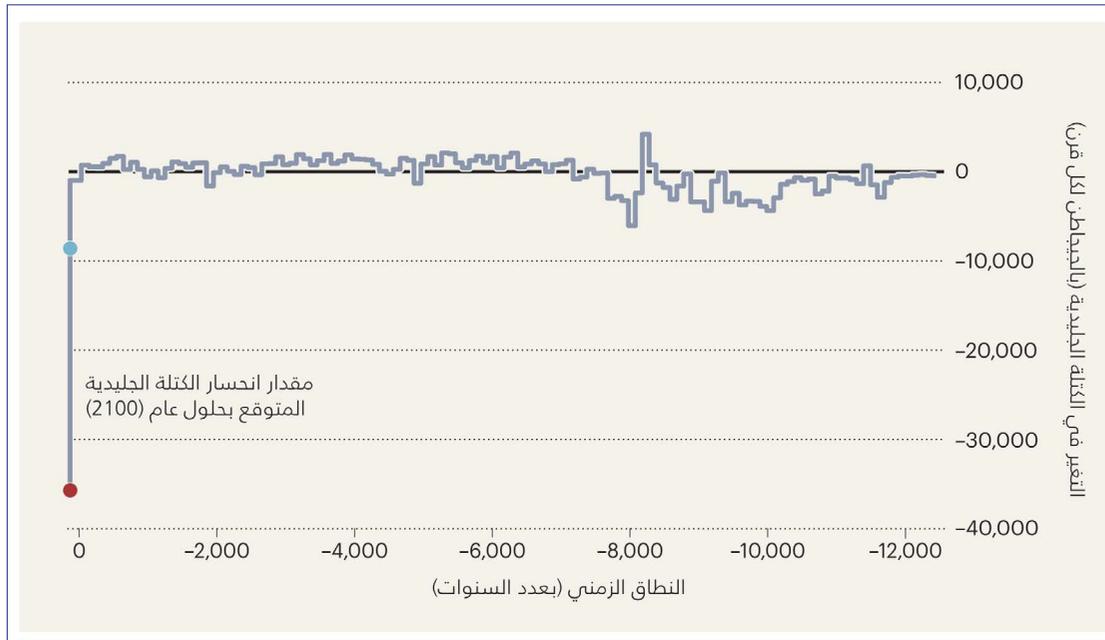
• المناخ الماضي

أعيد بناء تغير المناخ في الماضي الجيولوجي باستخدام عدد من المحفوظات الرئيسية، بما في ذلك الرواسب البحرية والبحيرات، ولب الجليد، ورواسب الكهوف، وحلقات الأشجار. تكشف هذه السجلات المختلفة أنه على مدار الخمسين مليون سنة الماضية، بدأ مناخ الأرض في البرودة، وانتقل مما يسمى بـ (عالم الاحتباس الحراري) في عصر الإيوسين، بظروف دافئة ولطيفة، إلى عالم الجليد الأكثر برودة وديناميكية اليوم.





قد يبدو غريباً أن كوكبنا شديد البرودة من الناحية الجيولوجية، بينما نهتم هنا بالاحترار السريع للكوكب. هذا لأن حقيقة وجود طبقات جليدية ضخمة في كل من القارة القطبية الجنوبية (**أنتاركتيكا**) وجرينلاند، والجليد البحري شبه الدائم في المحيط المتجمد الشمالي، تجعل **المناخ** العالمي شديد الحساسية للتغيرات في **غازات الدفيئة**.



منحنٍ بياني يوضح انحسار الجليد في صفيحة جرينلاند الجليدية في الماضي والحاضر والمستقبل.

بدأ التبريد العالمي طويل المدى للأرض مع التجلد في القارة القطبية الجنوبية منذ نحو 35 مليون سنة، ثم العصر الجليدي الكبير في **نصف** الكرة الشمالي، الذي بدأ منذ 2.5 مليون سنة. ومنذ بداية العصور الجليدية الشمالية العظيمة، تحول **المناخ** العالمي من ظروف كانت مماثلة أو حتى أكثر دفئاً قليلاً مما هي





عليه اليوم، إلى العصور الجليدية الكاملة، مما تسبب في تكوين طبقات جليدية يزيد سمكها على **3 كيلومترات** فوق معظم أمريكا الشمالية وأوروبا.

منذ ما بين **1 - 2.5 مليون سنة**، حدثت هذه الدورات الجليدية وبين الجليدية كل 41000 سنة، **ومنذ مليون سنة** كانت تحدث كل 100000 سنة. إن دورات العصر الجليدي العظيمة هذه مدفوعة بشكل أساسي بالتغيرات في مدار الأرض المتعلق بالشمس. في الواقع، لقد **أمضى** العالم أكثر من **80%** من الـ **2.5 مليون سنة** الماضية في ظروف أكثر **برودة** من الوقت الحاضر.

بدأ العصر الجليدي الحالي، عصر الهولوسين **Holocene**، قبل نحو 10000 عام، وهو مثال على الظروف الدافئة النادرة التي تحدث بين كل عصر جليدي. بدأ الهولوسين مع النهاية السريعة والدرامية **للعصر الجليدي الأخير**: في أقل من 4000 عام زادت درجات الحرارة العالمية بمقدار 6 درجات مئوية، وارتفع مستوى سطح البحر **النسبي** بمقدار 120 متراً، وزاد ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي **بمقدار الثلث**، وتضاعف غاز الميثان في الغلاف الجوي.

ومع ذلك، فإن هذا أبطأ بكثير من التغيرات التي نشهدها اليوم. يقترح **جيمس لوفلوك** في كتابه (**عصور غايا The Ages of Gaia**) أن الكواكب الجليدية، مثل عصر الهولوسين، هي الحالة المحمومة لكوكبنا، التي من الواضح أنها تفضل خلال **2.5 مليون سنة** الماضية متوسط درجة حرارة عالمية أكثر برودة. يرى لوفلوك أن الاحتباس الحراري هو مجرد زيادة في الحمى البشرية.





• الاختلافات السابقة في ثاني أكسيد الكربون

إحدى الطرائق التي نعرف من خلالها أن ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي مهم في التحكم في **المناخ** العالمي من خلال هذه الدراسة للمناخ الماضي. تأتي الأدلة على هذه الاختلافات السابقة في غازات الدفيئة ودرجة الحرارة من عينات الجليد التي جرى حفرها في كل من القارة القطبية الجنوبية وجرينلاند. عندما يتساقط الثلج، يكون خفيفاً ورقيقاً ويحوي على الكثير من الهواء. عندما يُضغط هذا الثلج ببطء لتكوين جليد، يحتجز بعضاً من هذا الهواء.

من خلال استخراج فقاعات الهواء المحبوسة في الجليد القديم، يمكن للعلماء قياس النسبة المئوية لغازات الدفيئة التي كانت موجودة في الغلاف الجوي السابق. لقد حضر العلماء لمسافة تزيد على 3 كم في كل من الصفائح الجليدية في جرينلاند والقارة القطبية الجنوبية، مما مكّنهم من إعادة بناء كمية غازات الدفيئة التي تولدت في الغلاف الجوي على مدى نصف مليون سنة الماضية.

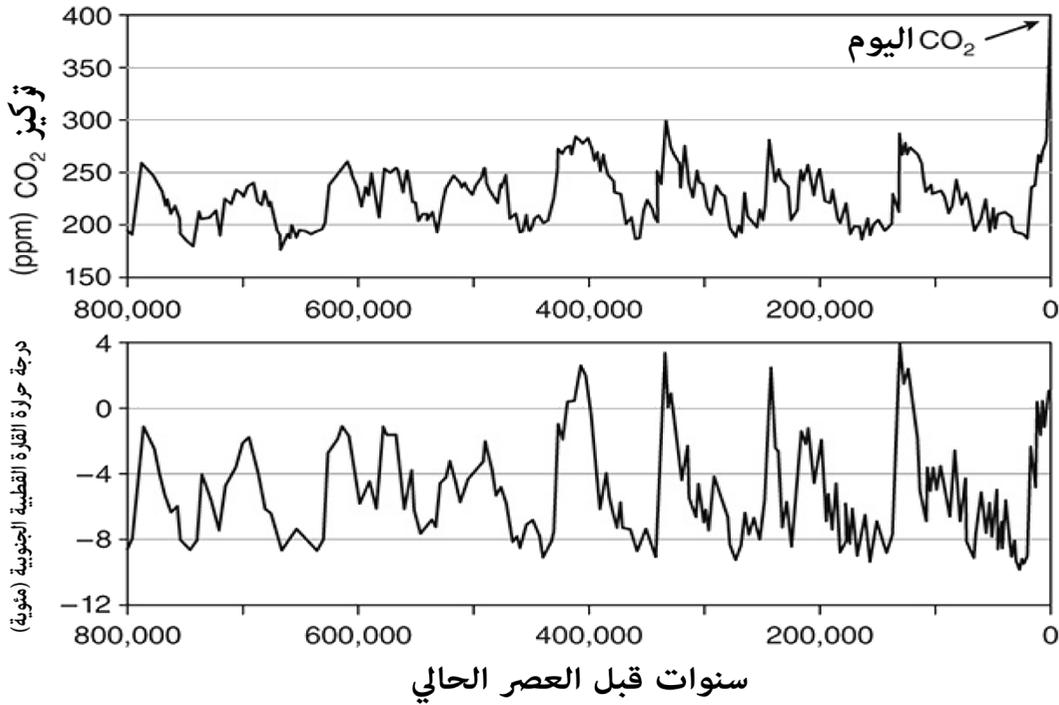
من خلال فحص نظائر الأكسجين والهيدروجين في المياه المجمدة التي تشكل لب الجليد، من الممكن تقدير درجة حرارة الهواء فوق الصفيحة الجليدية عندما تجمد الماء لأول مرة. كانت النتائج مذهلة، حيث تتفاوت غازات الدفيئة مثل ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي والميثان مع درجات الحرارة على مدار 800000 عام الماضية.

يمكن رؤية التغيرات الدورية في **المناخ** من فترات جليدية إلى فترات ما بين العصر الجليدي في درجات الحرارة ومحتوى غازات الدفيئة في الغلاف الجوي.





وهذا يدعم بقوة فكرة أن غازات الدفيئة في الغلاف الجوي ودرجة الحرارة العالمية مرتبطة ارتباطاً وثيقاً، أي عندما **تزداد** كمية ثاني أكسيد الكربون والميثان، نجد أن درجة الحرارة **تزداد** والعكس صحيح.



غازات الاحتباس الحراري ودرجات الحرارة لآخر ثمانى دورات جليدية مسجلة في لبّ الجليد.



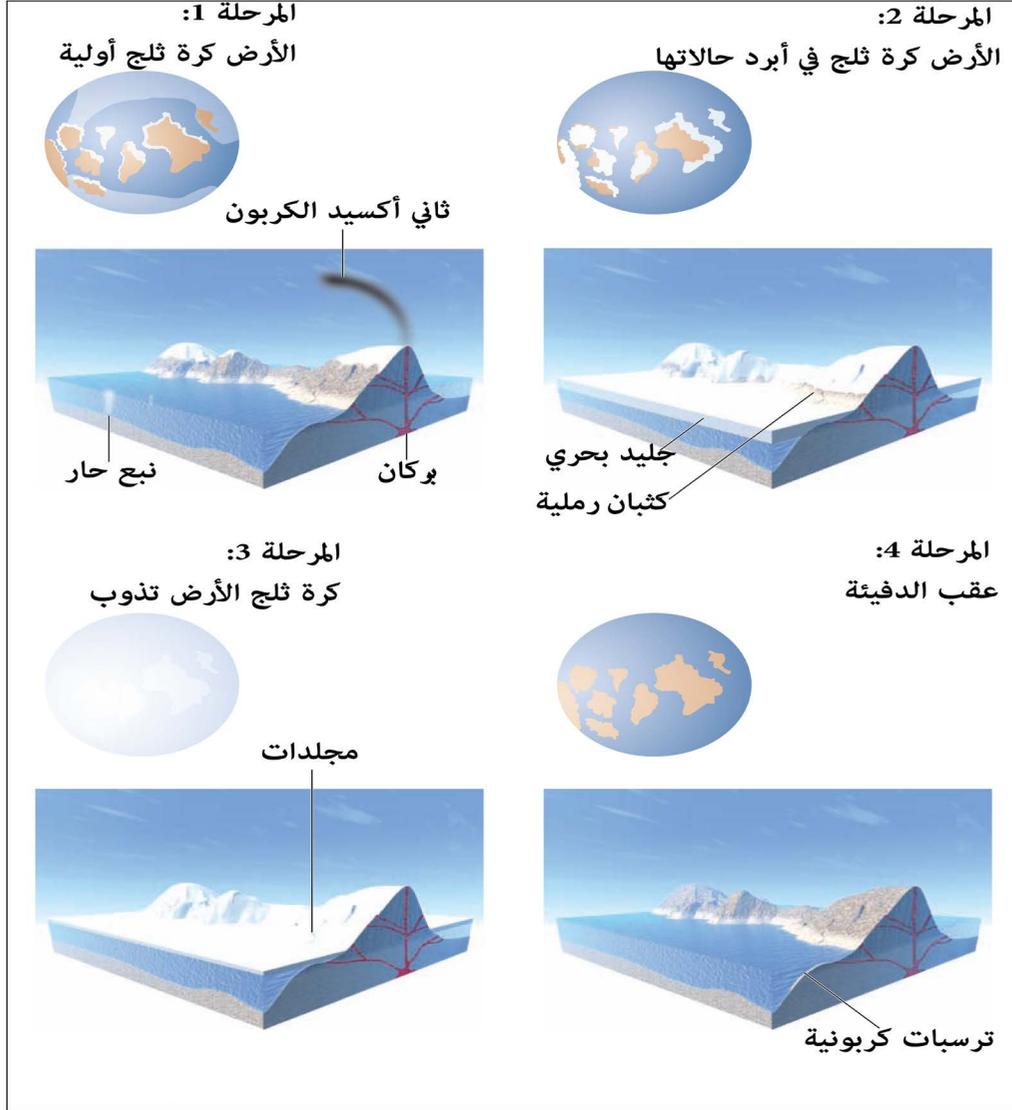


• المزارعون الأوائل

تُظهر الأدلة عالية الدقة عن جليد غرينلاند والحواف القارية للقارة القطبية الجنوبية أيضاً أن غازات الدفيئة في الغلاف الجوي ازدادت بمقدار ضئيل قبل الثورة الصناعية في القرن الثامن عشر. اقترح بيل روديمان، أستاذ علم المناخ القديم في جامعة فيرجينيا، أن المزارعين الأوائل تسببوا في حدوث انعكاس في التدهور الطبيعي لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي منذ نحو 7000 عام وبدء **ازدياد غاز الميثان** في الغلاف الجوي منذ نحو 5000 عام.

تسببت هذه الفكرة في قدر كبير من الجدل، ولكن مثل كل النظريات الجيدة، جرى اختبارها مراراً وتكراراً، ولم يتمكن أحد من دحضها بعد. لذلك فهي تقول بشكل أساسي أن التفاعلات البشرية المبكرة مع بيئتنا زادت من انبعاثات غازات **الدفيئة** في الغلاف الجوي بدرجة كافية لدرجة أنه حتى قبل الثورة الصناعية كان هناك تأثير كافٍ لتأخير بداية العصر الجليدي التالي، الذي كان سيبدأ **بهدهوء** في أي وقت في سنوات **الألفية الآتية**.





تناوب كرة الثلج والدفيئة على سطح الأرض. تنخفض درجات الحرارة العالمية وتتشكل كتل الجليد، مما يعكس الطاقة الشمسية إلى الفضاء. يبرد الغلاف الجوي، وتنخفض درجات الحرارة العالمية. تصير الأرض مدفونة في الجليد. مع عدم هطول الأمطار، يتراكم ثاني أكسيد الكربون البركاني في الغلاف الجوي، ويبدأ الكوكب في الاحترار وذوبان الجليد البحري. يبدأ تأثير الاحتباس الحراري المكثف، مما يؤدي إلى ذوبان الجليد، ودفع الأرض إلى حالة الدفيئة.



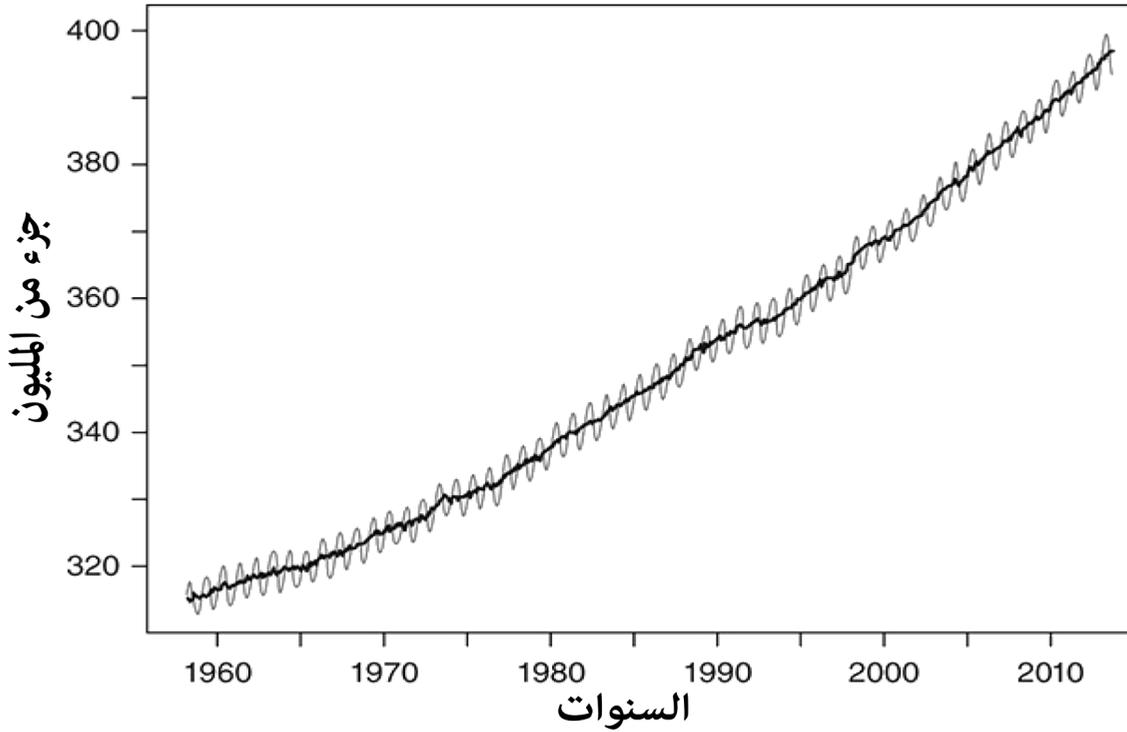


• الثورة الصناعية

هناك دليل واضح على أن مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي أخذت في الارتفاع منذ بداية الثورة الصناعية. لقد بدأت **القياسات الأولى** لتركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في عام 1958 على ارتفاع نحو 4000 متر، على قمة **جبل ماونا لوا في هاواي**. وقد أجريت القياسات هنا لتكون بعيدة عن مصادر التلوث المحلية.

يُظهر السجل بوضوح أن تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي زادت كل عام منذ عام 1958. وارتفع متوسط التركيز البالغ نحو 316 جزءاً في المليون بالحجم في عام 1958 إلى أكثر من 400 جزء في المليون حالياً. وترجع **التغيرات السنوية** في مرصد ماونا لوا في الغالب إلى امتصاص النباتات لثاني أكسيد الكربون. حيث يكون الامتصاص أعلى في فصل الربيع في نصف الكرة الشمالي. ومن ثم يحدث في كل ربيع، هناك انخفاض في ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، الذي **للأسف** لا يغير الاتجاه العام نحو قيم أعلى من أي وقت مضى.





قياسات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي لمرصد مونا لوا.

يمكن دمج بيانات ثاني أكسيد الكربون من مرصد مونا لوا Mauna Loa مع العمل التفصيلي على لب الجليد، وذلك لإنتاج سجل كامل لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي منذ بداية الثورة الصناعية. الذي يدل على أن ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي قد زاد من تركيز ما قبل الصناعة بنحو 280 جزءاً في المليون بالحجم إلى أكثر من 400 جزء في المليون في الوقت الحاضر، مما يمثل زيادة بنسبة قدرها 40%. لوضع هذه الزيادة في السياق، تُظهر الأدلة الجليدية أنه على مدار 800000 عام الماضية، كان التغيير الطبيعي في ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بين 180 و300 جزء في المليون.





الاختلاف بين الفترات الدافئة والباردة هو نحو 80 جزء في المليون، أي أقل من تلوث ثاني أكسيد الكربون الذي وضعناه في الغلاف الجوي على مدار المائة عام الماضية. إنه يوضح أن مستوى التلوث الذي تسببنا فيه بالفعل في قرن واحد يمكن مقارنته بالتغيرات الطبيعية التي **استغرقت** آلاف السنين.

• من الذي ينتج التلوث؟

جرى إنشاء اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (UNFCCC) لإنتاج أول اتفاقية دولية بشأن الحد من انبعاثات **غازات الدفيئة** العالمية. ومع ذلك، فإن هذه المهمة ليست بهذه البساطة كما تبدو **للهولة الأولى**، لأن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لا تنتجها البلدان بالتساوي. وفقاً للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير **المناخ**، فإن المصدر الرئيسي الأول لثاني أكسيد الكربون هو حرق الوقود الأحفوري، نظراً لأن أربعة أخماس انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية تأتي من إنتاج الطاقة والعمليات الصناعية والنقل.

هذه النسبة ليست موزعة بالتساوي في جميع أنحاء العالم بسبب التوزيع غير المتكافئ للصناعة والثروة؛ ينبعث من أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا أكثر من 90% من ثاني أكسيد الكربون العالمي المنتج صناعياً. علاوة على ذلك، فإن انبعاثات الدول المتقدمة تاريخياً كانت أكثر بكثير من انبعاثات الدول الأقل نمواً.

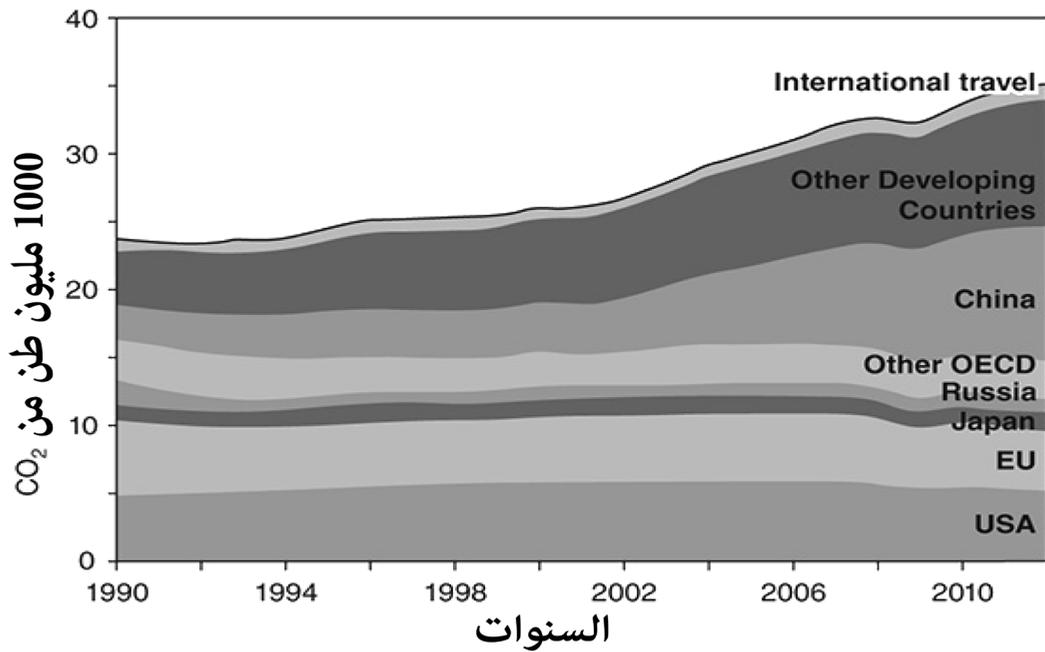
المصدر الرئيسي الثاني، الذي يمثل خمس انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية، هو نتيجة للتغيرات في استخدام الأراضي. تأتي هذه الانبعاثات بشكل





أساسي من قطع الغابات لأغراض الزراعة أو التحضر أو الطرق. عندما تُقطع مساحات كبيرة من الغابات المطيرة، غالباً ما تتحول الأرض إلى أراضٍ عشبية أقل إنتاجية مع قدرة منخفضة بشكل كبير على تخزين ثاني أكسيد الكربون.

هنا يختلف نمط انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، حيث تكون أمريكا الجنوبية وآسيا وأفريقيا مسؤولة عن أكثر من **90%** من انبعاثات تغير استخدام الأراضي في الوقت الحاضر. يثير هذا أسئلة أخلاقية مُهمّة؛ لأنه من الصعب إخبار هذه البلدان **بوقف** إزالة الغابات، في حين أن هذا حدث تاريخياً بالفعل في كثير من **دول** أمريكا الشمالية وأوروبا **قبل بداية القرن العشرين**. حيث إن كمية ثاني أكسيد الكربون المنبعثة من العمليات الصناعية لا تزال تفوق بشكل كبير التغيرات في استخدامات **الأراضي**.



انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التاريخية حسب المنطقة.





إذن من هم الذين تسببوا في هذه الزيادة في ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي؟ بطبيعة الحال، فإن البلدان المتقدمة هي التي أصدرت تاريخياً معظم غازات الدفيئة البشرية (**من صنع الإنسان**)، حيث كانت تتبعث منها منذ بداية الثورة الصناعية في النصف الأخير من **القرن الثامن عشر**.

مع أهمية عبء الكربون التاريخي هذا، وفقاً لتوقعات هيئة الطاقة الدولية، إلا أنه يتغير بسرعة. بين عامي 2015 و2044، سيضع العالم نصف تريليون طن من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، وهي الكمية نفسها التي انبعثت بين عامي 1750 و2015. ويرجع ذلك إلى أن البلدان النامية بسرعة، مثل: الصين والهند وجنوب إفريقيا والبرازيل،... إلخ. يزيدون انبعاثاتهم من غازات الدفيئة بمعدل ضخم، حيث ترتبط التنمية الاقتصادية ارتباطاً وثيقاً باستهلاك الطاقة.



في عام 2007، صارت الصين أكبر مصدر لانبعاث ثاني أكسيد الكربون في العالم، متجاوزة الولايات المتحدة الأمريكية. ومع ذلك، عند النظر إلى نصيب الفرد، فإن الانبعاثات الصينية أقل بأربع مرات من تلك الخاصة بالولايات المتحدة، التي تصدر قائمة نصيب الفرد (في الصورة انتشار التلوث في مدينة سيتشوان الصينية بسبب المصانع).





كمية نصف تريليون طن من الكربون التي وضعت في الغلاف الجوي منذ الثورة الصناعية لا تمثل سوى نصف إجمالي انبعاثاتنا. يبدو أن 50% من انبعاثاتنا قد امتصتها الأرض، و25% تذهب إلى المحيطات و25% تذهب إلى الغلاف الحيوي الأرضي.

ومع ذلك، فإن العلماء قلقون لأن إزالة التلوث لدينا من غير المرجح أن تستمر بشكل كامل في المستقبل. هذا لأنه مع ارتفاع درجات الحرارة العالمية، سترتفع درجة حرارة المحيطات وستكون قادرة على الاحتفاظ بكمية أقل من ثاني أكسيد الكربون. مع استمرارنا في إزالة الغابات وتحويل الأراضي للزراعة والتحضر، **سيكون هناك مقدار أقل من الغطاء النباتي لامتصاص ثاني أكسيد الكربون، مما يقلل مرة أخرى من امتصاص تلوث الكربون لدينا.**





الأدلة على حدوث تغيرات مناخية

العلم ليس نظاماً معتقداً. على سبيل المثال، لا يمكنك أن تقرر أنك تؤمن بالمضادات الحيوية (لأنها قد تنقذ حياتك) أو أن الأنابيب المعدنية الثقيلة ذات الأجنحة يمكن أن تطير (لأنك تريد الذهاب في إجازة)، ولكن في الوقت نفسه تتكرر أن التدخين يسبب السرطان، أو أن فيروس نقص المناعة البشرية يسبب الإيدز، أو أن غازات الدفيئة تسبب تغير المناخ. يعتمد العلم على منهجية عقلانية تمضي قدماً باستخدام الملاحظة التفصيلية والتجريب لاختبار الأفكار والنظريات باستمرار. إنه أساس مجتمعنا العالمي.

إذا أردنا أن نفهم تغير المناخ، يجب أن نفهم كيف يعمل العلم ومبدأ (وزن الدليل **Weight of Evidence**)، الذي يدفع بالحاجة المستمرة إلى تجميع بيانات جديدة وإجراء تجارب جديدة لاختبار أفكارنا ونظرياتنا المتعلقة **بالمناخ**. على مدى الثلاثين عاماً الماضية، لا بد أن نظرية تغير المناخ كانت واحدة من أكثر الأفكار التي جرى اختبارها شمولاً في العلوم.

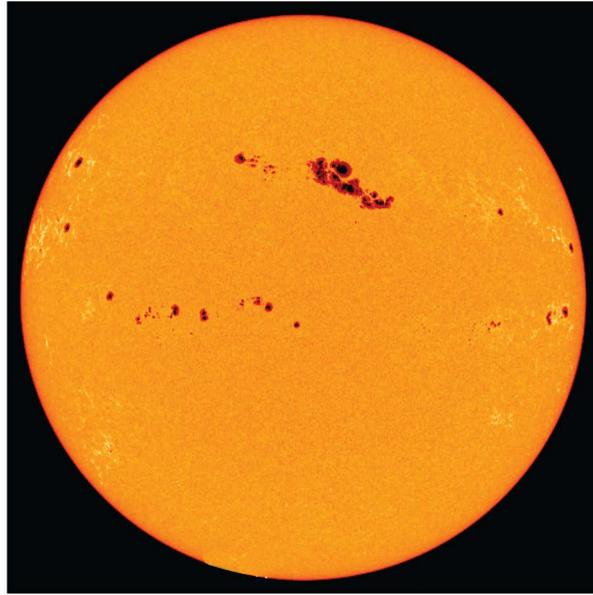
يوجد ستة مجالات رئيسية من الأدلة التي ينبغي النظر فيها:

- **أولاً:** تتبع ارتفاع غازات الدفيئة في الغلاف الجوي وفهمنا لدورها في التغيرات المناخية السابقة.
- **ثانياً:** نعلم من القياسات المخبرية والجوية أن هذه الغازات تمتص بالفعل الحرارة عندما تكون موجودة في الغلاف الجوي.
- **ثالثاً:** إذا قمنا بتتبع التغيرات الكبيرة في درجات الحرارة العالمية وارتفاع مستوى سطح البحر خلال القرن الماضي.





- **رابعاً:** إذا قمنا بتحليل آثار التغيرات الطبيعية على المناخ بما في ذلك البقع الشمسية والانفجارات البركانية، ومع أنها ضرورية لفهم نمط التغيرات في درجات الحرارة على مدى الـ 150 عاماً الماضية، إلا أنها لا تستطيع تفسير الاتجاه العام للاحتباس الحراري.



البقع الشمسية كما رُصدت خلال دورة عالية من نشاط البقع الشمسية يوم 29 مارس 2001. البقع الشمسية واضحة؛ لأنها أبرد قليلاً من بقية سطح الشمس. تتشكل عندما تبرز المجالات المغناطيسية الشديدة من الداخل. مجموعة البقع الشمسية هذه كبيرة بشكل غير عادي، حيث تزيد مساحتها على 13 ضعف مساحة سطح الأرض.

- **خامساً:** لقد لاحظنا تغيرات كبيرة في نظام مناخ الأرض بما في ذلك انحسار الجليد البحري في القطب الشمالي، وتراجع الأنهار الجليدية الجبلية في جميع القارات، وتقلص التربة الصقيعية وزيادة عمق الطبقة النشطة.





• **سادساً:** نحن نتابع الطقس العالمي باستمرار وشهدنا تحولات كبيرة في عدد وشدة الظواهر المتطرفة.

وسنفحص لاحقاً الأدلة على التغيرات في درجات الحرارة العالمية، والهطولات المطرية، ومستوى سطح البحر، والأحداث **المناخية** المتطرفة.

• درجة حرارة

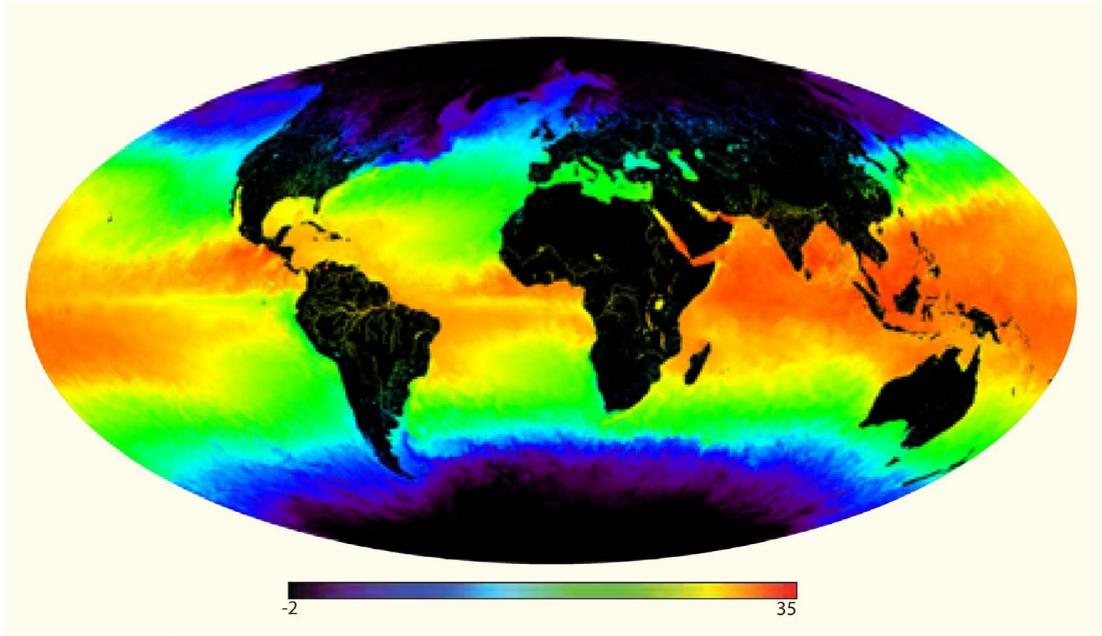
جري تقدير درجات الحرارة على مدار 2000 عام الماضية من عدد من المصادر، سواء أكانت مؤشرات مباشرة تعتمد على مقياس الحرارة أم مؤشرات قائمة على الوكيل. **ما ملف الوكيل؟** كما هو مستخدم هنا وفي أي مكان آخر، فهو اختصار لـ (المتغير الوكيل Proxy variable). يستخدم مصطلح (الوكيل) بشكل شائع لوصف البديل، كما هو الحال في (التصويت بالوكالة) أو (القتال بالوكالة). وبالطريقة نفسها، فإن (المتغير الوكيل) في مصطلحات علم المناخ يعني (واصفاً) قابلاً للقياس يمثل متغيراً مرغوباً (ولكن غير قابل للرصد)، مثل درجة حرارة المحيط أو الأرض في الماضي. لذلك هناك افتراض أنه يمكنك استخدام المتغير الوكيل لتقدير متغير مناخي لا يمكنك قياسه بشكل مباشر. على سبيل المثال، قياسات الأقمار الصناعية بالأشعة تحت الحمراء هي أمثلة على وكيل يمكن استخدامه **لتقدير** درجات حرارة السطح.

لقد جرى تسجيل قياسات درجة حرارة الهواء المعتمدة على مقياس الحرارة في عدد من **المواقع** في أمريكا الشمالية وأوروبا منذ 1760. ولم يزد عدد مواقع المراقبة إلى تغطية **جغرافية** عالمية كافية للسماح بحساب متوسط الأرض العالمي حتى **نحو منتصف القرن التاسع عشر**.





كما سُجّلت درجات حرارة سطح البحر (SSTs) ودرجات حرارة الهواء البحري (MATs) بشكل منهجي من قبل السفن منذ منتصف القرن التاسع عشر، ولكن حتى اليوم تغطية نصف الكرة الجنوبي سيئة جداً بسبب مساحة المسطح المائي الكبيرة جداً. تتطلب كل مجموعات البيانات هذه تصحيحات مختلفة لمراعاة الظروف المتغيرة وتقنيات القياس.



درجة حرارة سطح البحار والمحيطات في كافة أنحاء العالم (درجة مئوية). ويلاحظ أن منطقة الاستواء هي التي تحظى بالنسبة الأعلى.

على سبيل المثال، بالنسبة لبيانات الأرض، فقد فُحصت كل محطة للتأكد من أن الظروف لم تتغير بمرور الوقت نتيجة للتغيرات في موقع القياس، أو الأدوات المستخدمة، أو ملاجئ الأجهزة، أو طريقة حساب المتوسطات الشهرية،



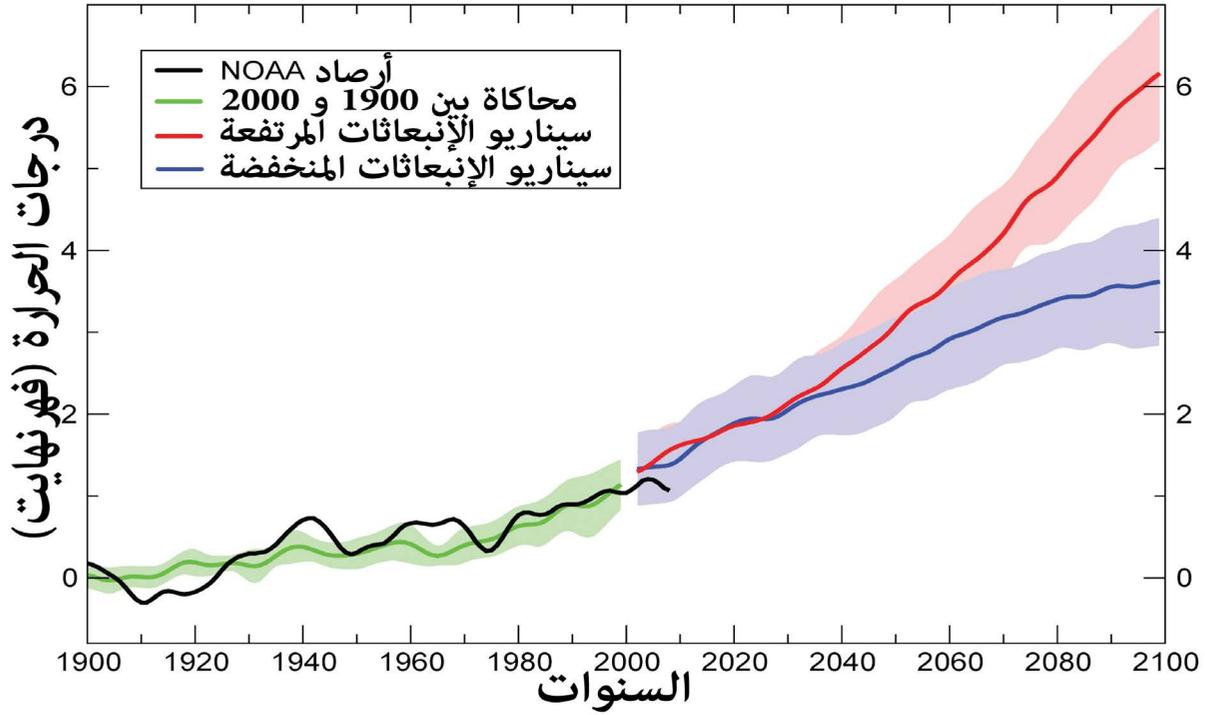


أو نمو المدن حول المواقع، مما يؤدي إلى درجات حرارة أكثر دفئاً بسبب تأثير جزيرة الحرارة الحضرية. في التقرير العلمي للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)، جرى الاعتراف بتأثير جزيرة الحرارة الحضرية على أنه حقيقي ولكنه مهمل بالنسبة لتجميع درجات الحرارة العالمية (أقل من 0.006 درجة مئوية).

بالنسبة لـ (SST) و (MAT)، هناك عدد من التصحيحات التي يجب تطبيقها:

- **أولاً:** حتى عام 1941، أجريت معظم قياسات درجة حرارة سطح البحر في مياه البحر التي رُفعت على سطح السفينة في دلو. ومنذ عام 1941، أُجريت معظم القياسات من مأخذ المياه لمحركات السفن.
- **ثانياً:** بين عامي 1856 و 1910، كان هناك تحول من الدلاء الخشبية إلى الدلاء القماشية، مما غير مقدار التبريد الناتج عن التبخر الذي يحدث أثناء رفع المياه إلى سطح السفينة. بالإضافة إلى ذلك، خلال هذه الفترة كان هناك تحول تدريجي من السفن الشراعية إلى البواخر، مما أدى إلى تغيير ارتفاع سطح السفينة وسرعة السفن والبواخر، والذي يمكن أن يؤثر في تبريد الدلاء بالتبخير.





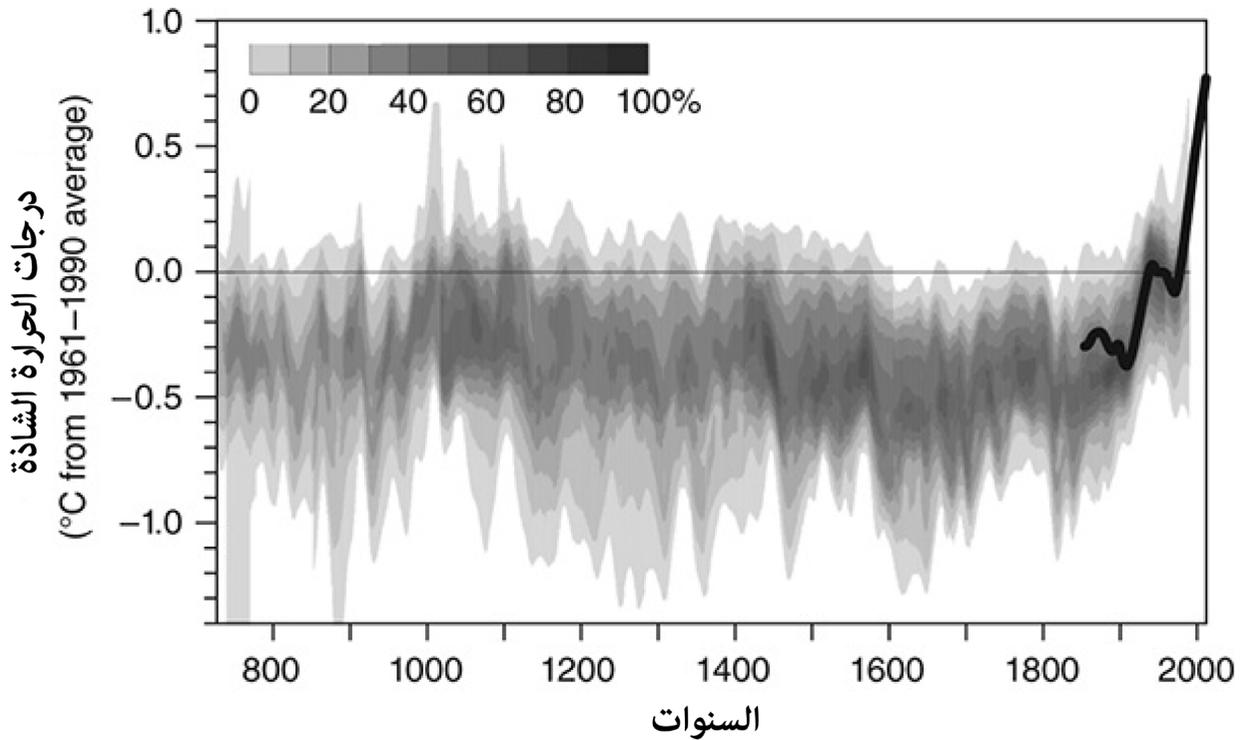
التغير المتوقع في درجة حرارة سطح البحر حتى عام 2100.

التصحيح الرئيسي الآخر الذي يجب إجراؤه هو التوزيع العالمي لمحطات الأرصاد الجوية عبر الزمن، والتي تباينت بشكل كبير منذ عام 1870. ولكن من خلال إجراء هذه التصحيحات، من الممكن إنتاج سجل مستمر لدرجة حرارة سطح الأرض من عام 1880 إلى عام 2012، الذي يُظهر ارتفاع درجة حرارة الأرض بمقدار 0.85 درجة مئوية خلال هذه الفترة. هذه الملاحظات مدعومة بـ 50 عاماً من **بيانات البالون** والأقمار الصناعية. على سبيل المثال، هناك أكثر





من 800 محطة تطلق مسابير أولية مرتين يومياً (أدوات الأرصاد الجوية)، أو بالونات، لقياس درجة الحرارة، والرطوبة النسبية، والضغط عبر الغلاف الجوي على ارتفاع نحو 20 كم، **حيث تتفجر**.



إعادة بناء درجة حرارة نصف الكرة الشمالي على مدى 1300 عام الماضية.

جرى أيضاً إعادة بناء درجات الحرارة العالمية لفترات زمنية سابقة لتأريخ سجلات الأدوات أو مقياس الحرارة. وقد جرى تحقيق ذلك باستخدام وكلاء **المناخ القديم** مثل سمك حلقات الأشجار والتركيب النظائري لقلوب الجليد أو رواسب الكهوف لتقدير درجات الحرارة المحلية.

ظهر مصطلح (**عصا الهوكي Stick Hockey**) للاحتباس الحراري، عندما





جرى دمج السجل الوسيط لدرجة الحرارة العالمية مع عمليات إعادة بناء المناخ القديم على مدار 2000 عام الماضية. في هذا السياق، من الواضح أن الخمسين عاماً الماضية كانت مختلفة تماماً وأكثر دفئاً من 2000 عام الماضية.

❖ الهطولات المطرية

يوجد مجموعتان من بيانات هطولات الأمطار العالمية: الأول هو هوليم Hulme، والثاني هو الشبكة العالمية للمناخ التاريخي (GHCN). لسوء الحظ، على عكس درجات الحرارة، لم توثق بيانات هطولات الأمطار والثلوج جيداً ولم تُصنع سجلات لفترة طويلة. ومن المعروف أيضاً أن هطولات الأمطار البرية تميل إلى التقليل من شأنه بنسبة تصل إلى 10-15% بسبب تأثيرات تدفق الهواء حول طبق التجميع. بدون تصحيح هذا التأثير، يمكن أن يكون هناك اتجاه تصاعدي زائف في هطولات الأمطار العالمية.

مع وجود هذه المشكلات، يبدو أن هناك زيادة كبيرة في هطولات الأمطار على مدى السنوات الخمس والعشرين الماضية، لا سيَّما في خطوط العرض الوسطى في نصف الكرة الشمالي. ويدعم ذلك الدليل على أن المحتوى المائي في الغلاف الجوي منذ ثمانينيات القرن الماضي قد ازداد فوق اليابسة والمحيط وكذلك في طبقة التروبوسفير العليا. هذا يتوافق مع بخار الماء الإضافي الذي يمكن أن يحمله الغلاف الجوي الأكثر دفئاً.

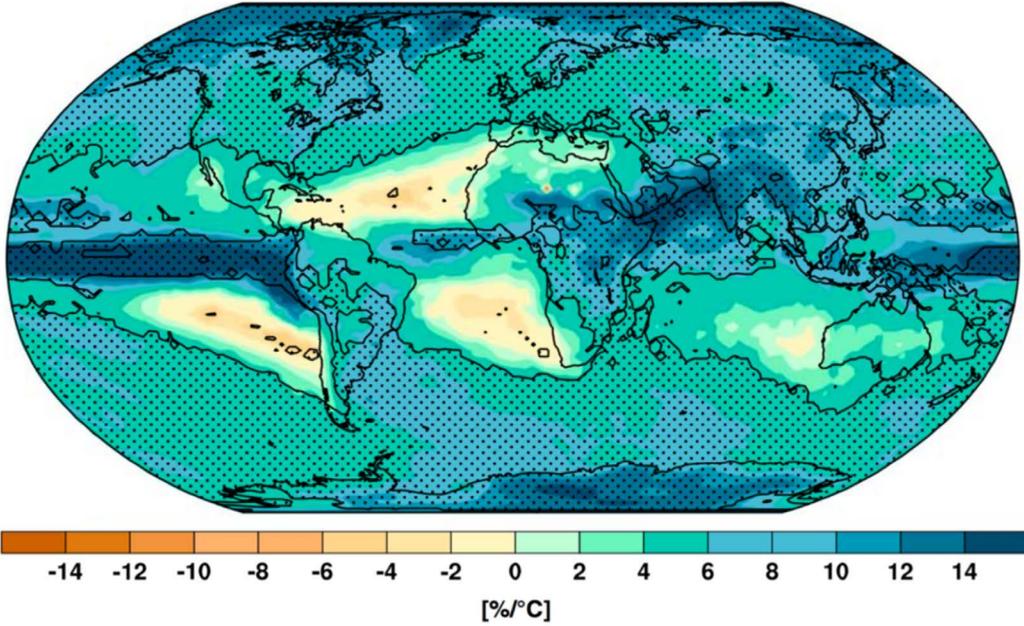
هناك أدلة على زيادة عالمية في هطولات الأمطار ولكن الدليل على هذا التغيير أقوى بكثير عند النظر في المناطق الفردية. يشير أحدث تقرير للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ إلى حدوث زيادات كبيرة في هطول الأمطار في الأجزاء الشرقية من أمريكا الشمالية والجنوبية، وشمال أوروبا، وشمال ووسط آسيا. يبدو أن موسمية هطول الأمطار تتغير أيضاً، على سبيل المثال





في خطوط العرض العليا في نصف الكرة الشمالي، مع زيادة هطول الأمطار في الشتاء وانخفاض في الصيف.

وقد لوحظت اتجاهات تجفيف طويلة الأمد في منطقة الساحل والبحر الأبيض المتوسط وجنوب إفريقيا وأجزاء من جنوب آسيا. وقد لوحظ أيضاً أن كمية المطر المتساقطة أثناء أحداث المطر (الشديدة) قد ازدادت. يدعم هذه الملاحظات من خلال تجميع مفصل لجميع سجلات هطول الأمطار في نصف الكرة الشمالي المنشور في مجلة نيتشر Nature الدولية في عام 2011 بواسطة الدكتور سيونغ-كي - مين وزملائه، الذي أظهر زيادة كبيرة في كثافة هطولات الأمطار على مدار الستين عاماً الماضية.



النسبة المئوية للتغير في هطولات الأمطار الغزيرة لكل درجة احترار، التي تُعرف بأنها أكبر حدث يومي لهطول الأمطار في العام لكل موقع.





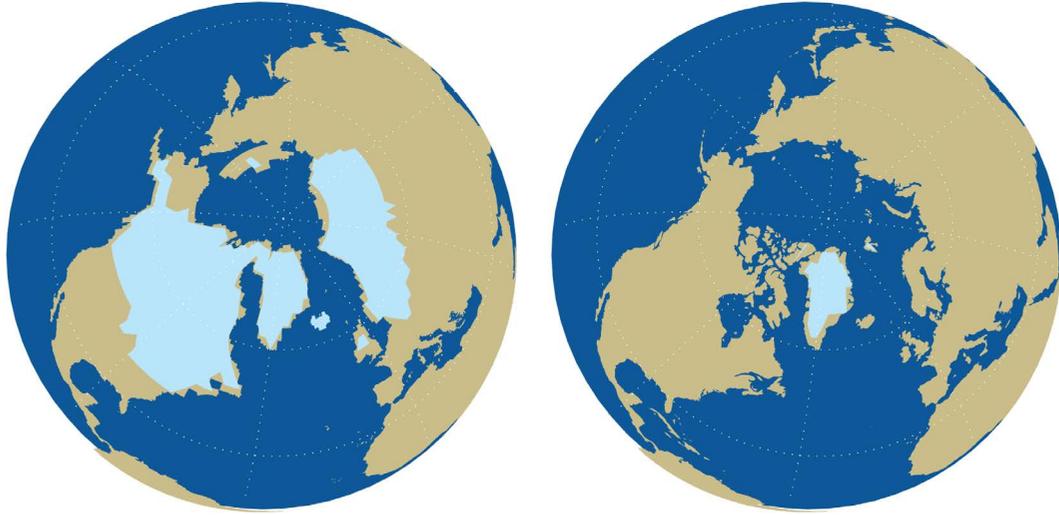
• مستوى سطح البحر العالمي النسبي

قامت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ أيضاً بتجميع جميع البيانات الحالية حول مستوى سطح البحر العالمي. يظهر أنه بين عامي 1901 و2010، ارتفع مستوى سطح البحر العالمي بنحو 17 إلى 21 سم. من الصعب قياس التغير في مستوى سطح البحر، حيث جرى **اشتقاق** التغيرات النسبية في مستوى سطح البحر من **مجموعتين** مختلفتين جداً من بيانات مقاييس المد والجزر والأقمار الصناعية.

في نظام قياس المد والجزر التقليدي، يقيس مستوى سطح البحر مقارنةً بمعيار قياس المد والجزر الأرضي. تكمن المشكلة الرئيسية في أن سطح الأرض أكثر **ديناميكية** مما يتوقعه المرء، مع الكثير من الحركات الرأسية، والتي يجري دمجها في القياسات.

يمكن أن تحدث **الحركات العمودية** نتيجة للضغط الجيولوجي الطبيعي لرواسب الدلتا، وسحب المياه الجوفية من طبقات المياه الجوفية الساحلية، والارتفاع المرتبط بالصفائح التكتونية المتصادمة (مثل تشكل الجبال كما هو الحال في جبال الهيمالايا)، أو الارتداد والتعويض المستمر بعد العصر الجليدي في مكان آخر مرتبط بنهاية العصر الجليدي الأخير. يحدث هذا الأخير بسبب **الإزالة السريعة للوزن** عند ذوبان الصفائح الجليدية العملاقة، بحيث تعود الأرض ببطء إلى **موقعها الأصلي**. مثال على ذلك اسكتلندا، التي ترتفع بمعدل 3 ملم سنوياً، بينما لا تزال **إنكلترا تغرق** بمعدل 2 مم سنوياً، مع أن ذوبان **الغطاء الجليدي الأسكتلندي** حدث قبل 10000 عام.

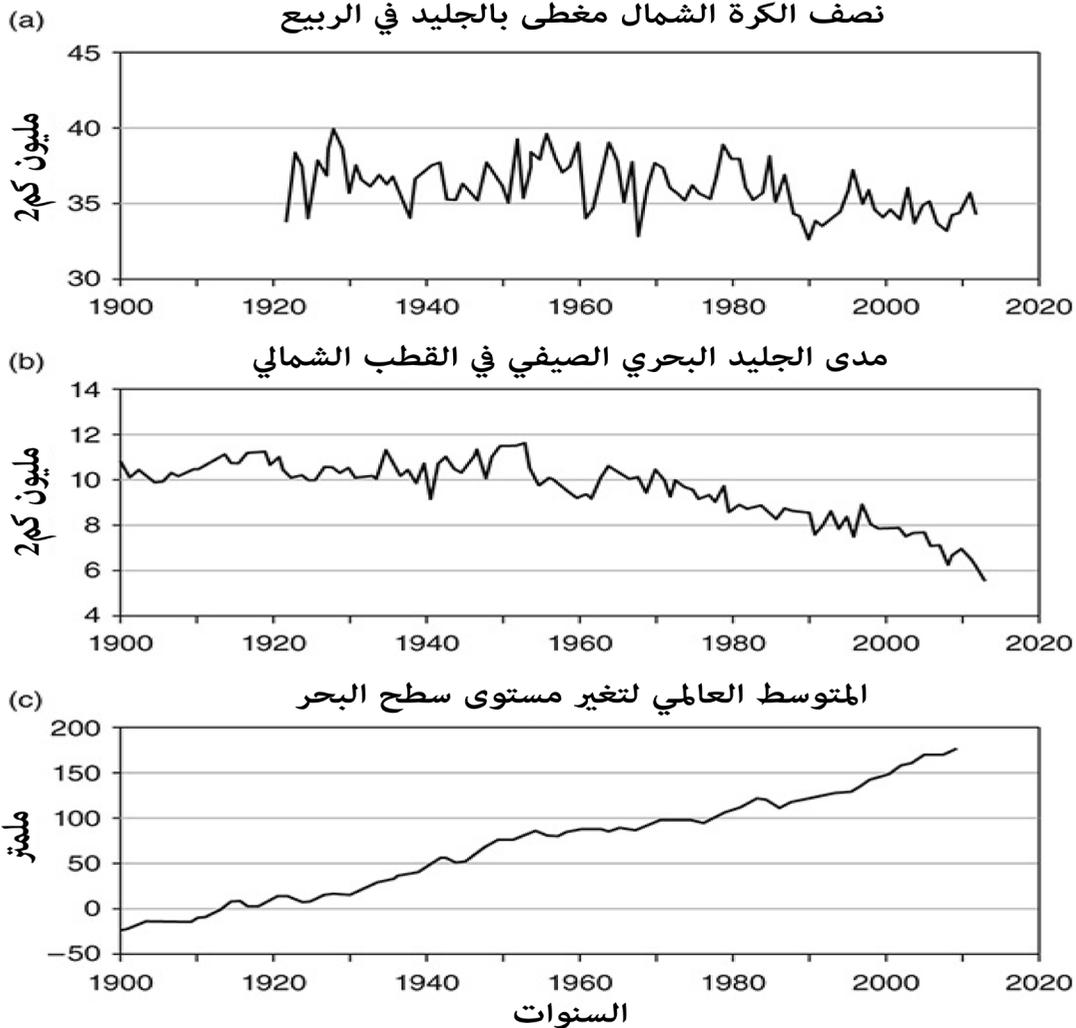




مدى الصفائح الجليدية القارية في نصف الكرة الشمالي في وقت آخر قمة جليدية قبل 20000 عام (على اليسار) مقارنة بمداهما الحالي (على اليمين).

وبالمقارنة، فإن المشكلة البسيطة في بيانات القمر الصناعي هي أنها قصيرة جداً، حيث بدأت أفضل البيانات في يناير 1993. وهذا يعني أنه يجب دمجها مع بيانات مقياس **المد والجزر** للنظر في الاتجاهات طويلة الأجل. ومع ذلك، فإن **البيانات** من عام 1993 إلى 2010 تظهر بوضوح ارتفاع مستوى سطح البحر العالمي بأكثر من 60 ملم.





مؤشرات تغير المناخ.

باختصار، ارتفع المتوسط العالمي لمستوى سطح البحر بين عامي 1901 و2010 بمقدار 1.7 ملم سنوياً. بينما **لوحظ** أسرع ارتفاع في مستوى سطح البحر بين عامي 1971 و2010 3.2 ملم في السنة. بين عامي 1993 و2010، يسهم في ارتفاع مستوى سطح البحر كل مما يأتي: **يسهم** التمدد الحراري للمحيطات





بمقدار 1.1 ملم في السنة (~39%)؛ والغطاء الجليدي في القارة القطبية الجنوبية 0.27 ملم (~9%)؛ والغطاء الجليدي في غرينلاند 0.33 مم (~12%)؛ والأنهار الجليدية والأغطية الجليدية الأخرى 0.76 ملم في السنة (~27%)؛ بنحو 0.38 ملم في السنة (~13%) من تخزين المياه الأرضية بإجمالي 2.8 ملم في السنة. تُظهر هذه البيانات الجديدة بوضوح أن الصفائح الجليدية في غرينلاند والقارة القطبية الجنوبية قد أسهمت في ارتفاع مستوى سطح البحر مؤخراً.



قرية شيشماريف في القطب الشمالي: أدى ارتفاع مستوى مياه البحر والعواصف الشديدة إلى تآكل الخط الساحلي بالقرب من قرية إنوبيات الساحلية، مما أدى إلى تحطيم الجدران البحرية وجرف المنازل. قرر السكان الانتقال إلى أماكن أبعد في الداخل بحثاً عن الأمان، والتخلي عن مواقع الصيد التقليدية، وبناء المنازل.

في الوقت الحالي، تشير التقديرات إلى أن غرينلاند تخسر أكثر من 200 غيغا طن من الجليد سنوياً، بزيادة ستة أضعاف منذ أوائل التسعينيات. بينما تفقد القارة القطبية الجنوبية نحو 150 غيغا طن من الجليد سنوياً، بزيادة





قدرها خمسة أضعاف منذ أوائل التسعينيات، ومعظم هذه الخسارة من شبه جزيرة القارة القطبية الجنوبية وقطاع **أمونديسن** البحري في غرب القارة القطبية الجنوبية.



أنهار من الجليد تشق طريقها عبر صفيحة غرينلاند الجليدية مشيرة بذلك إلى ارتفاع درجة الحرارة فعلياً.

• أدلة أخرى على ظاهرة الاحتباس الحراري

تأتي الأدلة الأخرى على تغير المناخ من خطوط العرض العليا ومن مراقبة الظواهر الجوية المتطرفة. فقد انخفض المتوسط السنوي لمدى الجليد البحري في القطب الشمالي بين 1979 و2012 في المجموع بمعدل 3.5 إلى 4.1 % لكل عقد مما يعني خسارة ما بين 0.45 إلى 0.51 مليون كيلومتر مربع من الجليد البحري لكل عقد.





في حين أن الحد الأدنى للجليد البحري في الصيف قد انخفض أكثر بنسبة تتراوح بين 9.4 إلى 13.6% لكل عقد، وهو ما يعادل 0.73 إلى 1.07 مليون كيلومتر مربع لكل عقد. على النقيض من عامي 1979 و2012، زاد المتوسط السنوي لمدى الجليد البحري في القارة القطبية الجنوبية بمعدل يتراوح بين 1.2 و 1.8% لكل عقد، وهو ما يمثل نمواً يتراوح بين 0.13 و 0.20 مليون كيلومتر مربع لكل عقد.

هناك أيضاً أدلة من مناطق التربة الصقيعية. توجد التربة الصقيعية في مناطق خطوط العرض العالية والارتفاعات العالية، حيث يكون الجو شديد البرودة لدرجة أن الأرض تتجمد صلبة إلى عمق كبير. خلال أشهر الصيف، يصير العمق الأعلى بمقدار متر أو نحو ذلك من التربة الصقيعية دافئاً بدرجة كافية للذوبان، وهذا ما يسمى (الطبقة النشطة Active layer).

كان هناك ارتفاع في درجة الحرارة بمقدار 3 درجات مئوية في ألاسكا ودرجتين مئويتين في شمال أوروبا / روسيا، وقد انخفض إلى متر واحد على الأقل خلال الخمسين عاماً الماضية، مما يدل على أن الطبقة النشطة صارت أعمق. انخفض الحد الأقصى للمساحة التي تغطيها التربة الصقيعية الموسمية بنسبة 7% في نصف الكرة الشمالي منذ عام 1900، مع انخفاض في الربيع بنسبة تصل إلى 15%. وسيؤدي هذا الغلاف الجليدي الديناميكي المتزايد إلى تضخيم المخاطر الطبيعية على الأشخاص والهيكل ووصلات الاتصال. لقد رأينا هذا بالفعل في الأضرار التي لحقت بالمباني والطرق وخطوط الأنابيب، مثل خطوط أنابيب النفط التي تضررت في ألاسكا.





بالإضافة إلى ذلك، هناك دليل على أن معظم، إن لم يكن كل، الأنهار الجليدية غير الجليدية في حالة انحسار. انخفض إجمالي تساقط الثلوج والغطاء الجليدي بشكل كبير خاصة في نصف الكرة الشمالي. على سبيل المثال، تُظهر سجلات الغطاء الجليدي من **نهر تورنيو في فنلندا**، التي جرى تجميعها منذ 1693، أن ذوبان الجليد في الربيع للنهر المتجمد يحدث حالياً قبل شهر من مواعده.

هناك أدلة أيضاً على أن أنماط الطقس لدينا تتغير. على سبيل المثال، في السنوات الأخيرة، ضربت العواصف الشديدة والفيضانات اللاحقة الصين وإيطاليا وإنجلترا وكوريا وبنغلاديش وفنزويلا وموزمبيق. في إنجلترا في أعوام 2000 و2007 و2013 و2014، **حدثت الفيضانات** والعواصف المصنفة على أنها «أحداث تحدث مرة كل 200 عام» في غضون 13 عاماً وفي كثير من الأحيان خلال عام واحد.

علاوة على ذلك، كان شتاء 2013 و2014 في بريطانيا هو الأكثر رطوبة منذ أن بدأت السجلات في القرن الثامن عشر، بينما كان أغسطس 2008 هو الأكثر رطوبة على الإطلاق، والربيع البريطاني يأتي حالياً في وقت مبكر، مع وجود أدلة على أن الطيور تعشش من 4 إلى 12 يوم مما كانت عليه قبل 35 عاماً.

كذلك تتحرك **أنواع الحشرات** - بما في ذلك النحل والنمل الأبيض - التي تحتاج إلى طقس دافئ للبقاء على قيد الحياة شمالاً، وقد وصل بعضها بالفعل إلى إنجلترا عن طريق **عبور القنال من فرنسا**. زاد تواتر موجات الحر في أوروبا وآسيا وأستراليا، على سبيل المثال، في أوروبا في عامي 2003 و2007، وروسيا في عام 2010، والولايات المتحدة الأمريكية في عام 2012، وأستراليا في عامي 2009 و2014.





هناك أيضاً أدلة على حدوث المزيد من العواصف في نصف الكرة الشمالي. فقد رُصد ارتفاع الموج في شمال المحيط الأطلسي منذ أوائل الخمسينيات من القرن الماضي، من السفن المنارة ومحطات الطقس في المحيط ومؤخراً من الأقمار الصناعية. بين خمسينيات وتسعينيات القرن الماضي، زاد متوسط ارتفاع الموجة من 2.5 متراً إلى 3.5 متراً، بزيادة قدرها 40%.

شدة العاصفة هي المحدد الرئيسي لارتفاع الموجة، مما يوفر دليلاً على زيادة نشاط العاصفة على مدار الأربعين عاماً الماضية. يتناسب هذا أيضاً مع الزيادة الملحوظة في الأعاصير الشتوية خارج المدارية، أي تلك التي تحدث في خطوط العرض الوسطى، والتي زادت بشكل ملحوظ على مدار المائة عام الماضية، مع ارتفاعات كبيرة في كل من قطاعي المحيط الهادئ والأطلسي منذ أوائل السبعينيات. هناك أيضاً أدلة على زيادة نشاط الأعاصير المدارية الشديدة منذ السبعينيات في شمال المحيط الأطلسي.

• ماذا يقول المشككون؟

واحدة من أفضل الطرائق لتلخيص الأدلة على تغير المناخ هي مراجعة ما يقوله المشككون في الاحتباس الحراري أو المنكرون لتغير المناخ ضد أحدث العلوم الحالية.

إذ يشكك جميع العلماء الكبار في حالة المعرفة الحالية، وهذا يدفعهم إلى الأمام في إجراء أرصاد وتجارب جديدة للسماح لهم بتطوير نظريات جديدة قابلة للاختبار. المبدأ الأساسي لـ «وزن الدليل» في العلم هو طريقة اختبار





المتشككين حول الأفكار والبيانات الجديدة. لذا فإن مصطلح (منكري تغير المناخ) ربما يكون مصطلحاً أفضل من الناحية الفنية؛ لأنهم ينكرون الثقل العلمي للأدلة.

1. التشكيك الأول: تشير بيانات الجليد الأساسية إلى استجابة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي لدرجة الحرارة العالمية، وبالتالي لا يمكن لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي أن يسبب تغيرات في درجات الحرارة العالمية.

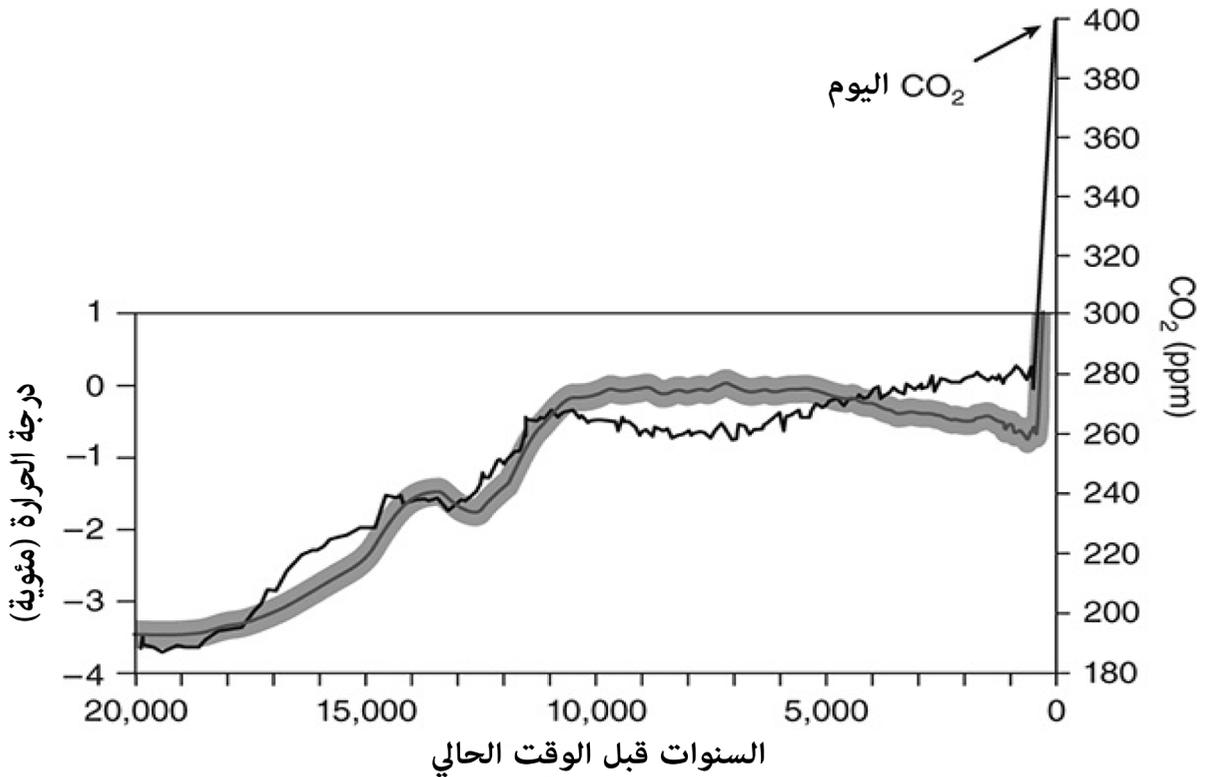
الرد على التشكيك الأول: في نهاية العصر الجليدي الأخير مع ارتفاع درجة حرارة الأرض، نعلم الآن من عينات اللب الجليدية من غرينلاند والقارة القطبية الجنوبية أن النصف الشمالي والجنوبي من الكرة الأرضية قد ارتفعت درجة حرارته في أوقات مختلفة وبمعدلات مختلفة. علاوة على ذلك، هناك أحداث مناخية على مدى آلاف السنين، عندما انفصلت كميات هائلة من الجليد عن **الغطاء الجليدي** لأمريكا الشمالية، مما أدى إلى إغراق شمال المحيط الأطلسي بالمياه العذبة المتغيرة في دوران المحيط وفي **جوهرها** محاولة إعادة المناخ العالمي إلى ظروف أكثر برودة.

وقع أحد هذه الأحداث الذي يُسمى حدث هاينريش **Heinrich Event** قبل نحو 15000 عام والآخر كان الدرايسي الأصغر **Younger Dryas**، والذي حدث قبل نحو 12000 عام. بسبب (التأرجح المناخي ثنائي القطب) **Bipolar Climate Seesaw** المسماة بشكل رائع، كلما برد نصف الكرة الأرضية الشمالي، يتم تصدير الحرارة إلى الجنوب ودفء النصف الجنوبي من الكرة الأرضية.





لذلك إذا قارنت سجل درجة حرارة الجليد الأساسي الفردي مع مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي المعاد بناؤها، فستكون هناك أوقات يبدو فيها أن العلاقة تتبادل. لفهم العلاقة بين درجات الحرارة العالمية وثاني أكسيد الكربون فعلاً، أنشأ الباحث **د. جيريمي شاكون** من جامعة هارفارد وزملاؤه مجموعة رئيسية من جميع سجلات درجات الحرارة عبر نهاية العصر **الجليدي** الأخير. يوضح هذا أن ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي يقود درجات الحرارة العالمية مما يزيد من ثقتنا بأنه يسهم في ارتفاع درجة حرارة الأرض مع خروجنا من آخر عصر **جليدي** عظيم.



تغيرات درجات الحرارة العالمية وثاني أكسيد الكربون خلال العشرين ألف سنة الماضية.





2. التشكيك الثاني: جرى تصحيح أو تعديل كل مجموعة بيانات تظهر الاحترار العالمي لتحقيق هذه النتيجة المرجوة.

الرد على التشكيك الثاني: بالنسبة للأشخاص الذين لا يشاركون بانتظام في العلوم، يبدو أن هذه هي المشكلة الأكبر في حجة (**حدث تغير المناخ**). كما هو موضح أعلاه، تتطلب جميع مجموعات البيانات المناخية التي تغطي الـ 150 عاماً **الماضية** نوعاً من التعديل، وهذا جزء من العملية العلمية. على سبيل المثال، إذا لم يجر إيلاء عناية كبيرة للاتجاهات الزائفة في قاعدة البيانات العالمية **لهطول الأمطار**، سنفترض حالياً أن هطولات الأمطار العالمي آخذ في الازدياد. ومع تقدم العلم **بشكل تدريجي**، فإنه يكتسب المزيد والمزيد من الفهم والبصيرة في مجموعات البيانات التي يقوم **ببنائها**.

هذا **الاستفهام** المستمر لجميع البيانات والتفسيرات هو القوة الأساسية للعلم: كل تصحيح أو تعديل جديد يرجع إلى فهم أكبر للبيانات والنظام المناخي، وبالتالي فإن كل دراسة جديدة **تضيف** إلى ثقتنا في النتائج. هذا هو السبب في أن تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ يشير إلى (**وزن الدليل**)، حيث إن ثقتنا في العلم تزداد إذا جرى الحصول على نتائج مماثلة من مصادر مختلفة تماماً.

3. التشكيك الثالث: التغيرات الأخيرة في درجات الحرارة العالمية ترجع إلى التغيرات في الشمس.

الرد على التشكيك الثالث: يتفق كل من المتشككين وعلماء المناخ على أن البقع الشمسية والنشاط البركاني يؤثران في المناخ ودرجات الحرارة العالمية. الفرق بين المعسكرين هو أن المتشككين يولون أهمية أكبر لأهمية هذه الاختلافات

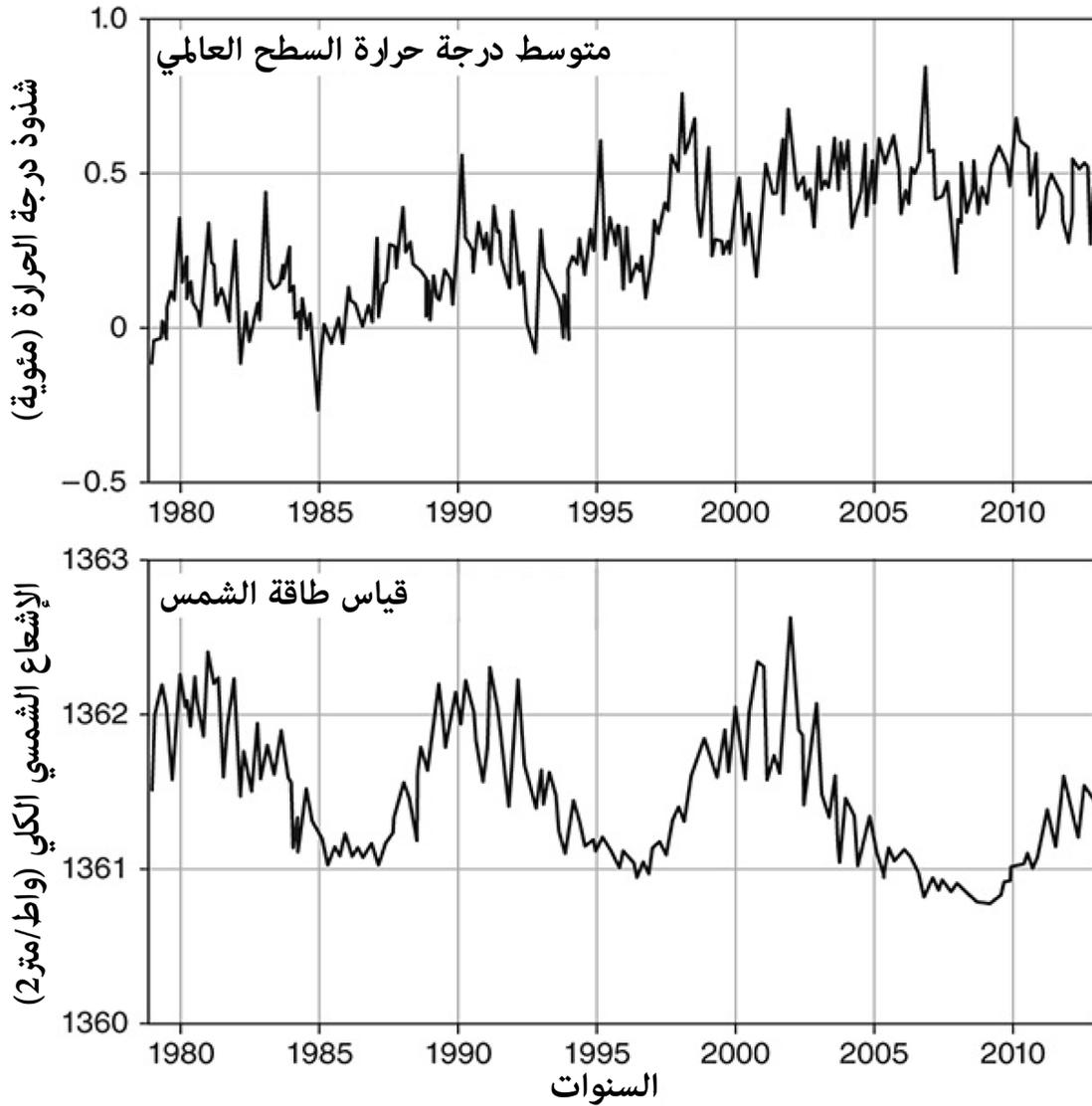




الطبيعية. هناك أدلة على أن الدورة الشمسية التي تبلغ مدتها 11 عاماً، والتي يختلف خلالها إنتاج طاقة الشمس بنحو 0.1%، يمكن أن تؤثر في تركيزات الأوزون ودرجات الحرارة والرياح في **الستراتوسفير**. ومع ذلك، فإن هذه التغييرات لها تأثير **ضئيل** جداً في درجات حرارة السطح.

لا يوجد دليل أيضاً على حدوث تغير واضح طويل المدى في إنتاج الشمس خلال القرن الماضي، حيث كانت الزيادات التي يسببها الإنسان في تركيزات ثاني أكسيد الكربون كبيرة. يوضح الشكل الآتي أنه منذ عام 1980، مع ارتفاع **درجات الحرارة العالمية**، لم يكن هناك تغيير ملحوظ في الاتجاه في إنتاج الطاقة الشمسية. علاوة على ذلك، تُظهر ملاحظة اتجاهات درجات الحرارة المختلفة على ارتفاعات مختلفة في الغلاف الجوي **بوضوح** أن الاحترار العام لا يمكن أن يكون بسبب زيادة **الإشعاع الشمسي**.





منحنٍ بياني يوضح العلاقة بين البقع الشمسية ودرجات الحرارة العالمية.



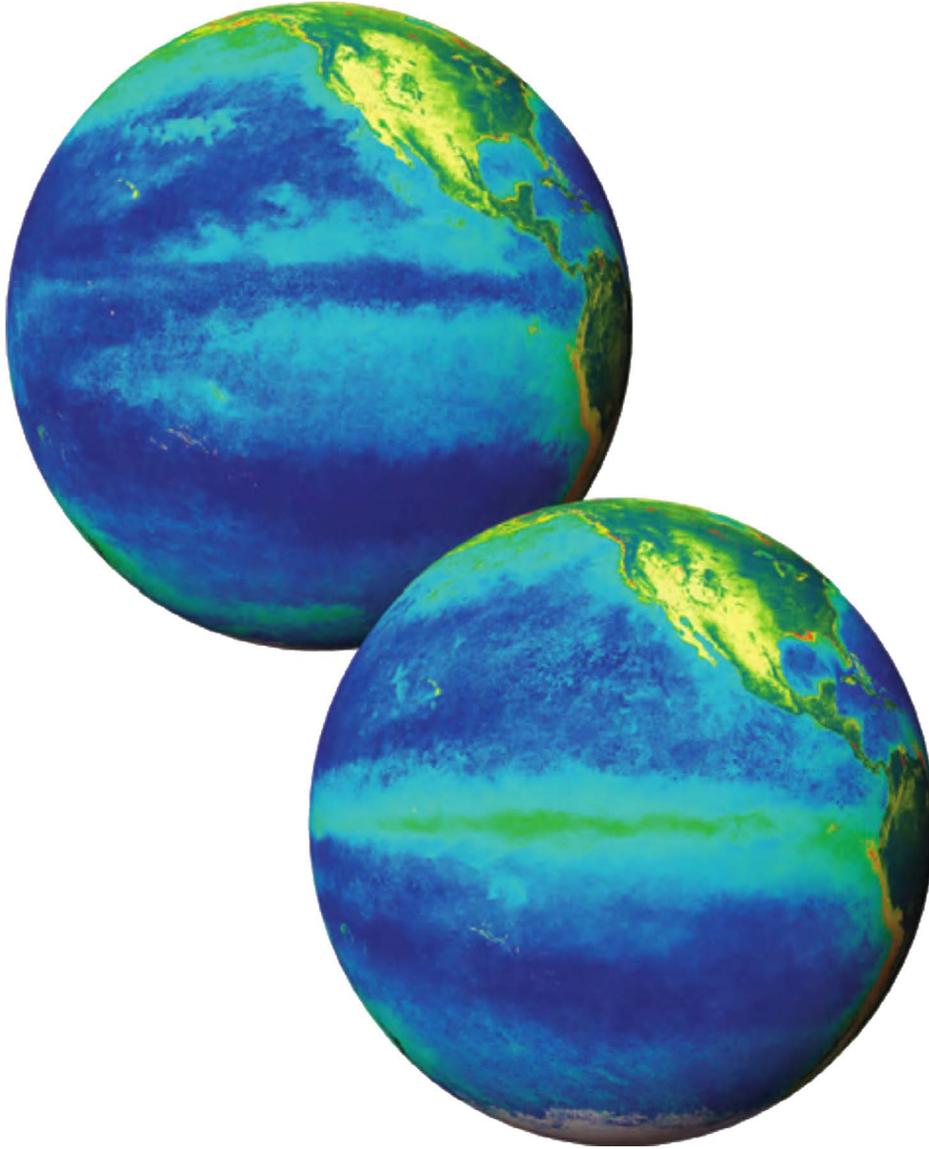


4. التشيك الرابع: التباطؤ الأخير في الاحتباس الحراري يعني أن تغير المناخ ليس بالسوء المتوقع.

الرد على التشيك الرابع: أحد أسباب تباطؤ الاحتباس الحراري أو حتى توقفه هو عام 1998، الذي كان أحد أكثر الأعوام دفئاً على الإطلاق. كان هذا العام متطرفاً لأنه أعقب ظاهرة **النينيو El Niño** القوية بين عامي 1997-1998 الذي أدى إلى ارتفاع **درجة حرارة واحدة** على الأقل **حول العالم**.

ومع ذلك، عندما يلاحظ المرء الرسم البياني لدرجة الحرارة العالمية، ينجذب المرء إلى هذا الحدث ويبدو أنه لم يكن هناك أي ارتفاع في درجات الحرارة منذ ذلك الحين. من الواضح أن الزيادة في متوسط درجة حرارة السطح قد تباطأت مقارنة **بالعقد السابق**. لذلك كان معدل الاحترار أبطأ في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين مقارنة **بالتسعينيات**، لكن العقد الأول من القرن الحادي والعشرين لا يزال **أكثر دفئاً** من التسعينيات.





في يناير 1998 (الصورة العليا) كانت ظاهرة النينو 1997-1998 في أوجها. بسبب ضعف الرياح التجارية في هذا الوقت، حيث توقف تدفق المياه الغنية بالمغذيات في المحيط الهادئ الاستوائي. يشير عدم وجود شريط أخضر على طول خط الاستواء في هذه الصورة إلى تركيزات الكلوروفيل منخفضة نسبياً هناك. بحلول يوليو 1998 (الصورة السفلى)، تعززت الرياح التجارية واستؤنفت موجات المياه الاستوائية، مما أدى إلى انتشار العوالق النباتية على نطاق واسع في الحزام الاستوائي.



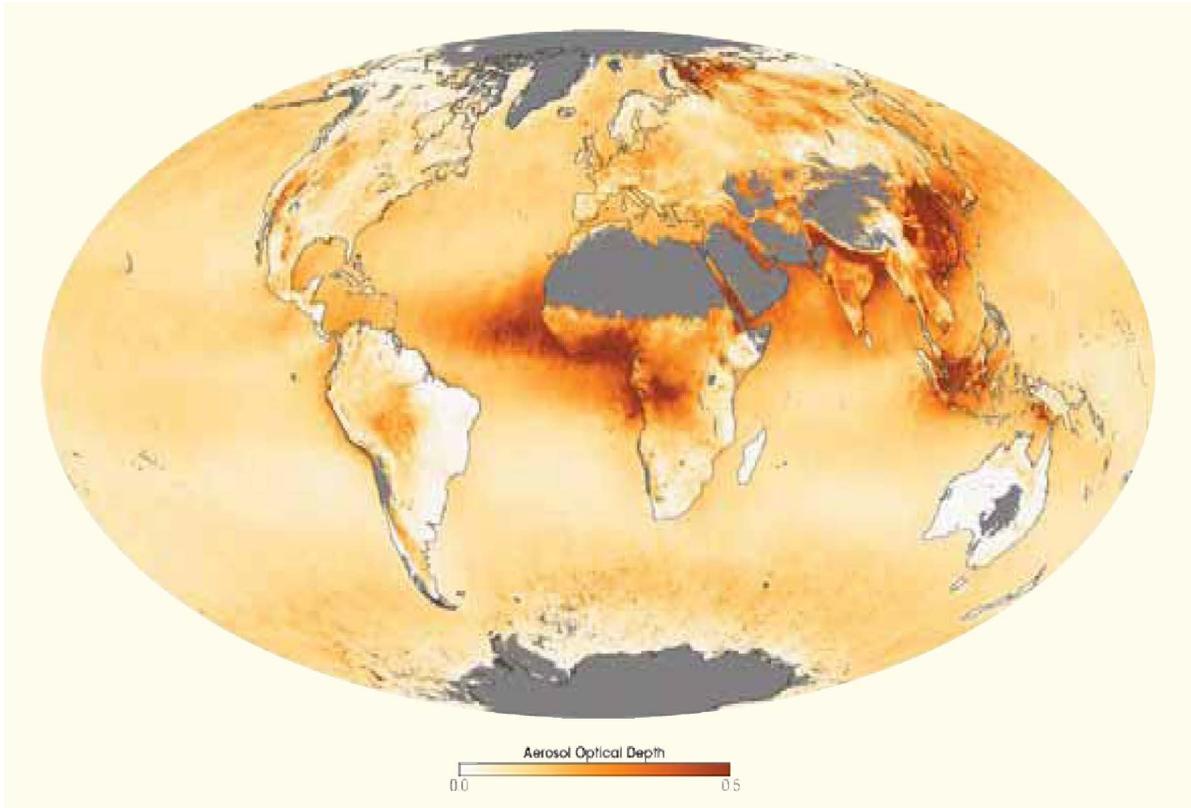


إن التباطؤ قصير المدى في ارتفاع درجة حرارة سطح الأرض مثل هذا لا يبطل فهمنا لتغير المناخ. فقد تحدث **التغيرات** في المعدل أو الاحترار بين العقود بشكل طبيعي في نظام المناخ. يمكن ملاحظة ذلك في أرصاف درجات الحرارة على مدار الـ **150 عاماً** الماضية. وذلك لأن الغلاف الجوي يخزن القليل جداً من الحرارة، وبالتالي يمكن أن تتأثر درجات حرارة السطح بسرعة **بامتصاص** الحرارة في أماكن أخرى من النظام المناخي والتغيرات في التأثيرات الخارجية على المناخ مثل الانفجارات البركانية والبقع الشمسية. تمتص المحيطات أكثر من **90%** من الحرارة **المضافة** إلى الأرض ولا تخرق إلا **ببطء** في المياه **العميقة**.

سيؤدي تغلغل الحرارة بشكل أسرع في المحيط الأعمق إلى إبطاء الاحترار الملحوظ على السطح وفي الغلاف الجوي، ولكنه لن يغير الاحترار طويل المدى في حد ذاته والذي سيحدث بسبب مستويات معينة من غازات الدفيئة. على سبيل المثال، **نعلم** أن الحرارة تخرج من المحيط إلى الغلاف الجوي أثناء أحداث ظاهرة النينو الدافئة، ويتم **ضخ** المزيد من الحرارة في أعماق المحيط خلال ظاهرة النينيا الباردة.

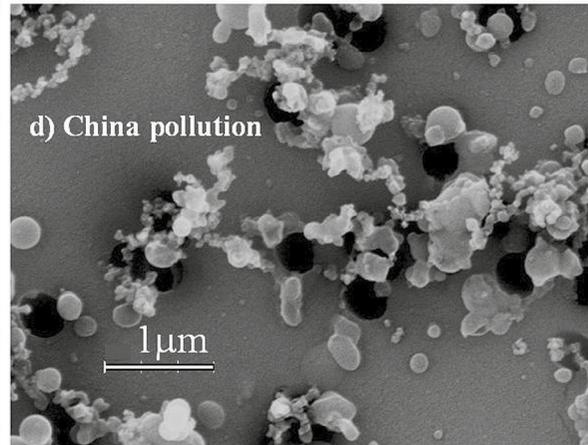
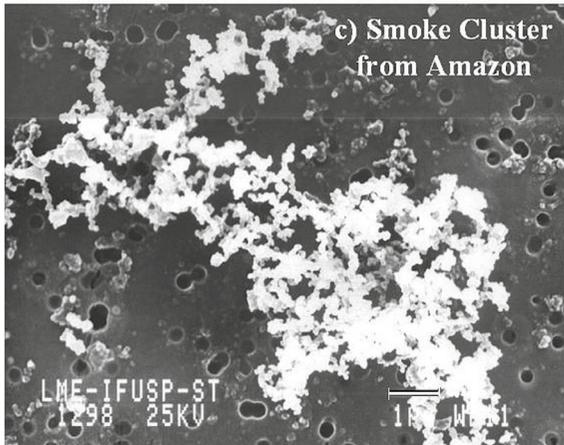
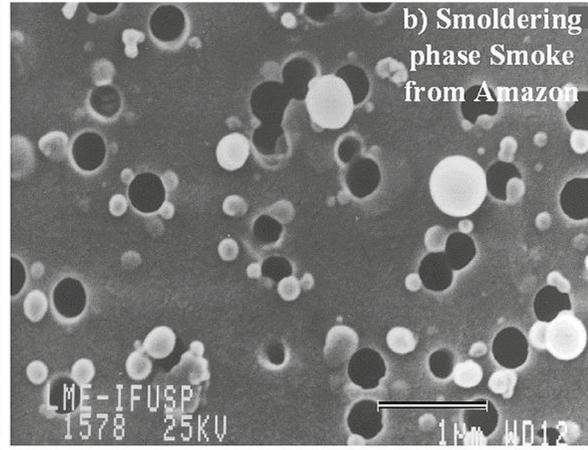
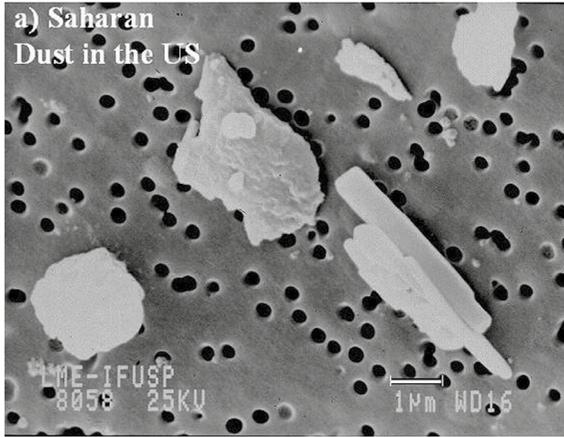
على مدى **العقد الماضي**، كانت هناك مصادفة لعدد من تأثيرات التبريد الصغيرة بما في ذلك فترة هادئة نسبياً للنشاط الشمسي وزيادة مقاسة في كمية الهباء الجوي (**الجسيمات العاكسة**) في الغلاف الجوي بسبب الآثار التراكمية لتعاقب البراكين ذات الانفجارات الصغيرة. ولكن عند النظر إلى سجل درجات الحرارة العالمية عقداً بعد عقد، يتضح أن العقود **الثلاثة** الماضية كانت جميعها أكثر **دفعاً** على التوالي من سابقتها.





تُظهر هذه الصورة (من وكالة الفضاء ناسا) متوسط العمق البصري السنوي للهباء الجوي لعام 2006. العمق البصري هو الدرجة التي يمنع بها الهباء الجوي ضوء الشمس الوارد من الوصول إلى سطح الأرض. ولوحظت تراكيزات عالية للهباء الجوي فوق غرب ووسط أفريقيا بسبب الغبار من الصحراء والدخان الناتج عن حرق الكتلة الحيوية. تمثل المناطق الرمادية على الخريطة المناطق التي تعذر فيها جمع بيانات الهباء الجوي.





مسح صور المجهر الإلكتروني لمختلف أنواع الهباء الجوي. جزيئات الهباء الجوي تستقر على المرشحات، والدوائر المظلمة عبارة عن مسام في تلك المرشحات: (a) غبار من الصحراء الكبرى الذي تنقله الرياح ويتجمع في فرجينيا؛ (b) الجسيمات التي جُمعت في الأمازون أثناء مرحلة الاحتراق (درجات الحرارة المنخفضة) بعد حرق الكتلة الحيوية، التي تتكون في الغالب من مركبات عضوية؛ (c) جسيم دخان متجمع من حرق الكتلة الحيوية في الأمازون ينتج أثناء مرحلة الاشتعال (درجة حرارة عالية) من الحريق؛ (d) جزيئات تلوث الهواء من الصين. لاحظ مقياس 1 ميكرون بالقرب من أسفل كل صورة.





الاحتباس الحراري العالمي

الاحتباس الحراري أو الاحتباس الحراري العالمي هو ارتفاع درجة حرارة الغلاف الجوي السفلي للأرض (**التروبوسفير**) بسبب الزيادات في تركيزات واحد أو أكثر من غازات الدفيئة. يمكن أن يؤدي إلى تغير المناخ الذي يمكن أن يستمر من عقود إلى آلاف السنين. ويشمل تغير المناخ المعاصر كلاً من الاحتباس الحراري وتأثيراته في أنماط طقس الأرض. كانت هناك فترات سابقة لتغير المناخ، ولكن التغيرات الحالية أسرع بشكل واضح وليست نتيجة لأسباب طبيعية.

لقد تركزت المناقشات -خلال السبعينيات وأوائل الثمانينيات من القرن الماضي- حول القضايا البيئية إلى حد كبير على تلوث الهواء والماء وتأثيرات الأمطار الحمضية على البحيرات والنظم البيئية الأرضية.

كانت المخاوف خطيرة وتضمنت الآثار التلوث المحلي والإقليمي العابر للحدود في الدول القومية المجاورة. على مقربةٍ من هذا **السيناريو البيئي** يوجد تأثير آخر لبعض هذه الغازات في المناخ العالمي ككل.

كما شمل ذلك كمية أقل من الأشعة تحت الحمراء التي تغادر طبقة **التروبوسفير** وبالتالي الاحتفاظ بكميات أكبر من الحرارة في الغلاف الجوي للأرض. يُظهر الاطلاع على الأدبيات العلمية أن آثار هذه الظاهرة - أي احتباس الحرارة بواسطة الغازات - قد ذُكرت في وقت مبكر من عام 1827 من قبل الفرنسي **جان بابتيست فورييه**. لقد كان **فورييه** هو الذي قدم مفهوم تأثير



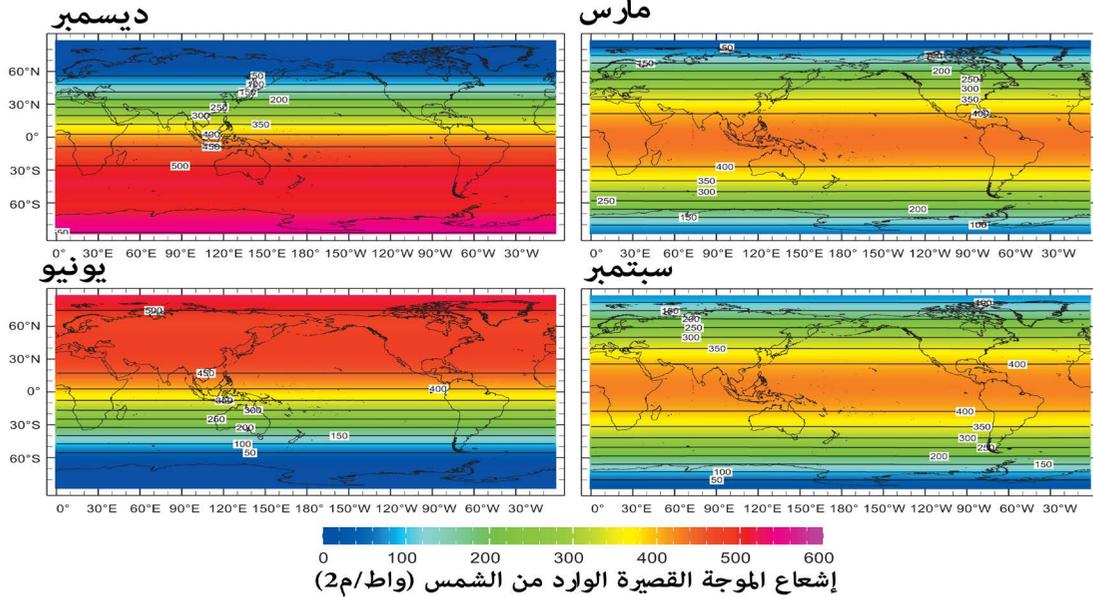


الاحتباس الحراري لتحديد العمليات الطبيعية التي تحافظ الأرض من خلالها على توازن الحرارة. كتب بعد ذلك الكيميائي السويدي **سفانتي أرهينيوس** في تسعينيات القرن التاسع عشر تحديداً دور ثاني أكسيد الكربون، كما فعل **روجر ريفيل** في معهد سكريبس لعلوم المحيطات في عام 1957.

• الدفينة الطبيعية للأرض

يجري التحكم في درجة حرارة الأرض من خلال التوازن بين المدخلات من طاقة الشمس وفقدانها مرة أخرى في الفضاء. تعتبر غازات معينة في الغلاف الجوي ضرورية لتوازن درجة الحرارة **وتعرف باسم** (غازات الاحتباس الحراري). تكون الطاقة المتلقاة من الشمس عادةً في شكل إشعاع قصير الموجة، أي في **الطيف المرئي** والأشعة فوق البنفسجية. في المتوسط، ينعكس نحو **ثلث** هذا الإشعاع الشمسي الذي يضرب الأرض مرة أخرى إلى الفضاء. ومن البقية، يمتص **الغلاف الجوي** بعضها، لكن معظمها تمتصه الأرض والمحيطات. **يصير** سطح الأرض دافئاً ونتيجة لذلك تبعث أشعة تحت الحمراء طويلة الموجة. **تحبس** غازات الدفينة وتعيد إصدار بعض من هذا الإشعاع طويل الموجة، **وتسخن** الغلاف الجوي.





التوزيع الجغرافي للإشعاع الشمسي الوارد إلى الجزء العلوي من الغلاف الجوي يتضح التباين الموسمي في الإشعاع الوارد في هذه الرسوم البيانية بين شهر ديسمبر ومارس ويونيو وسبتمبر. حسب متوسط البيانات للأعوام 1980-2009.

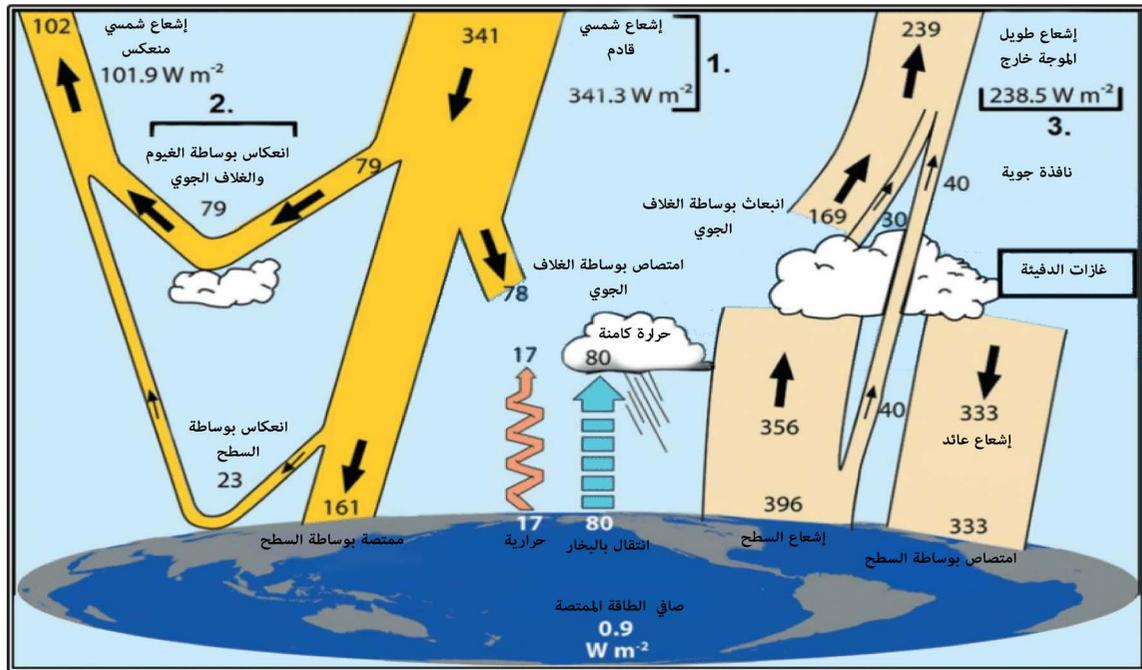
تشمل **غازات الدفيئة** التي تحدث بشكل طبيعي بخار الماء وثنائي أكسيد الكربون والأوزون والميثان وأكسيد النيتروز، وتشكل معاً دفيئة طبيعية أو تأثيراً شاملاً، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأرض. مع أن غازات الدفيئة غالباً ما تُصوّر في الرسوم البيانية كطبقة واحدة، ويحدث هذا فقط لإثبات (تأثيرها الشامل)، حيث إنها في الواقع مختلطة في جميع أنحاء الغلاف الجوي.

هناك طريقة أخرى لفهم (الدفيئة الطبيعية للأرض) وهي مقارنتها بأقرب **جيران** لها. يُحدّد مناخ الكوكب من خلال عدة عوامل: كتلته، وبعده عن الشمس، وبالطبع تكوين غلافه الجوي وبخاصة كمية الغازات **المسببة** للاحتباس الحراري. على سبيل **المثال**، كوكب المريخ صغير جداً، وبالتالي فإن جاذبيته أصغر من أن تحتفظ بجو **كثيف**؛ غلافه الجوي أرق **بمائة مرة** من غلاف الأرض ويتكون





أساساً من ثاني أكسيد الكربون. يبلغ متوسط درجة حرارة سطح المريخ نحو **50 درجة مئوية** تحت الصفر؛ لذا فإن القليل من ثاني أكسيد الكربون الموجود يتجمد على الأرض. وبالمقارنة، فإن كوكب الزهرة له كتلة الأرض نفسها تقريباً ولكن غلافه الجوي أكثر كثافة، ويتكون من **96%** من ثاني أكسيد الكربون. تنتج هذه النسبة العالية من ثاني أكسيد الكربون الاحترار العالمي الشديد، وبالتالي فإن درجة حرارة سطح الزهرة تزيد على **460 درجة مئوية فوق الصفر**.



متوسط توازن الطاقة العالمي السنوي للأرض.

يتكون **الغلاف الجوي** للأرض من **78%** نيتروجين و **21%** أكسجين و **1%** غازات أخرى. هذه الغازات الأخرى هي التي نهتم بها؛ لأنها تشمل ما يسمى بغازات الاحتباس الحراري. أهم غازين من **غازات الدفيئة** هما ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء.



حالياً، يمثل ثاني أكسيد الكربون $0.03-0.04\%$ فقط من الغلاف الجوي، بينما يتفاوت بخار الماء من 0 إلى 2%. بدون تأثير الاحتباس الحراري الطبيعي الذي ينتجه هذان الغازان، سيكون متوسط درجة حرارة الأرض نحو 20 درجة مئوية تحت الصفر.

المقارنة مع المناخ على كوكب المريخ والزهرة كبيرة جداً بسبب سماكة الغلاف الجوي المختلفة والكميات النسبية لغازات الدفيئة. ومع ذلك، نظراً لأن كمية ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء يمكن أن تختلف على الأرض، فإننا نعلم أن هذا التأثير الطبيعي للاحتباس الحراري قد أنتج نظاماً مناخياً غير مستقر بشكل طبيعي وغير قابل للتنبؤ به مقارنةً بالمريخ والزهرة.

❖ المناخ الماضي ودور ثاني أكسيد الكربون

إحدى الطرائق التي نعرف من خلالها أن ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي مهم في التحكم في المناخ العالمي من خلال دراسة مناخنا السابق. على مدى المليونين ونصف المليون سنة الماضية، تبدل مناخ الأرض بين العصور الجليدية العظيمة، مع وجود طبقات جليدية يزيد سمكها على 3 كيلومترات فوق أمريكا الشمالية وأوروبا، إلى ظروف كانت أكثر اعتدالاً مما هي عليه اليوم.

هذه التغيرات سريعة جداً إذا ما قورنت بالتغيرات الجيولوجية الأخرى، مثل حركة القارات حول العالم، حيث إننا ننظر إلى فترة زمنية قدرها ملايين السنين. لكن كيف نعرف عن هذه العصور الجليدية الضخمة ودور ثاني أكسيد الكربون؟



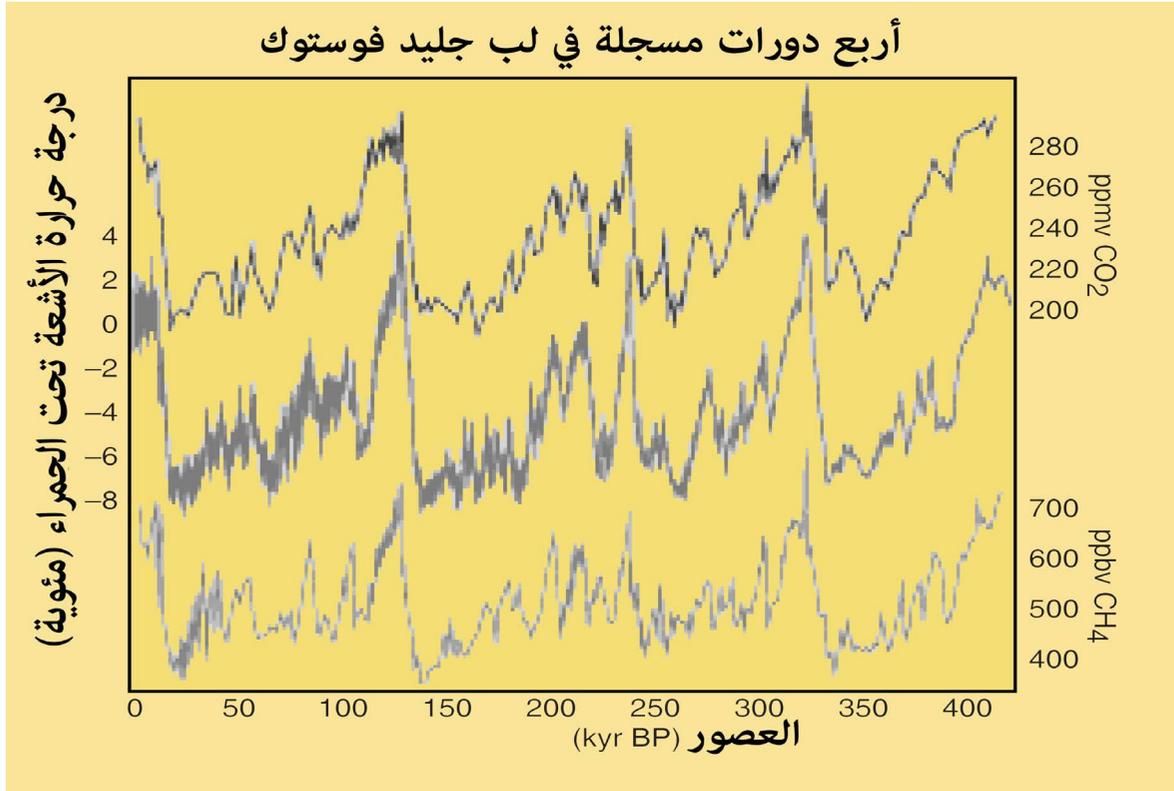


يأتي الدليل بشكل أساسي من عينات اللب الجليدية التي جرى حفرها في كل من **القارة القطبية الجنوبية وجرينلاندا**. عندما يتساقط الثلج، يكون خفيفاً ورقيقاً ويحوي على الكثير من الهواء. عندما **ينضغط** هذا الهواء ببطء لتكوين ثلج، يجري احتجاز بعض من هذا الهواء. من خلال استخراج فقاعات الهواء المحبوسة في الجليد القديم، يمكن للعلماء قياس النسبة المئوية لغازات الدفيئة التي كانت موجودة في **الغلاف الجوي** السابق.

لقد حضر العلماء ما يزيد على ميلين في كل من الصفائح الجليدية في جرينلاندا والقارة القطبية الجنوبية، مما مكّنهم من إعادة بناء كمية غازات الدفيئة التي حدثت في الغلاف الجوي على مدار نصف مليون سنة الماضية.

من خلال فحص نظائر الأكسجين والهيدروجين في لب الجليد، يمكن تقدير درجة الحرارة التي تشكل فيها الجليد. كانت النتائج مذهلة، حيث تتباين **غازات الدفيئة** مثل ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي (CO_2) والميثان (CH_4) مع درجات الحرارة على مدى 400000 عام الماضية. وهذا يدعم بقوة فكرة أن محتوى ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ودرجة الحرارة العالمية مرتبطان ارتباطاً وثيقاً، أي عندما يزداد ثاني أكسيد الكربون والميثان، تزداد درجة الحرارة **والعكس صحيح**.





غازات الاحتباس الحراري ودرجات الحرارة في الدورات الجليدية الأربعة الأخيرة المسجلة في لب الجليد فوستوك Vostok.

هذا هو أكبر اهتمامنا بالمناخ في المستقبل: إذا استمرت مستويات غازات الدفيئة في الارتفاع، **فستستمر** درجة حرارة الغلاف الجوي أيضاً في الارتفاع. تقدم دراسة المناخ في الماضي، كما **سنرى** لاحقاً، أدلة كثيرة حول ما يمكن أن يحدث في المستقبل.





واحدة من أكثر النتائج إثارة للقلق من دراسة عينات الجليد والبحيرات ورواسب أعماق البحار هي أن المناخ الماضي قد تغير إقليمياً بما لا يقل عن 5 درجات مئوية في بضعة عقود، مما يشير إلى أن **المناخ يتبع مساراً** غير خطي. ومن ثم يجب أن نتوقع مفاجآت مبالغتها ودراماتيكية عندما تصل مستويات غازات الاحتباس الحراري إلى نقطة انطلاق غير **معروفة** في المستقبل.

❖ ارتفاع ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي خلال الفترة الصناعية

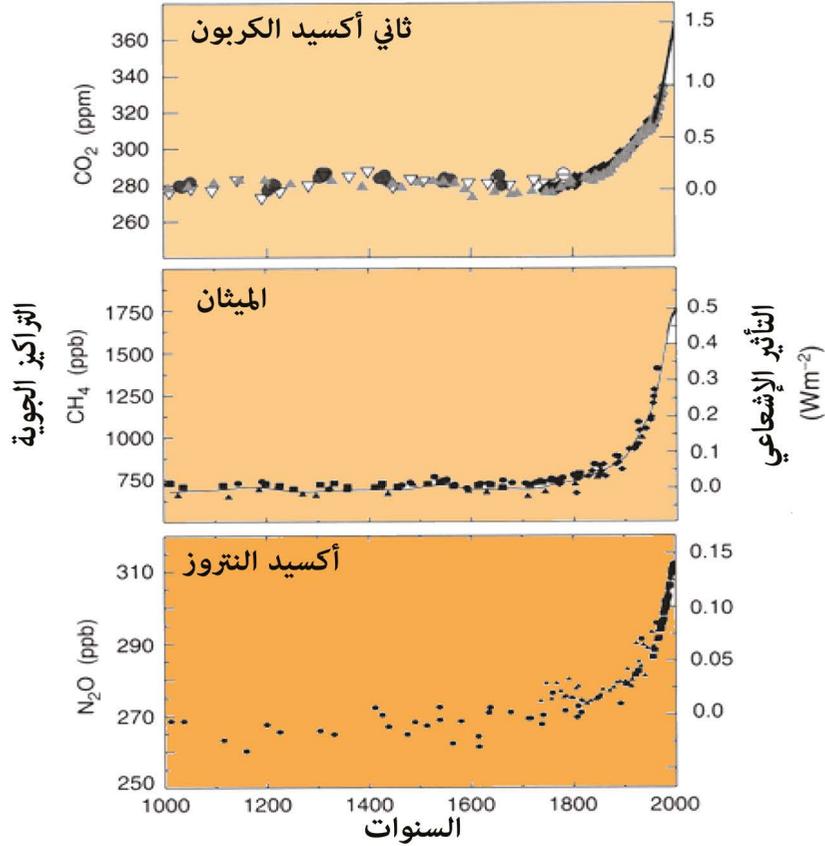
أحد المجالات القليلة المثيرة للجدل حول الاحتباس الحراري الذي يبدو أنه مقبول عالمياً هو أنه يوجد دليل واضح على أن مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي آخذة في الارتفاع منذ بداية **الثورة الصناعية**.

ذكرنا سابقاً أن القياسات الأولى لتركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بدأت في عام 1958 على ارتفاع نحو 4000 متر على قمة جبل ماونا لوا في هاواي. ويمكن دمج بيانات ثاني أكسيد الكربون هذه من مرصد ماونا لوا مع العمل **التفصيلي** على لب الجليد لإنتاج سجل كامل لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي منذ بداية **الثورة الصناعية**.

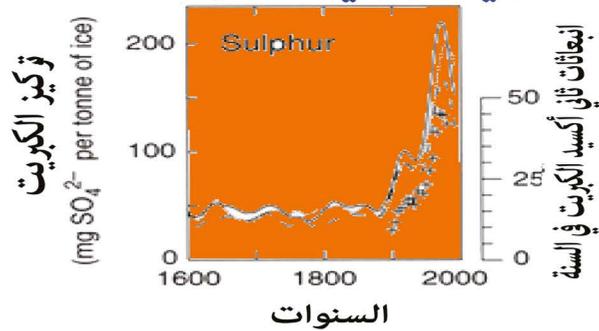




(a) تراكيز الغلاف الجوي العالمي لثلاثة من غازات الدفيئة المختلفة (a)



(b) الهباء الجوي الكبريتي المترسب على غرينلاند (b)



مؤشرات تأثير الإنسان على تكوين الغلاف الجوي خلال العصر الصناعي.





ما يوضحه هذا هو أن ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي قد زاد من تركيز ما قبل الصناعة بنحو 280 جزء من المليون بالحجم إلى أكثر من 370 جزءاً في المليون في الوقت الحالي، وهو ما يمثل زيادة قدرها **160 بليون** طن، مما يمثل زيادة إجمالية قدرها **30%**.

ترافقت هذه الزيادة في ثاني أكسيد الكربون مع ارتفاع درجة حرارة الأرض بمقدار 6 درجات مئوية حيث حرر العالم نفسه من قبضة العصر الجليدي الأخير. مع أن السبب النهائي لنهاية **العصر الجليدي** الأخير كان التغيرات في مدار الأرض حول الشمس، فقد أدرك **العلماء** الذين يدرسون المناخات الماضية **الدور المركزي** لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي باعتباره ردود فعل مناخية تترجم هذه الاختلافات الخارجية إلى تضاؤل في العصور الجليدية. إنه يوضح أن **مستوى التلوث** الذي تسببنا فيه بالفعل في **قرن واحد** يمكن مقارنته بالتغيرات الطبيعية التي **استغرقت آلاف السنين**.

• تأثير الاحتباس الحراري المعزز

يدور الجدل حول فرضية الاحتباس الحراري ما إذا كانت غازات الدفيئة الإضافية التي تُضاف إلى الغلاف الجوي ستعزز تأثير **الاحتباس الحراري** الطبيعي.

يجادل المتشككون في ظاهرة الاحتباس الحراري بأنه مع ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، إلا أن هذا لن **يتسبب** في الاحتباس الحراري، إما أن **التأثيرات** صغيرة جداً أو أن هناك ردود فعل طبيعية أخرى





ستواجه الاحترار الكبير. حتى لو أخذ المرء وجهة نظر غالبية **العلماء** وتقبل أن **حرق الوقود الأحفوري** سيؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة، فهناك نقاش مختلف حول مقدار ارتفاع درجات الحرارة بالضبط. ثم هناك نقاش حول ما إذا كان المناخ العالمي **سيسنجب** بطريقة خطية لغازات الدفيئة الإضافية أو ما إذا كانت هناك عتبة مناخية تنتظرنا.

يزيد تأثير الاحتباس الحراري المعزز من متوسط درجة حرارة سطح الأرض، مما يخلق تأثير الدومينو على العمليات غير الحية والحية الأخرى بحكم ترابطها البيئي وتفاعلها. جرى التعرف على هذا الارتباط منذ أكثر من 100 عام عندما تبين أن الزيادة في درجة حرارة السطح مرتبطة بزيادة **تركيزات** ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، وهي زيادة مرتبطة **باحتراق** الفحم كما ذكر الكيميائي السويدي **سفانتي أرينيوس** في عام 1896.

• غازات الاحتباس الحراري وتأثيرات الاحتباس الحراري

لقد صار مصطلح (تأثير الاحتباس الحراري) رائجاً لأن الغلاف الجوي يحمل تشابهاً في حبس الحرارة ضمن دفيئة زجاجية. في حالة عدم وجود أي تأثير للاحتباس الحراري، سيكون متوسط درجة حرارة سطح الأرض أكثر برودة بمقدار **33 درجة مئوية**. وقد كان الاحتباس الحراري بعد العصر الجليدي الأخير هو الذي جعل الزراعة والأنشطة الأخرى في الوقت الحاضر **ممكنة**.

لقد **شهدت** الأرض **العديد** من التغيرات المناخية عبر تاريخها. في المليون سنة الماضية، مرت الأرض بعدة دورات عرضية سببها أساساً دورانها حول الشمس. **الدورات** الثلاث الأكثر شيوعاً هي:

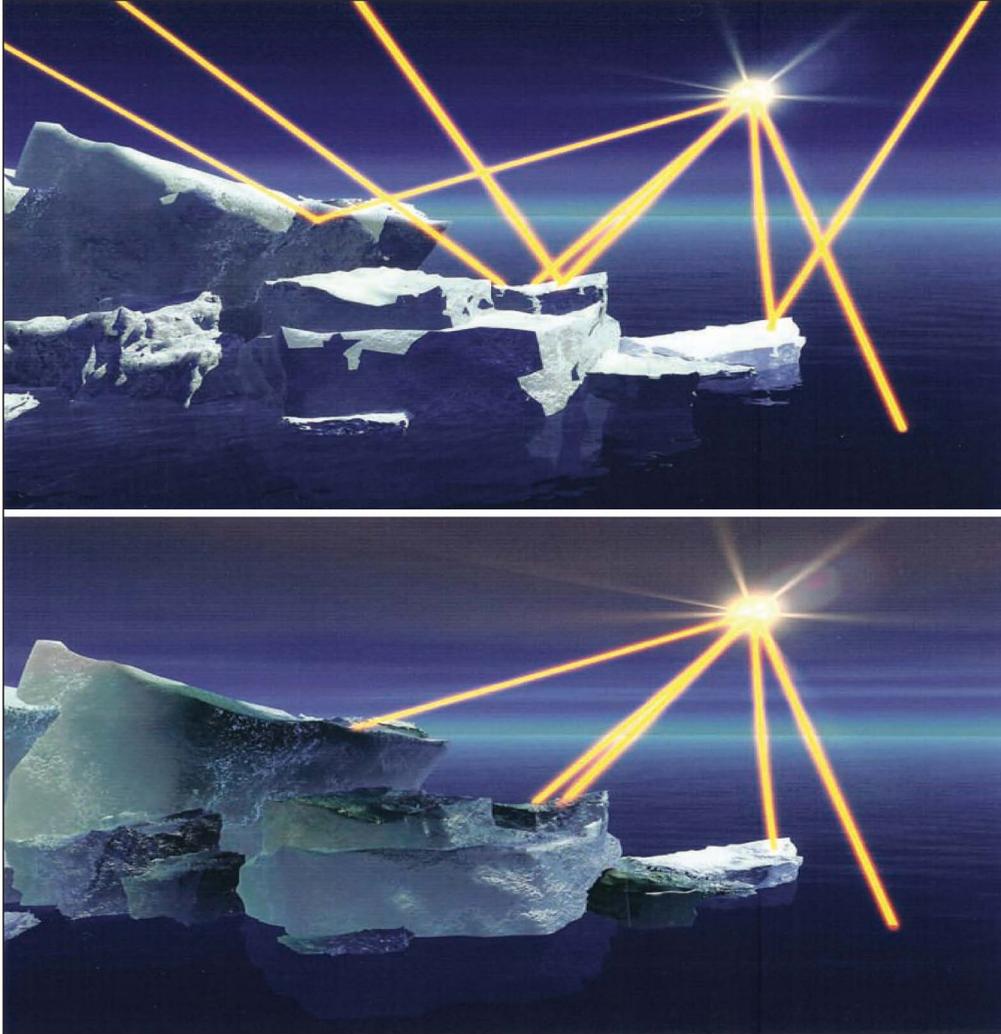




1. **الاختلاف المركزي Eccentricity**: وهو شكل مدار الأرض حول الشمس، مع دورية تبلغ نحو 100000 سنة.
2. **الميل المحوري Obliquity**: وهو ميل محور الأرض بالنسبة لمستوى مداره حول الشمس، مع فترات دورية تبلغ 40000 سنة.
3. **المبادرة Precession**: وهو (التذبذب البطيء) حيث تدور الأرض حول محورها، بمعدل دوري يبلغ نحو 23000 سنة.

يشار إلى هذه الدورات الثلاث باسم دورات ميلانكوفيتش. تؤثر دورات ميلانكوفيتش الثلاث معاً في الموسمية وموقع الطاقة الشمسية حول الأرض، وبالتالي تؤثر في التناقضات بين الفصول. وعندما تتزامن الدورات، تبدأ فترات البرد. من المهم **ملاحظة** أن الوضاءة أو العاكسية **Albedo**، وهو انعكاس إشعاع الشمس من سطح الأرض إلى الغلاف الجوي، **يعد متغيراً** مهماً في دورات التبريد.





(الصورة العليا) عندما يغطي الجليد والثلج الكوكب، تكون العاكسية مرتفعة. عندما يصل الإشعاع الشمسي الوارد إلى سطح الأرض، فإنه ينعكس عن الجليد والثلج ويرسل مرة أخرى إلى الغلاف الجوي للأرض، مما يحافظ على سطح الأرض بارداً. يمكن أن يكون هذا بمثابة ردود فعل إيجابية، وتشجيع المزيد من الثلج والجليد في البيئة الباردة. **(الصورة السفلى)** القاع: إذا بدأ الجليد الموجود على سطح الأرض في الذوبان أو صار مغطىً بالسحابة والملوثات الأخرى، فإنه يصير من الأسطح الداكنة. يعمل الإشعاع الشمسي الوارد على تسخين السطح الأكثر قتامة، مما يتسبب في ذوبان المزيد من الثلج والجليد. يؤدي هذا إلى بدء دورة من الذوبان المتزايد، ويشار إليها بالتغذية الراجعة السلبية.





• التاريخ الجيولوجي ودرجة الحرارة

في آخر 1.5 مليون سنة أو نحو ذلك، والمعروفة من الناحية الجيولوجية باسم (العصر الجليدي)، مرت الأرض بعدة فترات باردة، تسمى مجتمعة التجمعات الجليدية أو العصور الجليدية. كانت السمة المشتركة لجميع الكتل الجليدية هي أن أجزاء كبيرة من الأرض كانت مغطاة بصفائح جليدية. استمرت كل فترة جليدية لنحو 70000 - 100000 سنة، وتناوبت أربع مجموعات جليدية على الأقل مع فترات ما بين الجليدية من 10000 إلى 12000 سنة.

الزمن من العصر الجليدي الأخير (الهولوسين) هو الفترة التي نعيش فيها. يبدو أن متوسط درجات حرارة سطح الأرض خلال هذه الفترة قد تقلبت بشكل معتدل فقط، صعوداً أو هبوطاً بمقدار 0.5-1 درجة مئوية خلال فترات تتراوح بين 100 و 200 عام.

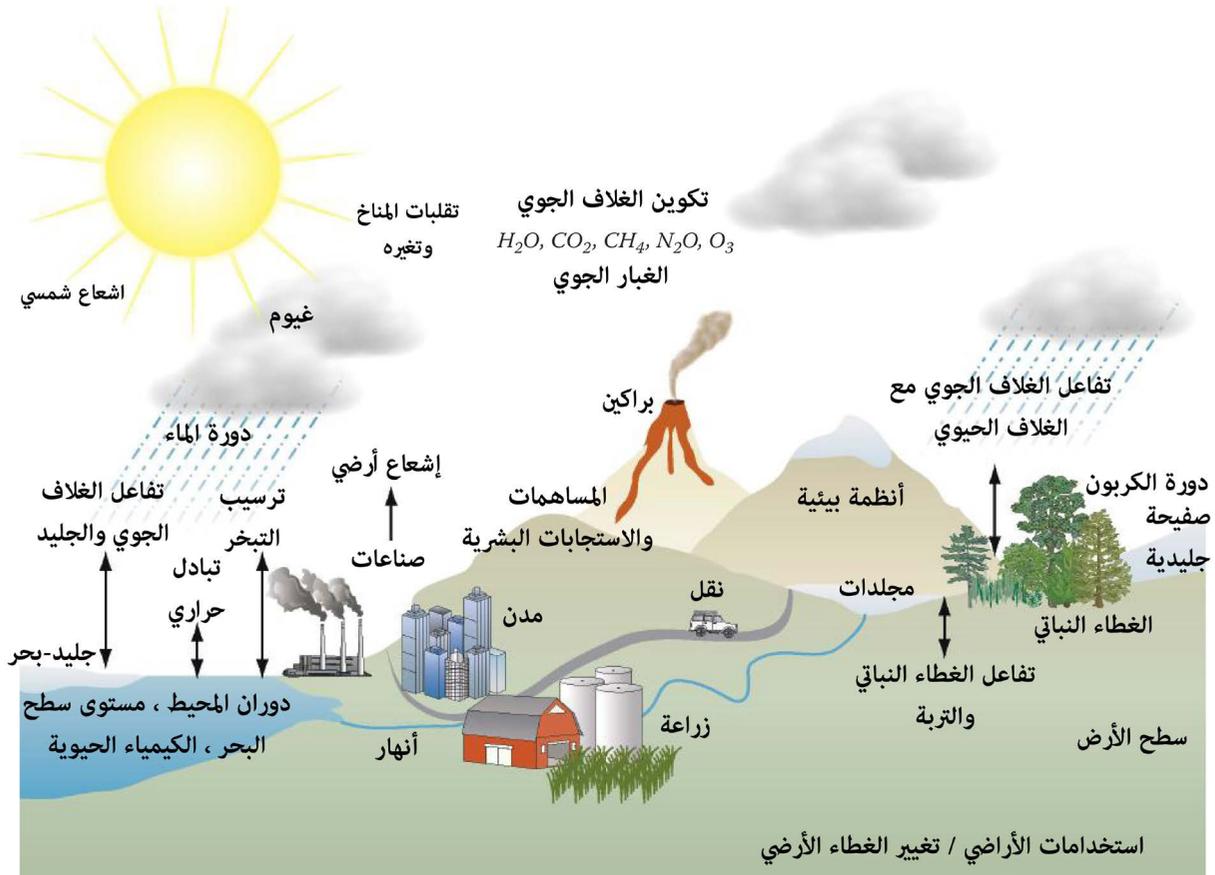
باستثناء الأحداث المناخية المحلية أو الإقليمية الشديدة، لم تكن هناك ظواهر رئيسية. وهكذا، خلق الاستقرار المناخي خلال الهولوسين درجة كبيرة من الثقة في العقل البشري فيما يتعلق بأنماط الطقس. على سبيل المثال، في المناخات المعتدلة، سيتبع فصل الشتاء دائماً الربيع، ثم الصيف، وأخيراً الخريف، مع تغيرات متوقعة إلى حد ما في درجات الحرارة لكل موسم.

تعتمد كمية الحرارة في الغلاف الجوي في الغالب على تركيزات غازات الاحتباس الحراري المختلفة المعروفة باسم غازات الاحتباس الحراري (GHGs). وتشمل هذه الغازات: ثاني أكسيد الكربون (CO2)، وبخار الماء (H2O)، غازات الاحتباس الحراري السائد، وأوزون التروبوسفير (O3)، والميثان (CH4)، وأكسيد النيتروز (N2O)، ومركبات الكربون الكلورية فلورية من صنع الإنسان.





غازات الدفيئة شفافة بالنسبة للإشعاع الشمسي قصير الموجة الوارد، ولكنها تمتص الأشعة الصادرة من الأشعة تحت الحمراء (الموجة الطويلة) المنبعثة من سطح الأرض والغلاف الجوي في مجال **7-19 ميكرومتر**. هذه الأشعة تحت الحمراء هي جزء من **(نافذة)** الغلاف الجوي والتي يتسرب من خلالها أكثر من **70%** من الإشعاع المنبعث من سطح الأرض إلى الفضاء.



المكونات الرئيسية لفهم النظام المناخي وتغير المناخ. يمثل المناخ العالمي التعبير العام عن العديد من العمليات التي تحركها الشمس والمحيطات والبحار والتي تغطي 71% من سطح الأرض و21% من مساحة اليابسة.





• ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة

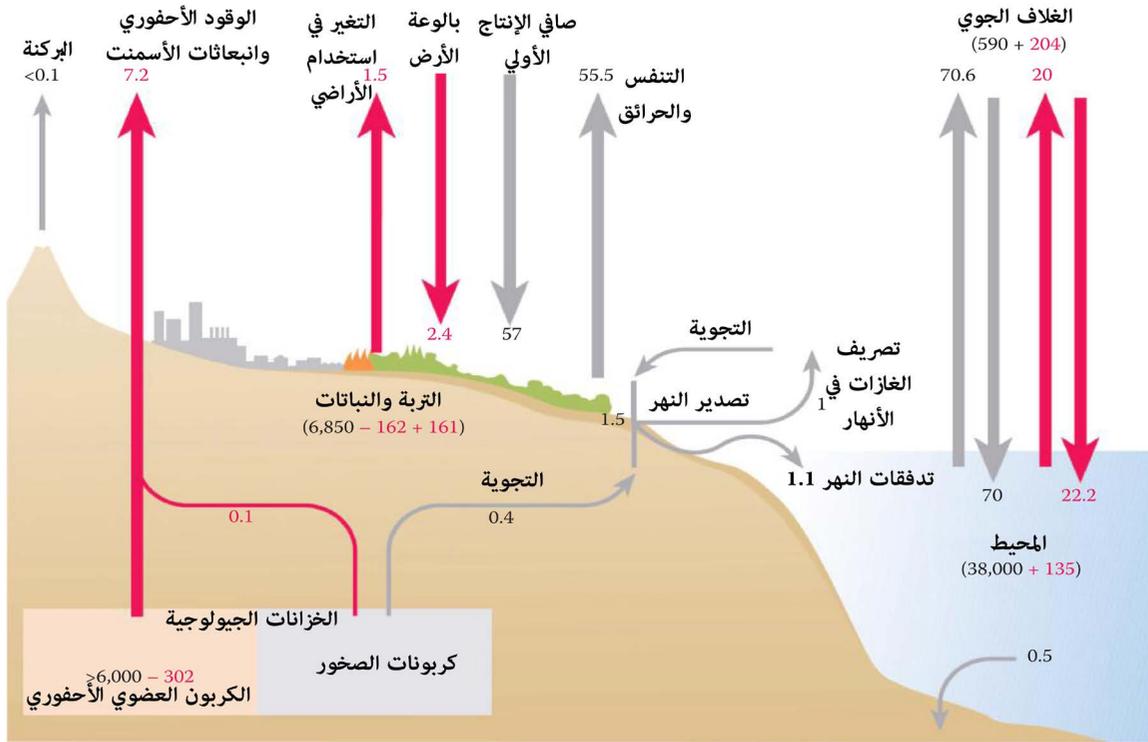
منذ الثورة الصناعية (على وجه الخصوص، السبعون سنة الماضية أو نحو ذلك)، كان معدل إطلاق غازات الدفيئة في الغلاف الجوي (من خلال استهلاك الوقود الأحفوري وتدهور وفقدان الغطاء النباتي والتربة) **أسرع** مما هو معروف في تاريخ البشرية.

يعتمد المعدل الذي سيستمر به الاحترار على انبعاثات غازات الدفيئة، وأوقات البقاء في المصارف المختلفة، والسرعة التي تنمو بها المصادر والمصارف (الحجز).

وهكذا، وخلال القرن الماضي، زاد متوسط درجة حرارة الهواء العالمية بنحو 0.6 درجة مئوية (± 0.2)، مع أن الزيادات في جزيئات الكبريتات التي تنتج **تأثيرات التبريد** (التأثير الإشعاعي السلبي).

وهكذا ولدت أول صلة واضحة بين الأنشطة البشرية والاحتباس الحراري: على وجه التحديد، الارتباط بين ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة. لقد تقدمت **معرفة**نا العلمية كثيراً في العقود القليلة الماضية لتسليط الضوء على العوامل التي تؤثر في نظام المناخ العالمي وفي **القياس الكمي** لدورة الكربون.





دورة الكربون العالمية (2000-2005): تجمعات الكربون بليون طن متري وهي بين قوسين. التدفقات السنوية ببلايين الأطنان من الكربون سنوياً. تظهر التجمعات والتدفقات في الخلفية أو ما قبل الإنسان باللون الأسود. يظهر الاضطراب البشري لحمامات السباحة وتدفعها باللون الأحمر.

يبدو أن أفعالنا - بشكل متزايد - لا تقتصر على المعرفة العلمية بقدر ما هي مقيدة بالاعتبارات الاقتصادية والسياسية والاجتماعية.

لا يمكن **استيعاب** التغيرات المناخية دون مخاطر. يتمثل أكبر تهديد لإنتاج الغذاء البشري والغطاء النباتي والحياة البرية والنظم الاقتصادية في تغير المناخ السريع الذي قد **ينطوي** على ارتفاع درجات قليلة فقط في متوسط درجة حرارة الهواء على الأرض على مدى **بضعة عقود قصيرة**.



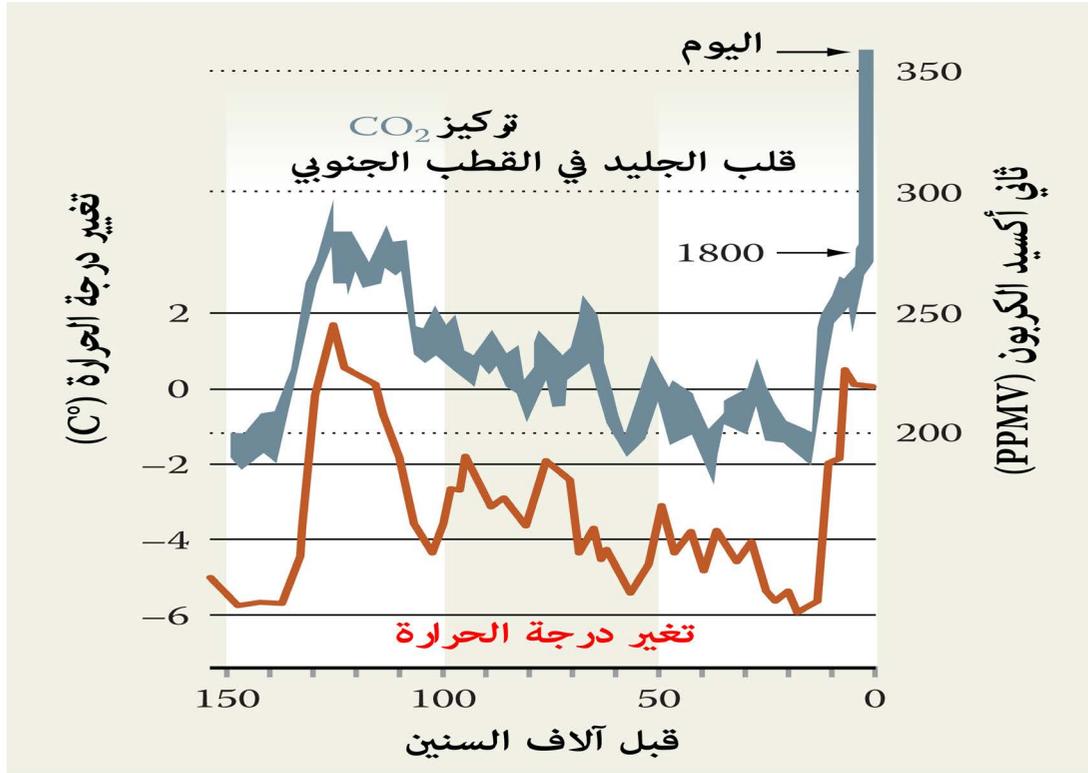


وكلما زادت سرعة حدوث مثل هذا التغيير، قل استعداد الكائنات الحية للتكيف مع هذه الظروف البيئية المتغيرة. وبالتالي، تصير درجة الحرارة والمناخ والتركيب الكيميائي لطبقة التروبوسفير والستراتوسفير عوامل مُهمّة جداً في تحديد متوسط درجة حرارة الغلاف الجوي للأرض.

لإنشاء علاقات واضحة بين تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ودرجة حرارة سطح الأرض، يحتاج المرء إلى سجلات مفيدة لكلا العاملين. وفي ظل غيابها، جرى إنشاء **علاقة تاريخية** بناءً على دراسات ألباب الجليد التي حصل عليها **العلماء** من الأنهار الجليدية من أجزاء كثيرة من العالم.

استكملت هذه الدراسات بفك رموز المناخ والظروف الجوية باستخدام النوى المأخوذة من أقدم الأشجار، وهو مجال موضوع يسمى **علم تحديد أعمار الأشجار Dendrochronology**. يكشف تجميع هذه البيانات عن وجود علاقة وثيقة بين تركيز ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة **خلال** الـ 150000 سنة الماضية.

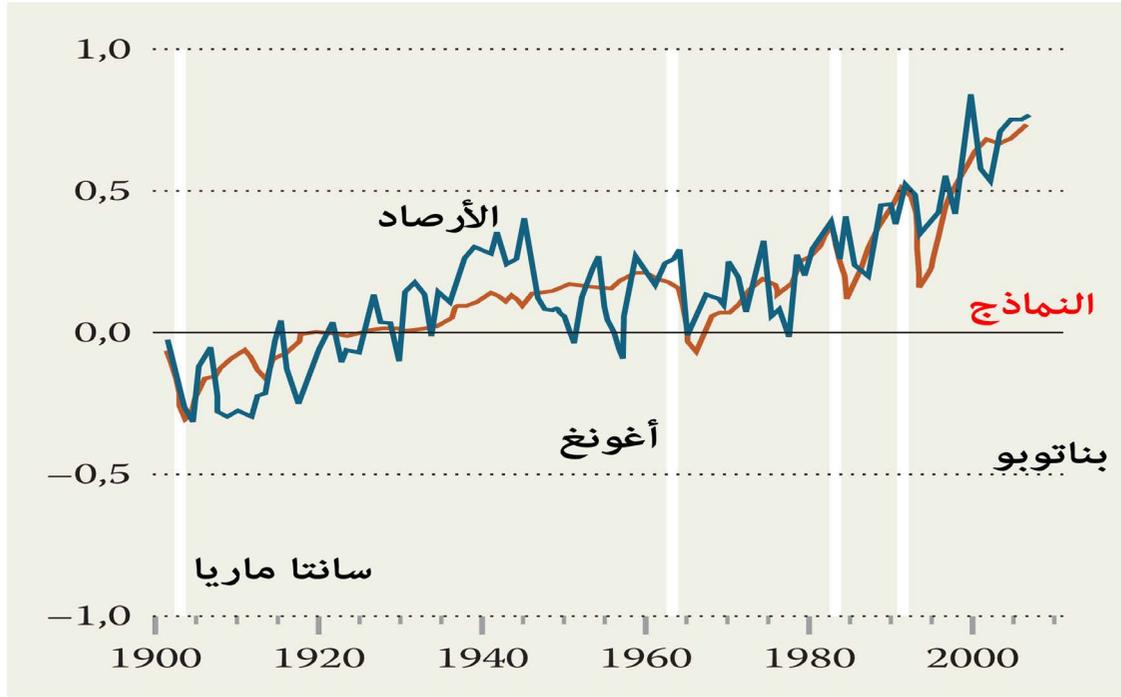




العلاقة التاريخية بين درجة حرارة الهواء العالمية وتركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي.

استناداً إلى قراءات مقياس الحرارة على مدار المائة عام الماضية، يبدو أن العلاقة المباشرة بين ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة قد تأكدت. لاحظ في الشكل الآتي أن درجات الحرارة قد انخفضت مع الانفجارات البركانية: **سانتا ماريا** في سلسلة **جبال سييرا مادري** في **غواتيمالا** في عام 1902؛ وأغونغ في **بالي**، **إندونيسيا**، في عام 1963؛ و**بيناتوبو** في سلسلة **جبال زامباليس** بالفلبين في عام 1991.

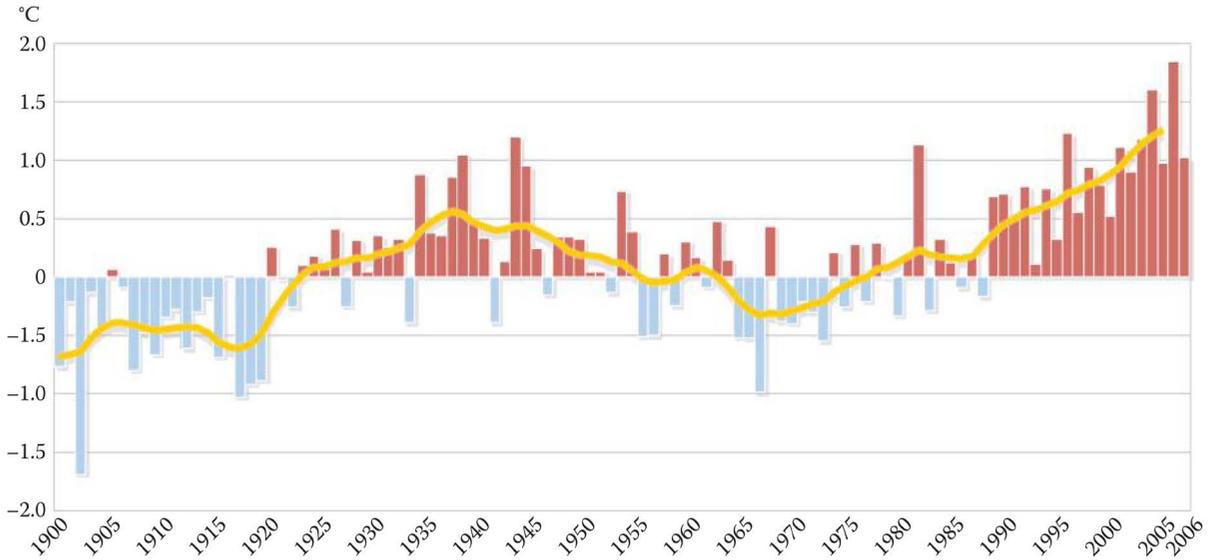




ارتفاع في درجة حرارة الغلاف الجوي للأرض خلال الفترة من 1990 إلى 2005. كانت الزيادة في درجة الحرارة 0.7 درجة مئوية، ومع ظهور الانفجارات البركانية سانتا ماريا وأغونغ وبيئاتوبو مما أدى إلى تبريد الأرض مؤقتاً.

وذلك لأن الانفجارات البركانية تنفث الغبار والغازات (بشكل أساسي ثاني أكسيد الكبريت). تختلط هذه الغازات مع بخار الماء في الغلاف الجوي ويعكس الهباء الجوي والضباب الناتج بعضاً من إشعاع الشمس، مما يتسبب في تأثير التبريد وخفض درجة الحرارة. تظهر البيانات من **السنوات الخمس والعشرين الماضية** أو نحو ذلك بوضوح أنه مع ارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون وغازات **الدفيئة الأخرى**، ارتفعت درجة الحرارة، لا سيما في **نصف الكرة الشمالي**.





متوسط التغير السنوي في درجات الحرارة في القطب الشمالي (بين 60 و90 درجة شمالاً) بين عامي 1990 و2006؛ يمثل خط الصفر متوسط درجات الحرارة بين عامي 1961 و1990.

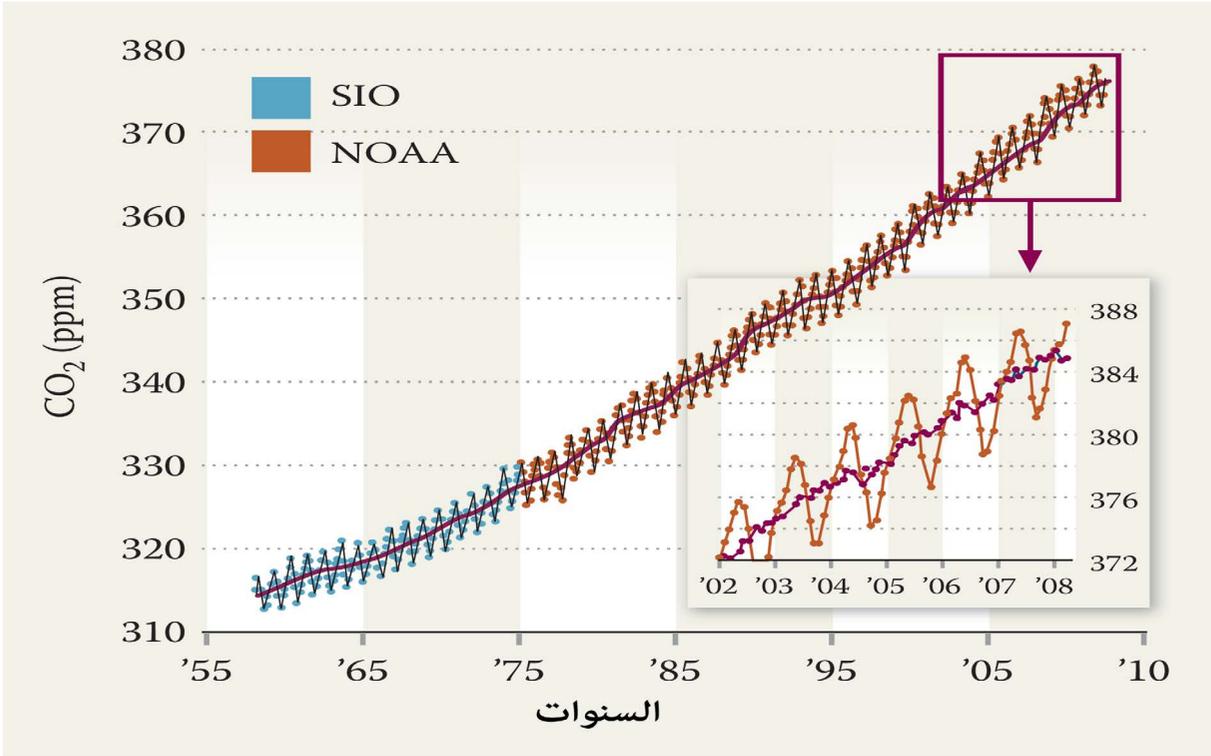
• الدليل على زيادة ثاني أكسيد الكربون

يجب أن تبدأ أي مناقشة حول ثاني أكسيد الكربون في السياق البيئي الحالي بالعمل الدقيق لعالم معهد سكريبس ديفيد كيلينغ. فقد سجل تقلبات موسمية وسنوية في تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في ماونا لوا، هاواي. ربما يكون رسمه التوضيحي، المعروف باسم **منحني كيلينغ**، المثال الأكثر ذكراً وتميزاً لتغير ثاني أكسيد الكربون في **الغلاف الجوي**. يوضح المنحني أن تركيزات ثاني أكسيد الكربون ارتفعت، دون استثناء، منذ أن بدأ **كيلينغ** قياساته في عام 1958، وعندما يكون التمثيل الضوئي في أقصى حد له في الصيف شمال خط الاستواء (**مع معظم كتلة اليابسة**)، يكون ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي منخفض ويزداد في الشتاء.





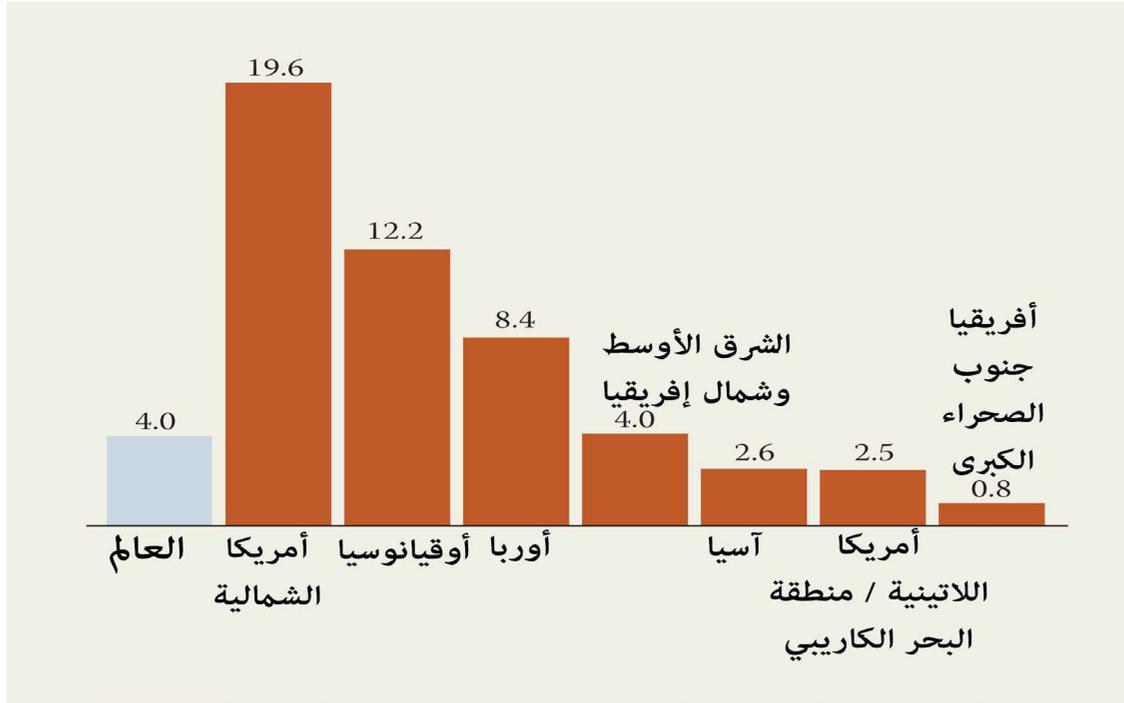
التغيرات المناخية والاحتباس الحراري



منحني كلينغ بصورة أكثر تفصيلاً. الاتجاهات الحديثة لثاني أكسيد الكربون في ماونا لوا، هاواي. معمل أبحاث نظام الأرض في الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي، قسم الرصد العالمي.

أظهرت القياسات في السنوات الأخيرة أن زيادات ثاني أكسيد الكربون تأتي في الغالب من البلدان المتقدمة والصناعية. مع أن نصيب الفرد من انبعاثات الكربون العالمية متواضع، إلا أن **أمريكا الشمالية** تتصدر العالم من حيث نصيب الفرد من الانبعاثات.





يظهر نصيب الفرد من انبعاثات الكربون في العالم لعام 2002 الفجوة بين البلدان المتقدمة والبلدان النامية.

يُظهر استهلاك الوقود الأحفوري أنه في الولايات المتحدة، كما هو الحال في جميع البلدان الأخرى تقريباً، تأتي انبعاثات الكربون بشكل أساسي من النقل وتوليد الكهرباء، وبالإضافة إلى قطاعي الصناعة والنقل، تسهم الزراعة واستخدام الأراضي والحراثة و**توليد النفايات** بشكل كبير في انبعاث ثاني أكسيد الكربون وكذلك في انبعاثات الميثان وأكسيد النيتروز. في الولايات المتحدة، **انخفضت المستويات الإجمالية** لأكاسيد النيتروجين، وثاني أكسيد الكربون، والمركبات العضوية المتطايرة غير الميثانية (NMVOCs)، وثاني أكسيد الكبريت (SO₂) بشكل كبير.



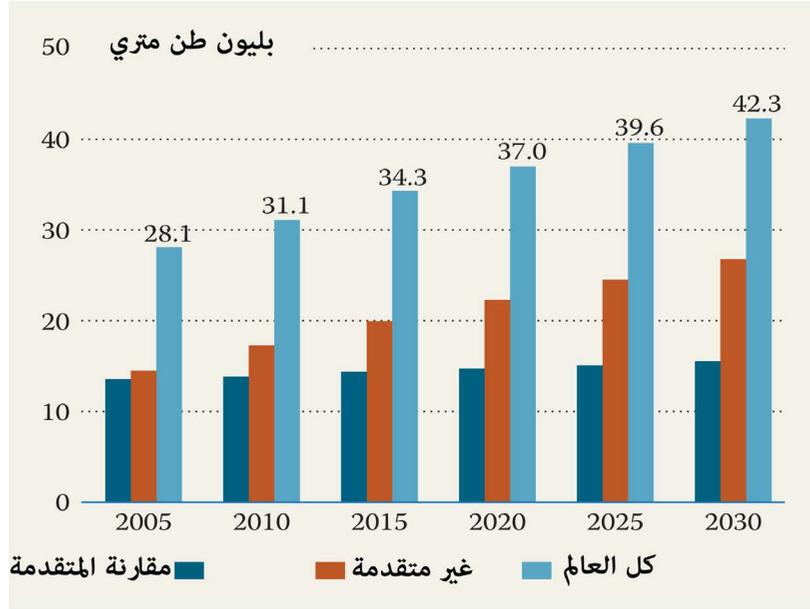


بشكل عام، كانت الولايات المتحدة والصين وروسيا واليابان والهند وألمانيا والمملكة المتحدة وكندا وإيطاليا وكوريا الجنوبية أكبر مصادر العالم لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة **بالوقود الأحفوري**، حيث أنتجت 64 % من الإجمالي العالمي في عام 1998. كان استهلاك البترول (43 %) والفحم (36 %) والغاز الطبيعي (21 %) المصدر الرئيسي لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون في العالم. **يحتوي الفحم** على أعلى كمية من الكربون لكل وحدة طاقة، وتتجاوز البترول والغاز الطبيعي بنسبة 25 و 45 % **على التوالي**.

على الصعيد العالمي، بلغ إجمالي التدفق الصافي للكربون إلى الغلاف الجوي من التغيرات في استخدام الأراضي **124 غيغا طن** من الكربون من عام 1850 إلى عام 1990، وزاد معدل التدفق من نحو **0.4 غيغا طن** كربون في عام 1850 إلى **2.0 غيغا طن** كربون في عام 1990. مساهمات تغيرات استخدام الأراضي إلى أن بلغ إجمالي التدفق الصافي لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي **68 %** من التوسع الزراعي و**13 %** عن طريق حرق الكتلة الحيوية.

زاد تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من نحو 285 جزءاً في المليون بالحجم (ppmv) في عام 1850 إلى أكثر من 380 جزءاً من المليون في عام 2007 (**33 %**). في عام 2005، كانت انبعاثات الكربون في الغلاف الجوي أكثر من **28 بليون طن** متري وجاءت بالتساوي من البلدان المتقدمة والنامية.





انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في العالم 2030-2005 (بالأطنان المترية) بمقارنة البلدان المتقدمة (منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي) والبلدان النامية (غير الأعضاء في منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي).

بحلول عام 2030، ستأتي الانبعاثات العالمية التي تزيد على 42 بليون طن في الغالب من البلدان النامية (غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية)، مع تصدر الصين والهند للانبعاثات.

شكلت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ما بين عامي 1994 - 1498 طن متري (81.5%) من إجمالي انبعاثات غازات الدفيئة في الولايات المتحدة، أي ما يعادل 1834 مليون طن من الكربون. وشكل حرق الوقود الأحفوري 98% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وباقي الغازات التي تأتي من الأنشطة الصناعية، مثل: إنتاج الأسمت، وحرق الغاز الطبيعي، والجير، والحجر الجيري، والحديد، والصلب، ورماد الصودا، ومدافن النفايات. قد توفر إعادة تشجير الغابات مصرفاً جيداً، ولكن يجب أن يؤخذ في الاعتبار أن امتصاص الأشجار يتضاءل مع نضوج الغابات.





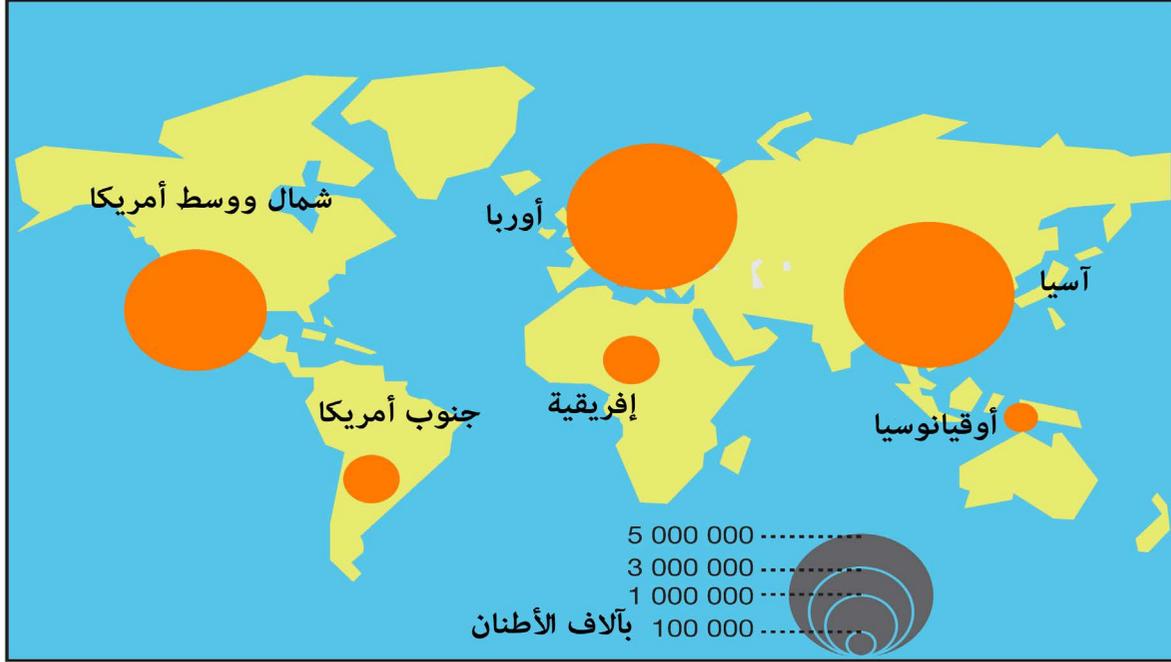
• من الذي ينتج التلوث؟

لقد أنشئت اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ لإنتاج أول اتفاقية دولية للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري العالمية. ومع ذلك، فإن هذه المهمة ليست بهذه البساطة كما تبدو **للهولة الأولى**، لأن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لا تنتجها البلدان بالتساوي.

المصدر الرئيسي الأول لثاني أكسيد الكربون هو حرق الوقود الأحفوري، حيث يأتي جزء كبير من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من استهلاك الطاقة والعمليات الصناعية والنقل. هذا المصدر ليس موزعاً بالتساوي في جميع أنحاء العالم بسبب التوزيع غير المتكافئ للصناعة؛ وبالتالي، فإن أي اتفاق من شأنه أن يؤثر في اقتصادات بعض البلدان أكثر من غيرها.

وبالتالي، وفي الوقت الحالي، يجب أن تتحمل البلدان الصناعية المسؤولية الرئيسية عن خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون إلى نحو 22 بليون طن من الكربون سنوياً. **تبعث** من أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا أكثر من 90% من ثاني أكسيد الكربون المنتج صناعياً على مستوى العالم. علاوة على ذلك، فقد أطلقوا تاريخياً **انبعاثات** أكثر بكثير من البلدان **الأقل نمواً**.





انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بسبب العمليات الصناعية في العالم.

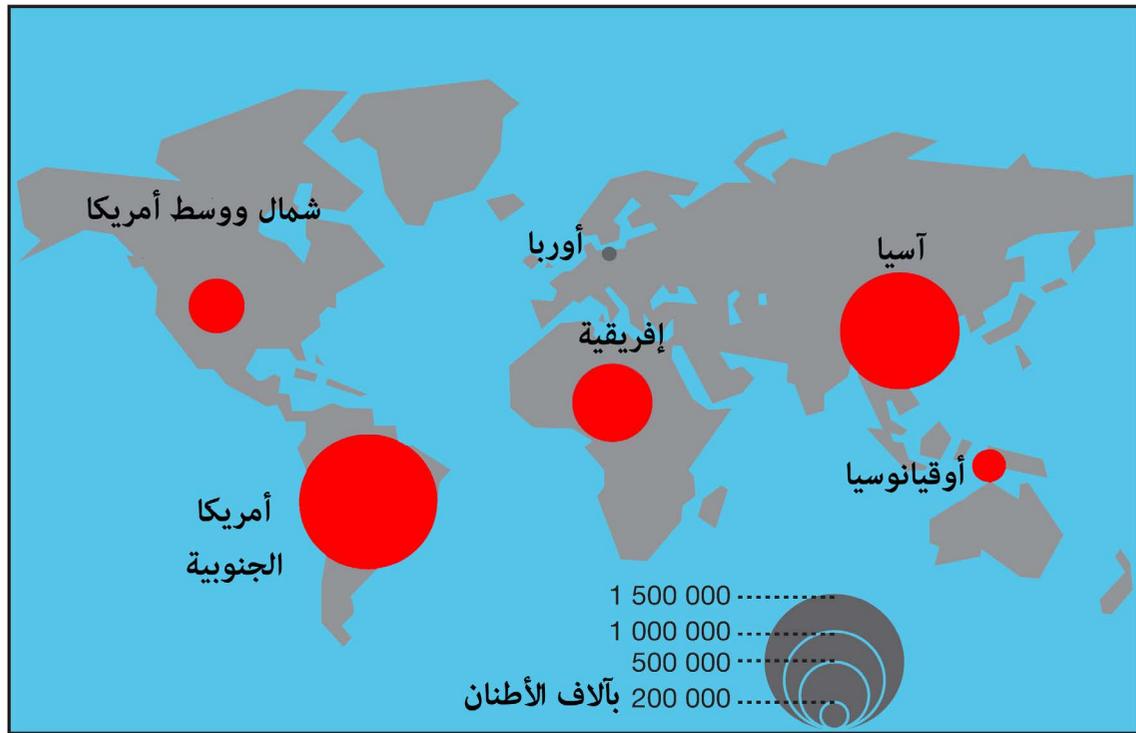
المصدر الرئيسي الثاني لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون هو نتيجة للتغيرات في استخدام الأراضي. **تأتي** هذه الانبعاثات بشكل أساسي من قطع الغابات لأغراض الزراعة أو التحضر أو الطرق.

عندما تُقطع مساحات كبيرة من الغابات المطيرة، غالباً ما تتحول الأرض إلى أراضٍ عشبية أقل إنتاجية مع قدرة أقل بكثير على تخزين ثاني أكسيد الكربون. يختلف نمط **انبعاثات** ثاني أكسيد الكربون هنا، حيث تكون أمريكا الجنوبية وآسيا وأفريقيا مسؤولة عن أكثر من **90%** من انبعاثات تغير استخدام الأراضي الحالية، أي نحو **4 بلايين** طن من الكربون سنوياً.





ومع ذلك، ينبغي النظر إلى هذا مقابل الحقيقة التاريخية المتمثلة في أن أمريكا الشمالية وأوروبا قد غيرتا بالفعل مشهدهما بحلول بداية القرن العشرين. من حيث كمية ثاني أكسيد الكربون المنبعثة، لا تزال العمليات الصناعية تفوق بشكل كبير التغيرات في استخدام الأراضي.



انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بسبب تغير استخدام الأراضي.





مصادر ومصارف الكربون

أحد الأسئلة المهمة هو أين يذهب ثاني أكسيد الكربون (والغازات الأخرى أيضاً) بعد أن يدخل الغلاف الجوي. من المهم أيضاً أن نسأل عما إذا كان هذا الغاز وغيره لديه وقت مكوث طويل، فماذا ستكون الاستجابة التراكمية للتراكمت المزممة بمرور الوقت؟ أخيراً، ما مدى جدية ردود الفعل الإيجابية الخارجة عن سيطرة الإنسان (يشار إليها مؤخراً باسم نقطة التحول Tipping Point)؟

في ظل الظروف الطبيعية العادية - أي مع الحد الأدنى من الانبعاثات من الأنشطة البشرية - تكون دورة الكربون متوازنة إلى حد ما مع تبادل النصف مع المحيطات والبحار والنصف الآخر مع الغطاء النباتي والتربة. وبالتالي، لتقدير تأثير الانبعاثات التي يسببها الإنسان، فقد جرى تصور دور الكربون كمشكلة مصدر وتصريف ويمكن قياسه على هذا النحو.

يوجد ثلاثة مصادر ومصارف:

- **الأول هو المحيطات.** بشكل عام، يكون نصف التمثيل الضوئي في الطبيعة من العوالق النباتية والنصف الآخر من اليابسة. تمتص المحيطات كل عام 92.4 غيغا طن من الكربون وتطلق 90 غيغا طن، وتخزن 2.4 غيغا طن ككربون غير عضوي مذاب في أعماق المحيط.
- **الثاني هو التربة.** تمتص تربة العالم كل عام 50 غيغا طن من الكربون من النباتات المحتضرة وتطلق 50 غيغا طن من خلال التحلل. على مدى آلاف السنين، تراكم في تربة العالم 1500 غيغا طن من الكربون، منها 500-800 غيغا طن محتجزة في أراضي الخث (وهي نباتات متفحمة توجد بالأراضي

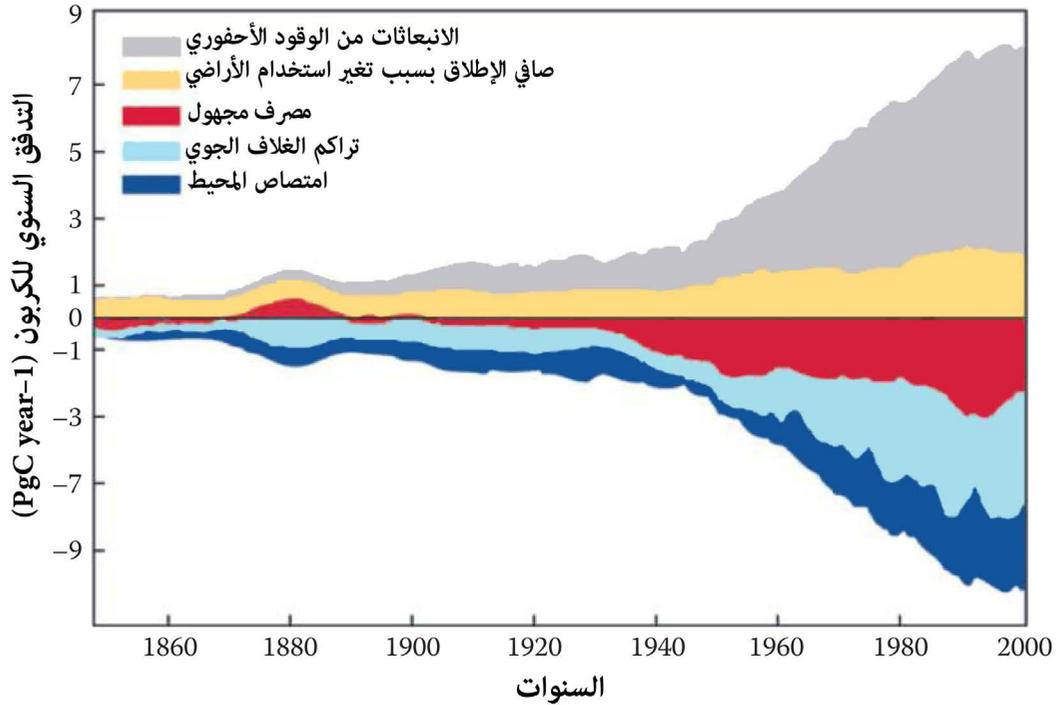




الغدقة في المناطق المعتدلة) في العالم، بما في ذلك 500 غيغا طن في التندرا القطبية الشمالية.

- **الثالث هو الغطاء النباتي.** تخزن الغابات والنباتات في العالم نحو 550 غيغا طن من الكربون، 40% منها في الغابات الاستوائية. تفقد الغابات كل عام 50 غيغا طن من الكربون في التربة و50 غيغا طن في الغلاف الجوي من خلال التنفس؛ ومع ذلك، فإنها تمتص 101.5 غيغا طن من الغلاف الجوي، مما يقلل من حملها بمقدار 1.5 غيغا طن. لا يمكن عزل جميع انبعاثات الكربون الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري واضطرابات الأرض الأخرى، مما يترك نحو 3 غيغا طن سنوياً في الغلاف الجوي.





المصادر والمصارف السنوية للكربون من عام 1850 إلى عام 2000 لميزانية كربون متوازنة (إجمالي المصادر متوازنة بمجموع المصارف). المصرف المجهول هو بالوعة أرضية متبقية.

• غازات الدفيئة الأخرى

1. بخار الماء

بخار الماء هو أكثر غازات الدفيئة وفرة وانتشاراً. في رأي البعض، فإن هذا الغاز هو المسؤول عن معظم **الاحترار**. هذا الرأي لا تشاركه الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. يرجع معظم بخار الماء في الغلاف الجوي إلى الدورة **الهيدرولوجية**. مع أن النشاط البشري لا يرتبط ارتباطاً مباشراً بتركيز بخار

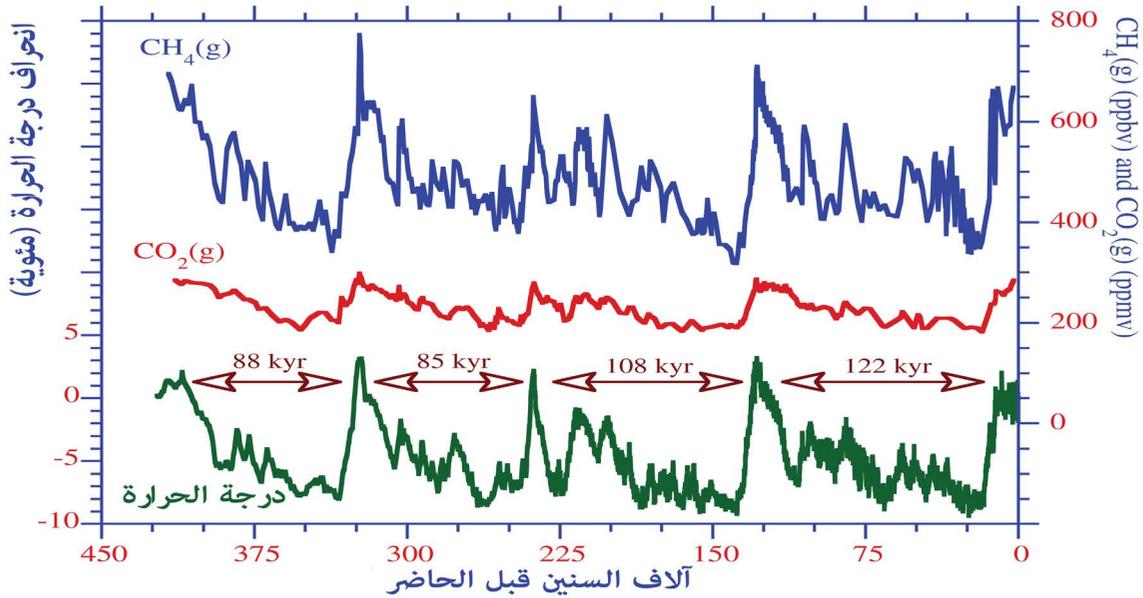




الماء في الغلاف الجوي، إلا أن حالته وخطه ووفرة وخصائصه الإشعاعية تتأثر بغازات الدفيئة الأخرى.

2. الميثان (CH₄)

يُعزى ما يقرب من 20% من إجمالي التأثير الإشعاعي المباشر لغازات الدفيئة (245 ميكرومتر -2) إلى الميثان، وهو ثاني أكبر مساهم في انبعاثات غازات الدفيئة البشرية المنشأ. منذ منتصف القرن الثامن عشر الميلادي، زاد تركيز الميثان في الغلاف الجوي بنحو 143% من 722 جزءاً في البليون (ppb) إلى 1774 جزء في البليون في 2005.



تغيرات الميثان وثاني أكسيد الكربون ودرجات الحرارة من لب جليد فوستوك على مدى 425000 إلى 450000 سنة الماضية. ترتبط التغيرات في درجات الحرارة بدرجة حرارة الهواء السطحي الحديثة فوق الجليد البالغة 55 درجة مئوية تحت الصفر.





البكتيريا التي تحلل المواد العضوية في البيئات الفقيرة بالأكسجين (**اللاهوائية**) تنتج **غاز الميثان** الذي يبقى في الغلاف الجوي لمدة 12-17 سنة. كل جزيء من الميثان أكثر فاعلية بنحو 25 مرة في **حبس الحرارة** في الغلاف الجوي من جزيء **ثاني أكسيد الكربون** على مدى 100 عام من الأفق (وبالتالي، فإن قيمة الاحترار العالمي للميثان هي 25). شكلت انبعاثات الميثان **10%** من إجمالي انبعاثات غازات الدفيئة في الولايات المتحدة.

المصادر البشرية في الولايات المتحدة هي الأنشطة الزراعية مثل حقول الأرز والتخمير المعوي وإدارة **السماد الطبيعي** وحرق المخلفات الزراعية (**33%**)؛ ومدافن النفايات (**32%**)؛ الأنشطة المتعلقة بالوقود الأحفوري مثل الغاز الطبيعي وأنظمة البترول، و**تعددين الفحم**، وإنتاج البتروكيماويات (**32%**)؛ والمصادر الثابتة والمتنقلة (**2%**)؛ ومعالجة مياه الصرف الصحي (**1%**).

يمثل استخدام الوقود الأحفوري والزراعة والتخلص من النفايات أكثر من **50%** من غاز الميثان في الغلاف الجوي. وقد تفوقت الثروة الحيوانية (التخمير المعوي في الماشية بشكل أساسي) على زراعة الأرز في أوائل الثمانينيات كمصدر زراعي رائد.

3. أكسيد النيتروز (N_2O)

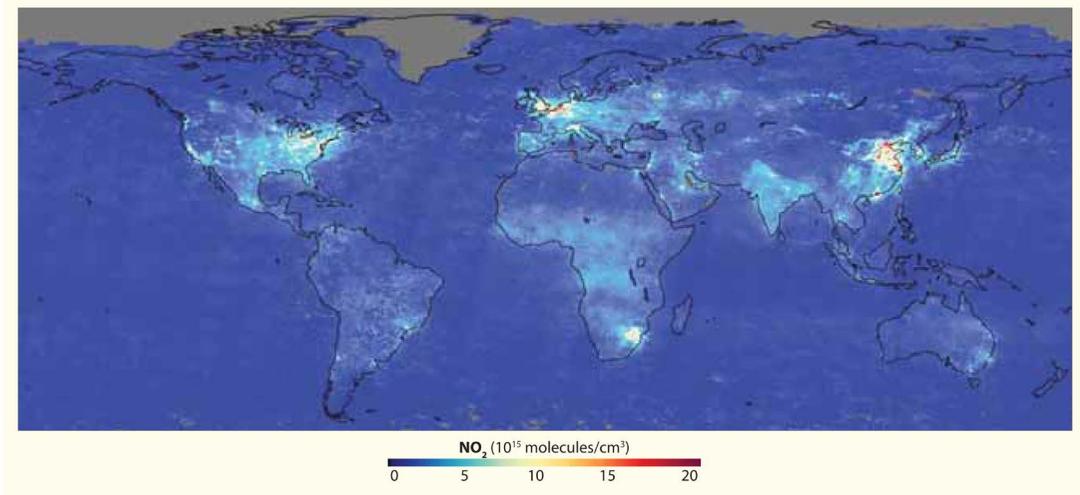
زاد تركيز **أكسيد النيتروز N_2O** في الغلاف الجوي بنسبة **18%**، من 270 جزء في **البليون** في عام 1750 إلى 319 جزء في **البليون** في عام 2005. حيث أطلق من خلال أنشطة بشرية مثل احتراق الوقود **الأحفوري** والنفايات الصلبة، وتحلل **الأسمدة النيتروجينية**، ونفايات الماشية، و**المياه الجوفية الملوثة**، وحرق الكتلة الحيوية، ويسهم **أكسيد النيتروز** بنحو **6%** من غازات الدفيئة. يبلغ





متوسط وقت مكوثه في طبقة **التروبوسفير** نحو 120 عاماً. تبلغ القدرة على إحداث الاحترار العالمي لكل جزيء **أكسيد النيتروز** من نحو 298 ضعفاً من ثاني أكسيد الكربون على مدى 100 عام في الأفق.

تعتبر جميع أكاسيد **النيروجين** الغازية مُهمّة إشعاعياً وكيميائياً وبيئياً، كما أن تبادلها عبر حدود التربة والجو يرتبط بشكل مباشر أو غير مباشر بأحداث مثل ترسب الحمض، والاحتباس الحراري، ونضوب الأوزون **O3** في الستراتوسفير، وتلوث المياه الجوفية، وإزالة الغابات، وحرق الكتلة الحيوية. في حين أن التفاعل العالي لأكاسيد **النيروجين (NO + NO2)** هو أحد العوامل، فإن العواقب الجوية العالمية المُهمّة لتبادل أكسيد النيتروز تنتج من عمره الطويل وخصائصه الطيفية.



تظهر هذه الصورة عام 2003 مواقع مستويات عالية من ثاني أكسيد النيتروجين (**NO2**) في جميع أنحاء العالم. تميل التركيزات العالية من ثاني أكسيد النيتروجين إلى الارتباط بالمناطق الحضرية أو الصناعية الكبيرة. في إفريقيا، تكون تركيزات ثاني أكسيد النيتروجين عالية بشكل خاص فوق محطات الطاقة التي تعمل بالفحم في جنوب إفريقيا. يمكن رؤية تركيزات الغاز الأقل، ولكنها واسعة النطاق - الناتجة عن حرق الكتلة الحيوية - في معظم أنحاء القارة الأفريقية.





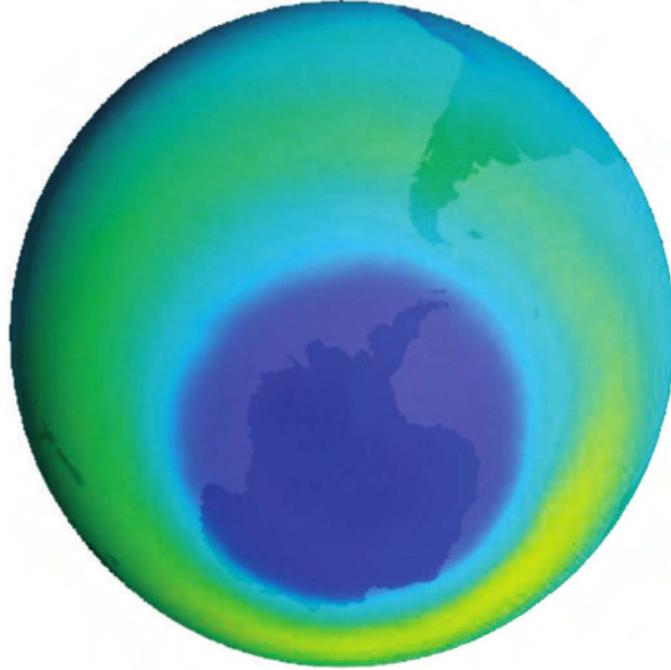
شكلت انبعاثات أكسيد النيتروز في عام 1998 6.4 % (ارتفاعاً من 5.7 % في عام 1992) من إجمالي انبعاثات غازات الدفيئة في الولايات المتحدة؛ الأنشطة الزراعية، مثل إدارة التربة والسماد الطبيعي، وحرق المخلفات تمثل 74 % والأنشطة المتعلقة بالطاقة لنحو 18 %.

4. مركبات الكلوروفلوروكربون وبدائلها

تشمل غازات الدفيئة التي لا تحدث بشكل طبيعي المنتجات الثانوية لمركبات الكلوروفلوروكربون، وكذلك مركبات الكربون الهيدروفلورية (HFCs) ومركبات الكربون المشبعة بالفلور (PFCs) وسداسي فلور الكبريت (SF6) المتولدة عن العمليات الصناعية.

مركبات الكربون الهيدروفلورية ومركبات الكربون المشبعة بالفلور هي فئات من المواد الكيميائية الاصطناعية التي جرى إدخالها كبدايل للمواد المستفدة للأوزون والتي يتم التخلص منها تدريجياً بموجب قوانين دولية ووطنية جديدة. بالإضافة إلى استخدامها كبدايل للمواد المستفدة للأوزون، تتبع هذه الغازات من إنتاج الألومنيوم، وإنتاج الهيدروكلوروفلوروكربون (HCFC-22)، وتصنيع أشباه الموصلات، ونقل وتوزيع الكهرباء، وإنتاج المغنيسيوم ومعالجته.





ثقب الأوزون في القطب الجنوبي الناجم عن تراكم مركبات الكلوروفلوروكربون الاصطناعية، كما ينعكس في توزيع الأوزون المتكامل رأسياً على خطوط العرض العالية لنصف الكرة الجنوبي في سبتمبر 2000. يمثل التظليل الأزرق قيمياً مخفضة بشكل كبير للأوزون الكلي بالنسبة للمنطقة المحيطة بها باللون الأخضر والأصفر.

اعتماداً على النوع، تبقى مركبات **الكلوروفلوروكربون** في الغلاف الجوي لمدة 60 إلى 400 سنة ويكون تأثيرها بشكل عام من 5000 إلى 10000 مرة لكل جزيء على الاحتباس الحراري مقارنة بثاني أكسيد الكربون. شكلت مركبات الكربون **الهيدروفلورية**، ومركبات الكربون **المشبعة بالفلور**، و**سادس فلوريد الكبريت** في عام 1998 نسبة 2% من إجمالي انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في الولايات المتحدة.

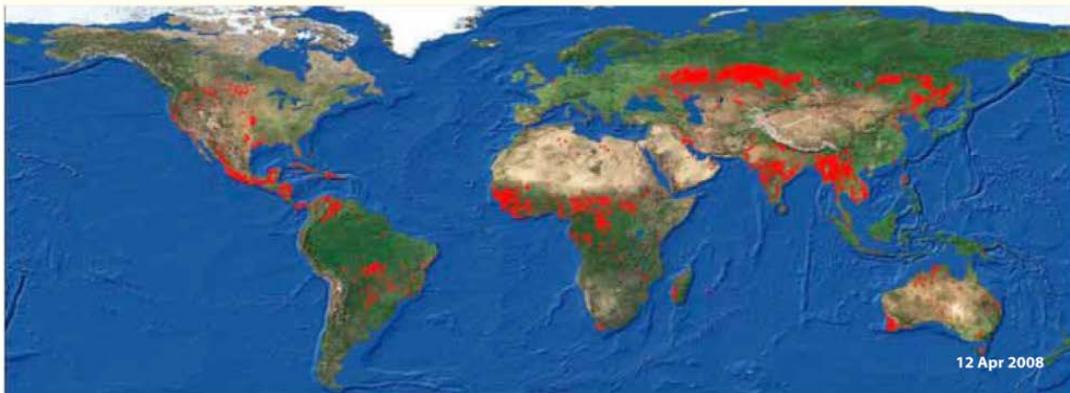




5. غازات الدفيئة غير المباشرة

أول أكسيد الكربون (CO) وأكسيد النيتروجين (NOx) والمركبات العضوية المتطايرة غير الميثانية (NMVOCs) وثاني أكسيد الكبريت (SO₂) ليس لها تأثير مباشر في الاحتباس الحراري. ومع ذلك، تؤثر هذه الغازات، بشكل غير مباشر، في امتصاص الإشعاع الأرضي من خلال التأثير في تكوين وتدمير أوزون التروبوسفير والستراتوسفير. في قانون الهواء النظيف بالولايات المتحدة، يشار إلى هذه الغازات عموماً على أنها مركبات طليعية Precursor للأوزون أو ملوثات المعايير.

يمكن أن يؤثر الهباء أيضاً في الخصائص الامتصاصية للغلاف الجوي. حيث ينتج أول أكسيد الكربون عندما يحترق الوقود الأحفوري الحاوي على الكربون بشكل غير كامل. وتتشكل أكاسيد النيتروجين (أي NO و NO₂) عن طريق الصواعق والحرائق واحتراق الوقود الأحفوري، وفي طبقة الستراتوسفير من N₂O.



توضح هذه الصورة التوزيع العالمي للحرائق ممثلة بالنقاط الحمراء. يشير توزيع الحرائق في إفريقيا إلى أعلى نسبة حرق للكتلة الحيوية في العالم (تستند الصورة إلى قياسات ليلية).





تتبعث **غازات** البروبان والبيوتان والإيثان بشكل أساسي من عمليات النقل والعمليات الصناعية مثل تصنيع المنتجات الكيماوية والمنتجات المماثلة ومعالجة المعادن واستخدام **المذيبات**.

في الولايات المتحدة، ينبعث ثاني أكسيد الكبريت بشكل أساسي من احتراق **الوقود الأحفوري** وصناعة المعادن. يؤثر ثاني أكسيد الكبريت على الميزانية الإشعاعية للأرض من خلال تحوله **الكيميائي الضوئي** إلى **هباء** كبريتات في الغلاف الجوي.

وهذا بدوره، يمكن أن:

1. **بيد** ضوء الشمس مرة أخرى إلى الفضاء، وبالتالي تقليل الإشعاع الذي يصل إلى سطح الأرض.
 2. **يؤثر** في تكوين السحب.
 3. **يؤثر** في التركيب الكيميائي للغلاف الجوي (على سبيل المثال، أوزون الستراتوسفير، من خلال توفير أسطح لتفاعلات كيميائية غير متجانسة).
- كما نوقش سابقاً**، يعد ثاني أكسيد الكبريت أيضاً مساهماً رئيسياً في تكوين **الضباب الدخاني** في المناطق **الحضرية**، وتعد المرافق الكهربائية أكبر مصدر لانبعاثات ثاني أكسيد الكبريت.





يمكن النظر إلى أحد الآثار المترتبة للزيادة التي يسببها الإنسان في ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على أنه تلوث للهواء - ويسمى أيضاً الضباب الدخاني - فوق المدن الرئيسية في العالم. هذه الصورة لمدينة مكسيكو سيتي، وهي محاطة بالهباء الجوي، إنها ثاني أكبر منطقة حضرية في العالم، ويبلغ عدد سكانها حالياً 18131000.

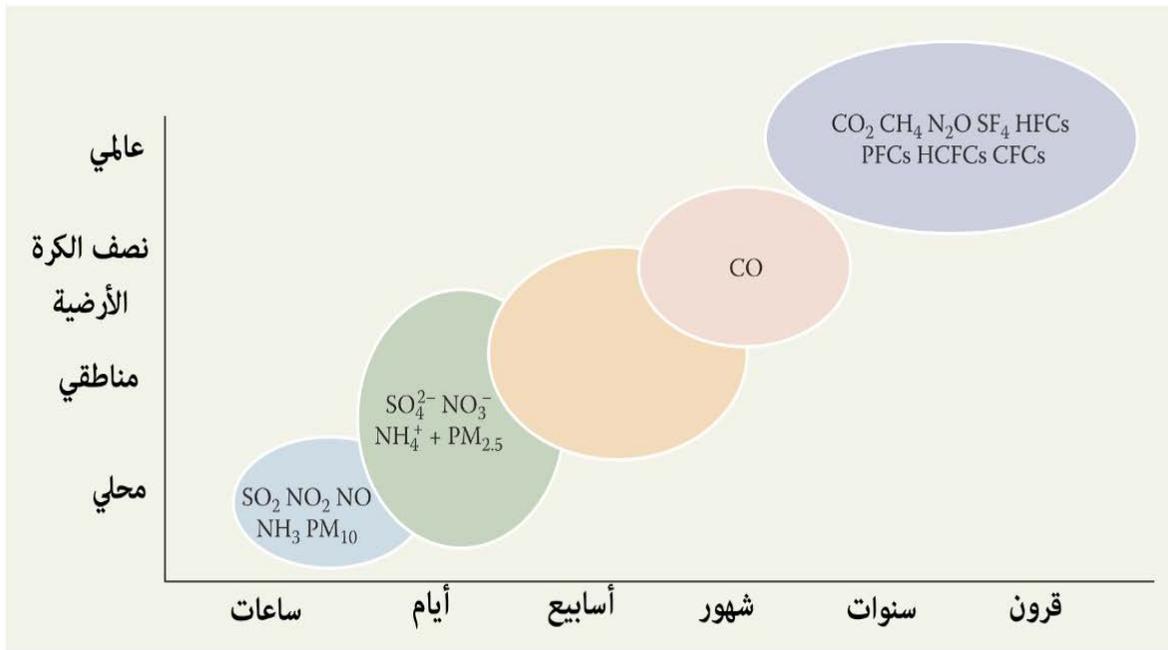
باختصار، بالنسبة لغازات الدفيئة الرئيسية، يجب أن يستند تقييم التأثير إلى وقت **مكوئها** في الغلاف الجوي، والمعدل الذي تزداد به كل عام، وإمكانية إحداث الاحترار العالمي النسبية (**GWP**). والقدرة على الاحترار العالمي هي نسبة التأثير **الإشعاعي** المباشر وغير المباشر من **وحدة كتلة** واحدة لغاز الدفيئة إلى كتلة وحدة واحدة من **الغاز المرجعي (CO2)** خلال فترة زمنية.

لقد جرى تطوير **مفهوم** القدرة على إحداث الاحترار العالمي لمقارنة قدرة كل غاز من **غازات الدفيئة** على احتجاز الحرارة في الغلاف الجوي بالنسبة إلى





غاز آخر. لا تتوفر القدرة على إحداث الاحترار العالمي **للملوثات الأخرى مثل:** **CO** و **NOx** و **NMVOCs** و **SO₂**، **لأنه** لا توجد حالياً طريقة متفق عليها لتقدير مساهمة **التأثير الإشعاعي** غير المباشر في تغير المناخ لهذه الغازات. في أحدث تقرير للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، قورنت قيمها بتلك التي جرى الإبلاغ عنها في **ثلاثة تقارير** سابقة للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ.



ملوثات الهواء المختارة، ومتوسط فترات بقائها في الغلاف الجوي، ومدى تأثيرها الأقصى.





الأدلة على ظاهرة الاحتباس الحراري

إن المجتمع العلمي، كما سنجد في الصفحات الآتية، مقتنع بأن الزيادة في غازات الدفيئة الناتجة عن الأنشطة البشرية تعمل بالفعل على تغيير المناخ وخصائص الطقس.

يبدو أن الفكرة السائدة لدى بعض شرائح المواطنين عامة أن تغير المناخ العالمي هو في الغالب نتاج للنمذجة النظرية، لكن الأدلة من الأرصاد الميدانية تثبت خلاف ذلك.

من المناقشات حول بنية النظام البيئي ووظيفته والتأثيرات البشرية المصاحبة عليها، لاحظنا سابقاً أن عمليات النظام البيئي معقدة وأن المعرفة العلمية القائمة على تجارب طويلة الأجل لكل عملية أو قسم بيئي غير متاح للتوصل إلى استنتاجات نهائية.

للتعويض عن هذه القيود، يستخدم العلماء كلاً من الأرصاد المباشرة ونماذج الحاسوب المتطورة التي يجري فيها محاكاة بيانات الغلاف الجوي والبيولوجية لإسقاط التغييرات التي من المحتمل أن تحدث نتيجة تأثير بشري واحد أو عدة تأثيرات.

ومع ذلك، فإن النمذجة توفر خطأ واحداً فقط من الأدلة. استناداً إلى القياسات المباشرة لعدد من معايير النظام البيئي، فإن الغالبية العظمى من العلماء مقتنعون بأن الاحترار العالمي يحدث بالفعل؛ عدم اليقين يكمن فقط في مداه وحجمه. بمعنى، ما مدى شدة تأثير الاحترار في مختلف المناطق الأحيائية في جميع أنحاء العالم؟





الأدلة من **النظم** الفيزيائية والبيولوجية (المباشرة وغير المباشرة) على **الاحترار المناخي** قد تصاعدت في العقد الماضي. فيما يأتي، سنقدم بعض الأدلة المباشرة أولاً، ثم نلخص بعض **التأثيرات** المتوقعة من نماذج الدوران العام.

أولاً: أدلة مباشرة

1. **درجة حرارة الهواء العالمية** تُظهر البيانات التي جُمعت من عددٍ من المحطات حول العالم أن درجات **حرارة الهواء** السطحي أخذت في الارتفاع. على المستوى العالمي، كانت **22 من السنوات** الأكثر سخونة في التاريخ الحديث في الفترة ما بين 1983 و2007، و23 سنة متتالية كانت أعلى من المتوسط. ترتفع درجة حرارة نصف الكرة الشمالي على وجه **الخصوص** بمعدل أسرع من النصف الكرة الأرضية **الجنوبي**. يشير تقرير البيت الأبيض، (كوكبنا المتغير)، إلى ما يأتي: (بغض النظر عن النهج الذي تم اعتماده، تتفق جميع عمليات إعادة البناء) **بالإضافة إلى عمليتين** أخريين من فصول خط العرض المتوسط) على أن درجات الحرارة في أواخر القرن العشرين هي الأعلى في آخر 1000 عام على الأقل). **ارتفعت** درجات الحرارة العالمية بمعدل **1 درجة** مئوية لكل قرن.

2. **درجة حرارة الهواء في الولايات المتحدة** كانت درجات الحرارة في العامين **التقويميين** 1998 و1999 **للولايات المتحدة** هي الأكثر دفئاً منذ عام 1900 (بلغ المتوسط في عام 1998 13.56 درجة مئوية وفي عام 1999 13.33 درجة مئوية). **تجاوزت** درجات الحرارة هذه درجات الحرارة في **العقد** الدافئ في **الثلاثينيات**. كانت هذه الاتجاهات مماثلة لتلك الموجودة في درجات الحرارة





العالية، أي اتجاه نحو الاحترار طويل المدى في الولايات المتحدة (0.5 درجة مئوية لكل قرن)، مع حدوث الكثير من الاحترار خلال فترتين: 1910-1955 و1976 إلى الوقت الحاضر.

3. درجة حرارة الهواء في القطب الشمالي أبلغ عن ارتفاع درجة حرارة النظم البيئية الشمالية، ولا سيما القطب الشمالي، بمتوسط 2 درجة مئوية في درجة الحرارة على مدى المائة عام الماضية من البيانات المسجلة. في القطب الشمالي، كان لهذا الاحترار تأثير ملحوظ في الغلاف الجليدي (وهو مصطلح جماعي يشمل الأنهار الجليدية والقمم الجليدية والجليد البحري والترية الصقيعية)، وهو في حالة تراجع. في الواقع، مجلس القطب الشمالي، الذي يضم ثماني دول في القطب الشمالي (كندا، الدنمارك، وغرينلاند، وجزر فارو، فنلندا، أيسلندا، النرويج، روسيا، السويد، والولايات المتحدة)، جمع مئات عدة من العلماء لتقييم آثار تغير المناخ العالمي في المنطقة. في تقرير واضح وموثق جيداً، أجمعوا على أن التغيرات الجارية في ذوبان التربة الصقيعية والجليد البحري والكائنات الحية ستكون مدمرة.

4. ارتفاع درجة حرارة مياه المحيطات أظهر عدد من الدراسات أن مياه المحيط السطحية والمتوسطة العميقة كانت أكثر دفئاً في العقدين الماضيين. أجرى الباحثون مسحاً عبر المحيط الهادئ في أعماق مياه شمال المحيط الهادئ في عامي 1985 و1999. ووجدوا أن (أعمق مياه في شمال المحيط الهادئ قد ارتفعت درجة حرارتها بشكل كبير على عرض حوض المحيط بكامله في فترة 10 سنوات. وتشير الأرصاد إلى أن التغيرات في خصائص الماء يمكن اكتشافها حالياً في كتل الماء المعزولة منذ فترة طويلة عن التبادل الحراري





مع الغلاف الجوي). كما يُعزى ارتفاع منسوب مياه المحيط الهادئ الجنوبي إلى ارتفاع درجات الحرارة.

5. **درجات حرارة البئر** من بين 600 بئر عميقة جرى حفرها في الأرض، أظهرت قراءات درجة الحرارة زيادة ملحوظة في النصف الأخير من القرن العشرين. بالمقارنة مع اتجاهات 400-1000 سنة الماضية، كان يُعتقد أن الزيادات في درجات الحرارة لم يسبق لها مثيل. لاحظ العلماء الذين أبلغوا عن هذه الزيادات أنه لا توجد مجموعة من الآليات الطبيعية تفسر ظاهرة الاحترار هذه.

6. **ذوبان الأنهار الجليدية** تتراجع الأنهار الجليدية في جميع القارات. في أمريكا الشمالية، تراجع نهر كولومبيا الجليدي في ألاسكا مسافة 13 كيلومتراً منذ عام 1982، وتراجع جميع الأنهار الجليدية الأربعة عشر الأخرى في المنطقة. لقد ذاب أكثر من 100 من 150 نهراً جليدياً في الحديقة الجليدية الوطنية تماماً منذ عام 1850، ومن المتوقع أن يختفي الباقي في غضون 30 عاماً. في أمريكا الجنوبية، تراجع نهر أبسالا الجليدي في الأرجنتين بمقدار 60 متراً في السنة على مدار الستين عاماً الماضية، ويتسارع المعدل. انخفض حقل جنوب باتاغونيا الجليدي في الأرجنتين وتشيلي بأكثر من 500 كيلومتر مربع في الخمسين عاماً الماضية. زاد غطاء كويلكايا الجليدي في جبال الأنديز في بيرو معدل تراجعها من 3 أمتار في العام في السبعينيات إلى 30 متراً في السنة في التسعينيات. في أوروبا، فقدت الأنهار الجليدية في جبال الألب 50% من حجمها منذ عام 1850، واختفى 14 من 27 نهراً جليدياً في إسبانيا منذ عام 1980، وفقدت الأنهار الجليدية في القوقاز 50% من حجمها في القرن





الماضي. في إفريقيا، فقد أكبر جبل جليدي في كينيا 92% من كتلته منذ أواخر القرن التاسع عشر. تقلصت الأنهار الجليدية في جبل كليمنجارو في تنزانيا بأكثر من 70% منذ أواخر القرن التاسع عشر. في آسيا، تقلصت الأنهار الجليدية في قمة دوسوغانغ Duosugang Peak في جبال أولان ألو Ulan Ula في الصين بنسبة 60% منذ أوائل السبعينيات. وفقدت الأنهار الجليدية لجبال تيان شان في آسيا الوسطى 22% من حجمها في الأربعين سنة الماضية. وفي جبال الهيمالايا الشرقية، اختفى نحو 2000 من الأنهار الجليدية في القرن الماضي.

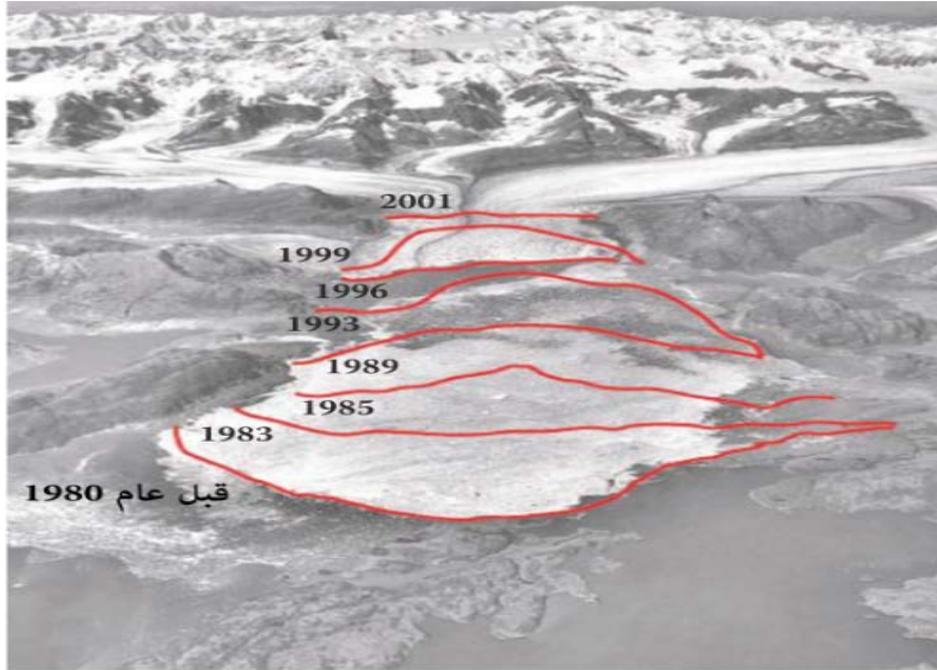
7. ذوبان الجليد قامت عدد من الدراسات من مواقع عدة في العالم بتوثيق التغيرات في الغلاف الجليدي بشكل منهجي. وأفادت التقارير أن الجليد البحري في القطب الشمالي قد تقلص بنحو 58.800 كيلومتر مربع سنوياً بين عامي 1978 و1998، وهو انخفاض إجمالي بنسبة 6% ومساحة مساوية لمساحة ماريلاندا وديلاوير مجتمعين. وقد صار انحسار الجليد البحري حالياً ظاهرة ثابتة. في غرينلاند، تقلص الجليد البحري أيضاً بنحو 40% في العقود الأخيرة، من متوسط 3 أمتار في الفترة ما بين 1958 و1976 إلى نحو 2 متراً بين عامي 1993 و1997. وفي المتوسط، يقدر التخفيف الحالي نحو 10 سم لكل عام. منذ عام 1993، تقلصت الطبقة الجليدية في غرينلاند - وهي الأكبر في القطب الشمالي - بأكثر من متر سنوياً على حوافها الجنوبية والشرقية. ضعف الغطاء الجليدي في غرينلاند في بعض المناطق بأكثر من 6 أمتار منذ عام 1992. هامش التدفق السريع للنهر الجليدي جيكوبشافن إيسبرا Jacobshavn Isbrae في غرب غرينلاند وعدد كبير من





الجبال الجليدية مثل نهر **كانجرلوسواك Kangerdlugssuaq** الجليدي في شرق غرينلاند تذوب سريعاً.

لقد أُبلغ عن ذوبان الجليد في **ألاسكا** في جميع أنحاء الولاية. بالقرب من بارو، كانت التربة الصقيعية أرق 20-25 سم في 1991-1997 مما كانت عليه بين عامي 1964 و1968. تتوفر حالياً تقارير عدة تظهر قطعاً كبيرة من الأنهار الجليدية المكسورة تطفو على المحيط.



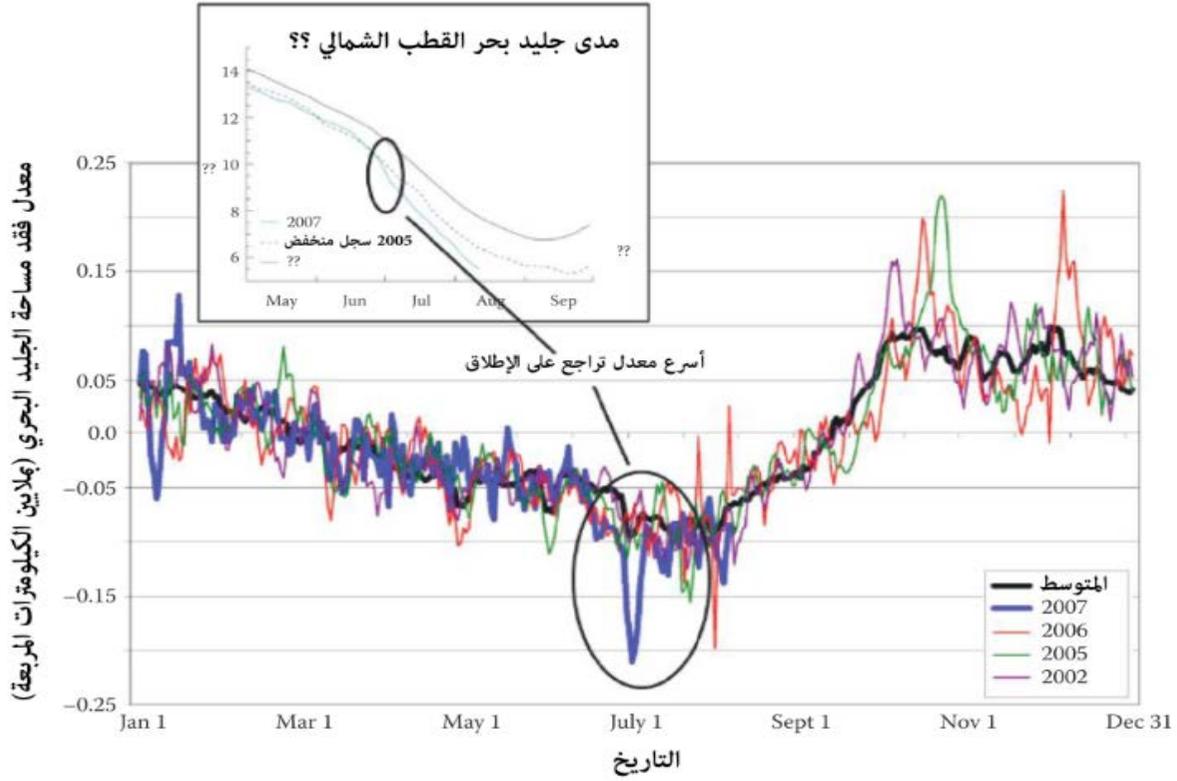
انحسار الجليد البحري بين عامي 1983-2001. تنتج الأنهار الجليدية في ألاسكا كمية من المياه أكثر مما كان يُعتقد سابقاً وقد تكون مُهمّة في توصيف تغير المناخ.





8. **هطول الأمطار الشديد:** أظهرت الولايات المتحدة انخفاضاً في هطول الأمطار خلال عام 1999. وكان هذا العام هو **العام الثاني والعشرون** الأكثر جفافاً من بين **المائة عام** الماضية، حيث بلغ متوسط هطول الأمطار على المستوى **الوطني 76 سم**. كشفت بيانات الأقمار الصناعية عن أعمدة من انخفاض حجم **الجسيمات السحابية** وهطول الأمطار المكبوت الناشئ من المناطق **الحضرية الرئيسية** ومن المرافق الصناعية مثل محطات الطاقة. يمكن **للتلوث الحضري** والصناعي أن يمنع هطول الأمطار تماماً على مناطق واسعة من **السحب** التي تصل درجات الحرارة في قممها إلى نحو **10- درجات مئوية**.



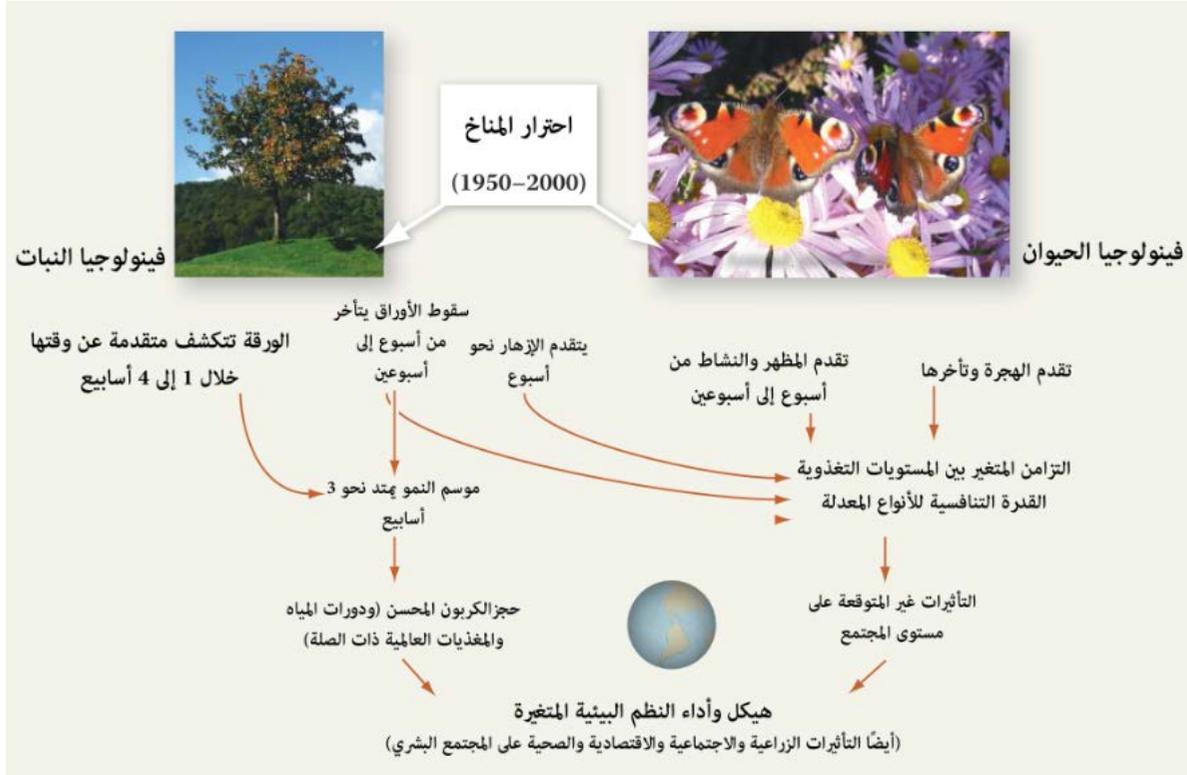


معدل فقدان الجليد البحري في عام 2007 مقارنة بالسنوات القياسية الأخيرة.

ثانياً: الأدلة غير المباشرة

جرى فك رموز تغير المناخ أيضاً من خلال التغيرات التي وثقت في الاستجابات المورفولوجية والفسولوجية بمرور الوقت التي أظهرتها النباتات والحيوانات. تشمل هذه التغيرات في الفينولوجيا توقيت المراحل المختلفة لنمو النبات والحيوان، والتغيير في الاستجابات الموسمية، وتعديلات الاستجابات الأخرى لتغير درجة الحرارة.





العواقب البيئية لظاهرة الاحتباس الحراري على الفينولوجيا النباتية والحيوانية.

سنوضح العديد منها كما يأتي:

1. بالنسبة للعقد 1981-1991، أُبلغ عن زيادة في نمو النبات بالنسبة للنباتات النامية في خطوط العرض العليا الشمالية (45-70 درجة شمالاً). كانت هناك زيادة ملحوظة في نشاط التمثيل الضوئي بنسبة 10-12%، تُعزى إلى فصل الربيع الدافئ.





2. لقد ثبت أن نباتات الأراضي العشبية تتفاعل بشكل مختلف مع الزيادات في درجات الحرارة الدنيا (TMin) مقارنة بدرجات الحرارة القصوى (TMax). في مرج العشب القصير، وتبين أن عشب الغراما الأزرق C4 السائد كان نموه أبطأ من أعشاب C3 الأصلية والغازية. ومن شأن هذا أن يجعل العشب أكثر عرضة للغزو من قبل الأنواع الأخرى وأقل تحملاً للجفاف والرعي. وبالتالي، قد تكون هذه النظم البيئية حساسة للزيادات في درجات الحرارة الدنيا.

3. في النظم البيئية الصحراوية في شياواو بالمكسيك، لوحظ أن الشجيرات الخشبية تظهر زيادة في النمو بمقدار ثلاثة أضعاف. يمكن أن يرتبط التحول في الأنواع الحيوانية في هذه النظم البيئية بتحول في المناخ الإقليمي منذ عام 1977، بدلاً من التغييرات المرتبطة عموماً بالتصحح التاريخي الناجم عن رعي الماشية أو الجفاف. من الواضح أن التغييرات كانت ناجمة عن تحول في المناخ الإقليمي: منذ عام 1977، كان هطول الأمطار في فصل الشتاء في جميع أنحاء المنطقة أعلى بكثير من متوسط هذا القرن.

4. لقد وثقت العديد من الدراسات مؤخراً النشاط الموسمي لكل من الحيوانات والنباتات. وتشمل هذه التغييرات في أنماط هجرة الطيور في إنجلترا، ووضع البيض في وقت مبكر عن طريق التعشيش على الأشجار في أمريكا الشمالية، والتكاثر المبكر للطيور والبرمائيات، والتغيرات في فينولوجيا العثة، والانكسار المبكر لبراعم الأوراق، وما إلى ذلك. في كل حالة، جرى ربط هذه الأنشطة بالتغيرات في درجات الحرارة على ارتفاعات منخفضة.

5. في دراستين منفصلتين، جرى استخدام تقنية التحليل التلوي Meta-analysis (أي التحليل الإحصائي الذي يجمع بين نتائج دراسات علمية عدة) لمعرفة





إذا كان يمكن الكشف عن الأنماط الشائعة أو استجابات الأنواع لتغير المناخ العالمي. في إحدى الدراسات، **حُلل 1700 نوع** ووجد أن 279 نوعاً أظهر (**بصمة تشخيصية Diagnostic Fingerprint**) مميزة للمناخ العالمي. وقد أظهرت الأنواع تحولاً بطول 6.1 كيلومتر في **نطاقاتها** نحو القطبين. في تحقيق آخر **للتحليل التلوي**، كشفت 143 دراسة شملت أنواعاً من الحيوانات والنباتات تتراوح من الرخويات إلى الثدييات ومن الأعشاب إلى الأشجار أن تأثيرات **تغير المناخ العالمي** يمكن تمييزها بالفعل. **أبلغ** عن نتائج مماثلة من الحيوانات والنباتات البريطانية.

6. **تكشف دراسات** الشعاب المرجانية أنها أكثر حساسية لدرجات الحرارة الأكثر دفئاً من التغيرات البيئية الأخرى، بما في ذلك التلوث. تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى «ابيضاض» الشعاب المرجانية (فقدان قدرة الطحالب التكافلية على القيام بعملية التمثيل الضوئي)، مما أثر على ما يصل إلى **27 %** من الشعاب المرجانية في عام 2000. وأكثرها تضرراً هي **59 %** من الشعاب المرجانية في المحيط الهندي، **35 %** في الشرق الأوسط، و**34 %** في جنوب شرق وشرق آسيا.

7. **حتى الوقت الحالي**، لم تثبت أي دراسات وجود صلة بين تواتر الأعاصير وزيادة درجة الحرارة. ومع ذلك، نظراً لارتباطها الإيجابي بدرجة حرارة الماء، فقد اقترح وجود صلة بكثافة الإعصار. من يستطيع أن ينسى الدمار الهائل الذي لحق بأعاصير كاترينا وريتا وويلما عام 2005؟

8. **أخيراً**، يُعزى تغير المناخ العالمي إلى أنشطة الشمس. لكن لا يبدو هذا ممكناً للأسباب الآتية:





1. **تصبح** طبقة الستراتوسفير أكثر برودة مع ارتفاع درجة حرارة السطح.
2. **ترتفع** درجات الحرارة في الليل بشكل أسرع من درجات الحرارة أثناء النهار.
3. **تكون** خطوط العرض الشمالية أكثر دفئاً من خطوط العرض المنخفضة.
4. **تكون** الارتفاعات الأعلى أكثر دفئاً من الارتفاعات المنخفضة.
5. **وترتفع** درجات الحرارة بسرعة أكبر في الشتاء منها في الصيف. يشير الباحثون إلى أن هذه بصمات الاحتباس الحراري التي يسببها الإنسان.

• نماذج الدوران العامة

يعتبر **علم الاحتباس الحراري** أكثر تعقيداً؛ لأنه يتضمن العديد من التفاعلات بين الأرض والماء والغلاف الجوي التي تكون فردية وجماعية معقدة جداً. وبالتالي، لتقييم التأثير العام لغازات الدفيئة على درجة الحرارة والعلاقات الأخرى، استخدم العلماء على مدار العقد الماضي ما يُعرف بنماذج الدوران العامة أو (العالمية) **General (or Global) Circulation Models (GCMs)**.

تستخدم هذه **النماذج المعرفة الحالية** لمتغيرات الغلاف الجوي، وأنماط استخدام الأراضي العامة (الخام)، والمحيطات، والجليد البحري، ودوران الغلاف الجوي والمحيطات. تقارن **نماذج** الدوران العام للتوازن النتائج بتركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي الحالية ($1 \times O_2$) وسيناريوهات مضاعفة ($2 \times CO_2$) **للتنبؤ** بما سيفعله مضاعفة مستوى ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على مدى **100 عام** وتقدير متوسط زيادة درجة حرارة السطح العالمية في مجال 1.5 سوف تكون -4.5 درجة مئوية.





لن تكون الأنهار الجليدية ولا الجليد البحري بأمانٍ مع ارتفاع درجة حرارة الأرض درجتين مئويتين أعلى من مستويات ما قبل عصر الصناعة.

في التناسب التقريبي مع متوسط تغير درجة الحرارة العالمية، من المتوقع أن تزداد الكميات المتوسطة العالمية من بخار الماء في طبقة **التروبوسفير** السفلى (6% لكل درجة مئوية واحدة من الاحترار)، مما يسهم أيضاً في الاحترار العالمي. من المتوقع أن يحدث ارتفاع في مستوى سطح البحر بمقدار 25 ± 50 سم بحلول عام 2100 بسبب التمدد الحراري لمياه البحر وذوبان الغطاء الجليدي.

نظراً لعدم وجود بيانات كمية فعلية حول درجة الحرارة وغازات الاحتباس الحراري من الماضي، فقد كثف العلماء في العقد الماضي أو نحو ذلك الأبحاث





وابتكروا طرقاً تمكنوا من محاكاة التغيرات بناءً على المعلومات المعروفة وحتى المجزأة. باستخدام الأرقام المعروفة من الماضي القريب، التي توجد لها سجلات وأدلة مجزأة من الماضي البعيد، يحاكي العلماء التغيرات التفاعلية بين **أربعة أقسام**: الغلاف الجوي والأرض والمحيط والجليد البحري.

وبالتالي، عندما تستخدم النماذج حالات التوازن عند $(CO_2 \times 1)$ أو $(CO_2 \times 2)$ (وبالتالي فهي أساساً على الأرض)، تسمى هذه النماذج بنماذج الدوران العامة (أو العالمية). في المقابل، تستخدم النماذج العابرة تغييرات في البارامترات المحيطية وبالتالي فهي أكثر تعقيداً. من بين العديد من مراكز **النمذجة** الرئيسية هذه، التي استشهد بها في **الأدبيات العلمية**: مختبر ديناميكيات السوائل الجيوفيزيائية في الولايات المتحدة، ومركز هادلي التابع لمكتب الأرصاد الجوية في المملكة المتحدة، ومركز المناخ الكندي.

حقق مصممو نماذج المناخ تقدماً هائلاً في فترة زمنية قصيرة نسبياً. وأجريت العديد من التقييمات بشأن اليقين والاحتمال النسبي للنواتج التي تولدها النماذج المناخية. بعد فحص النماذج بعناية، توصل الباحثون إلى استنتاج مفاده أنه (من الواضح أن الاحتباس الحراري الذي يسببه الإنسان ليس مشكلة يمكن التغاضي عنها أو تجاهلها بشكل عقلائي).

حتى بعد تقييم أوجه عدم اليقين في توقعات النماذج، كان الاستنتاج العام هو أنه (من المؤكد تقريباً أن الاحترار الذي يسببه الإنسان سيستمر في الظهور، ببطء ولكن بلا هوادة، لفترة طويلة في المستقبل). فحصت دراسة أخرى 928 ورقة علمية وخلصت إلى أنه (من اللافت للنظر أن أيّاً من الأوراق





لم تتفق بالإجماع) بأن تغير المناخ العالمي هو نتيجة للأنشطة البشرية. عندما تسفر العديد من نُهج النمذجة عن نتائج مماثلة، تُعزز الاستنتاجات المستخلصة بناءً على أدلة النماذج.

• المناخ والطقس: حالة عدم اليقين

وفقاً لتقاليدهم الراسخة، سوف يشرع العلماء ليس فقط في صقل نماذجهم ولكن أيضاً بالتحقق من صحتها؛ وهناك اتجاه واحد واضح بالفعل: عدم القدرة على التنبؤ بأنماط الطقس في عدة أماكن حول العالم. وفيما يأتي بعض الأمثلة على ذلك. بين عامي 1988 و1997، تضرر ما يقرب من **80 مليون** شخص بشدة من الكوارث المرتبطة بالطقس. وفي عام 1998، أسقط إعصار ميتش بين 91-183 سم من الأمطار خلال 48 ساعة في أمريكا الوسطى، مما أسفر عن مقتل أكثر من **10000 شخص** بسبب الانهيارات الأرضية والفيضانات، مما أدى إلى انتشار وباء الكوليرا، والقضاء فعلياً على اقتصادات هندوراس ونيكاراغوا. في الولايات المتحدة، أبلغ عن العديد من حالات الطقس الشاذة بين عامي 1998 و1999:

1. هطل على جبل بيكر في واشنطن 28 متراً من الثلج (رقم قياسي).
2. سجلت أوكلاهوما عاصفة رياح قياسية تبلغ 512 كيلومتراً في الساعة.
3. شهدت ألاسكا درجة حرارة منخفضة قياسية بلغت 53 درجة مئوية تحت الصفر.





4. تساقط رقم قياسي من الثلوج بلغ 46 سم في عاصفة ثلجية واحدة في شيكاغو. ومع ذلك، كان عام 1998 **أدفأ شتاء** في التاريخ المسجل في الولايات الـ 48 الأدنى!

تهتم صناعة التأمين بكل هذه التغييرات والأضرار التي سيتعين عليها دفعها. قارنت شركة ميونيخ لإعادة التأمين الألمانية، في دراستها لعام 1999، الستينيات بالتسعينيات. وخلصت الدراسة إلى أن عدد الكوارث الطبيعية الكبرى زاد بمقدار ثلاثة أضعاف، مع زيادة الخسائر الاقتصادية - مع مراعاة تأثيرات التضخم - بمعامل يزيد على 8 وخسائر مؤمنة بمعامل لا يقل عن 16.

• آثار تغير المناخ على الكائنات الحية

سوف يتجلى الاحترار العالمي بطرائق متنوعة، اعتماداً على الأنظمة المناخية الحالية وأنواع الكائنات الحية التي تكيفت معها خلال مسار التطور. بشكل عام، فإن القدرة على التنبؤ بأحوال الطقس سوف تتجاوز التفاعلات مع العوامل الأخرى في تحديد التأثير على إنتاجية النظام الإيكولوجي.

بالنسبة للزراعة، يمكن أن تنشأ نتيجتان إيجابيتان من ارتفاع درجة حرارة المناخ في خطوط العرض الشمالية. أولاً، سيكون هناك مستوى أعلى من ثاني أكسيد الكربون، وبالتالي زيادة التمثيل الضوئي. ثانياً، سيؤدي الاحترار العام إلى فترة نمو أطول والمزيد من الأيام الخالية من الصقيع. في المناخات الأكثر دفئاً، قد يؤدي ارتفاع التبخر والنتح إلى انخفاض توافر المياه.





سيقترن هذا مع تغيير الأحداث البيولوجية بسبب ارتفاع درجات الحرارة، وبالنسبة لبعض الأنواع، فإن قلة فترة البرد اللازمة لتبطين البذور ستؤدي إلى **انخفاض الإنتاجية**، كما أن زيادة **تركيز ثاني أكسيد الكربون** سيكون له تأثير تفاضلي في إنتاج الأجزاء النباتية والتكاثرية للنباتات بشكل عام والمحاصيل بشكل خاص.

بالنسبة للغابات، تصور نماذج الدوران العام بوضوح تغييراً في بقاء وهجرة أنواع الغابات الناجم عن ظاهرة الاحتباس الحراري. من المهم جداً أن نتذكر أن للأشجار وقتاً طويلاً من الأجيال، وأن **هجرتها** وتوطيدها في مناطق جديدة يعتمد على عدد من العوامل. تشمل هذه العوامل المسافة التي يمكن أن تحمل البذور (عن طريق الرياح والمياه والحيوانات) في مواجهة التجزئة المتسارعة للموائل، ووصولها إلى بيئة مضيافة، وقدرتها على التنافس مع الأنواع المقيمة.

تُستخدم عبارة (مسيرة الأنواع نحو الشمال **Northward march of species**) أحياناً في **الأدبيات العلمية**، كما لو أن جميع الأشجار يمكنها أن تحزم أمتعتها وترحل بإحدى وسائل النقل العام، ولكن هذا قد يولد شعوراً بالرضا عن النفس لا داعي له. فقد أظهرت دراسات **حبوب اللقاح الأحفورية** أن عدداً قليلاً فقط من الأنواع كان قادراً على الهجرة بعد **التجلد** الأخير.

وضع العلماء عدداً من الإسقاطات بشأن استجابة الكائنات الحية في النظم البيئية الزراعية والغابات وغيرها من النظم البيئية لارتفاع درجة حرارة المناخ. جرى الاستشهاد هنا بدراسة قائمة على نموذج الدوران العام أو (العالمي) كمثال لأننا نعتقد أنها دراسة شاملة.





باستخدام **قاعدة بيانات واسعة** من شرق الولايات المتحدة، قام الباحثون بتحليل بيانات جرد الغابات بعناية، التي تضمنت أكثر من **100000 قطعة** غابة من أكثر من **2100 مقاطعة** شرق خط الطول **100**. حيث تضمن التحليل المناخ، والتربة، واستخدام الأراضي، والارتفاع، وتكوين الأنواع للمجتمعات الرئيسية الموجودة في هذه المنطقة. بشكل عام، كان من المتوقع فقدان التنوع البيولوجي وتجانس أنواع المجتمعات.

يُظهر نبات سكر القيقب وطائر الغرز الأسود تقلصاً كبيراً في مناطق التوزيع الحالية، بينما سيوسع كل من الصنوبر قصير الأوراق والدبابة الصيفية مناطق توزيعهما بشكل كبير. التقدم في تنقيح نماذج الدوران العام واستخدامها للتنبؤ بالاستجابات الحيوية المحتملة للتغيرات المناخية المحتملة يجري بوتيرة محمومة. من المهم أن الناتج من النماذج صار أقرب بكثير إلى الاستطلاع الأرضي والمراقبة الميدانية.

بالنسبة للنظم الإيكولوجية المائية، فقد تبين أن ارتفاع درجة حرارة طبقات سطح الماء يؤدي إلى هجرة العوالق النباتية إلى أعماق أكثر برودة؛ قد يكون التوزيع إلى **23 متراً** على عكس 15 متراً الطبيعي.

ولكن هذا يعني أيضاً أن العوالق النباتية ستنمو بشكل أبطأ؛ لأن ضوءاً أقل يخرق مع زيادة العمق. يعني انخفاض نمو العوالق النباتية كمية أقل من الغذاء بالنسبة للمستويات الغذائية الأعلى. إذا تسبب شيء ما فجأة في انهيار أعداد العوالق، فقد تبدأ السلسلة الغذائية بكاملها في الانهيار. بالنسبة لشمال وغرب أمريكا الشمالية، يمكن أن تؤثر درجة حرارة الهواء الدافئ مقترنة بزيادة في ثاني أكسيد الكربون على بيئة البحيرة والجداول بعدة طرق.





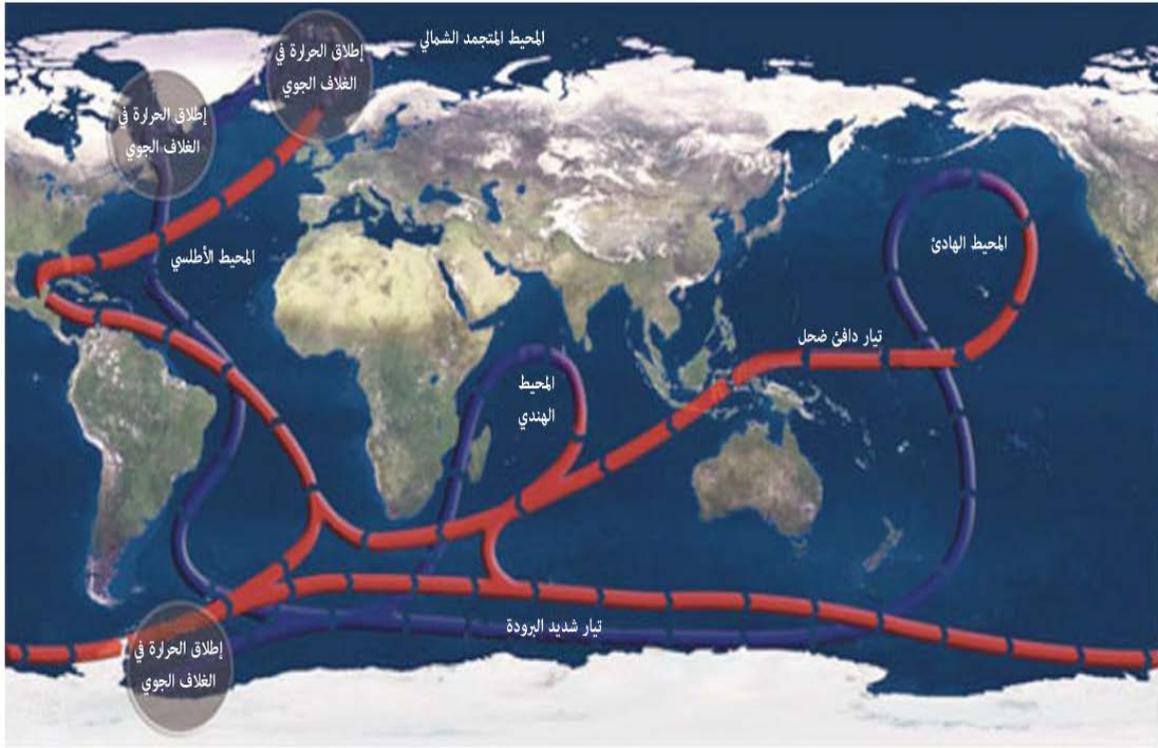
تبدو طريقتان رئيسيتان: خسارة أكبر في التبخر والنتح بالنسبة للهطول المطري الشديد الوارد وتدفق المياه بشكل أسرع من تواتر حريق أعلى في النظم البيئية الأرضية. ستؤثر الدورات الهيدرولوجية المتغيرة وتدفقات المجاري المائية بشكل مباشر على السمات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للنظم الإيكولوجية للبحيرة، بما في ذلك التغيرات في الخط الحراري، وبالتالي معدل دوران البحيرة، والتغذيات. مجتمعة، كل هذه العوامل سيكون لها تأثير كبير في كل من الأنواع الأصلية وغير الأصلية.

من المناقشة السابقة نجد أن جميع أنظمة الدعم البشري، أو ما يسمى (خدمات النظام البيئي / الخدمات البيئية)، تعتمد إلى حد كبير على الأداء السليم للنظم الإيكولوجية. كما أن الموارد الطبيعية لإنتاج الغذاء والغابات والمراعي وموائل أشكال الحياة بخلاف البشر كلها مرتبطة ببعضها بعضاً وبالعوامل الغلاف الجوي التي سنناقشها لاحقاً.

هناك اتفاق واسع النطاق بين المجتمع العلمي على أنه، نظراً لجميع التغييرات التي أحدثتها الأنشطة البشرية، من المحتمل أن تكون التأثيرات التي يفرضها تغير المناخ متنوعة ومكثفة ومعقدة جداً، ويوجد عدة أمثلة توضح هذه النقطة.

إذ يُظهر تقييم تأثير المناخ في القطب الشمالي أن التغير في درجة الحرارة العالمية قد يؤدي إلى تغيير كبير في الظروف الحرارية الملحية، وبالتالي تسريع الظروف المناخية التي سيكون لها تأثير هائل في أوروبا. ويشير كذلك إلى أن التغيرات في دوران المحيطات العالمية يمكن أن تؤدي إلى تغير مناخي مفاجئ.

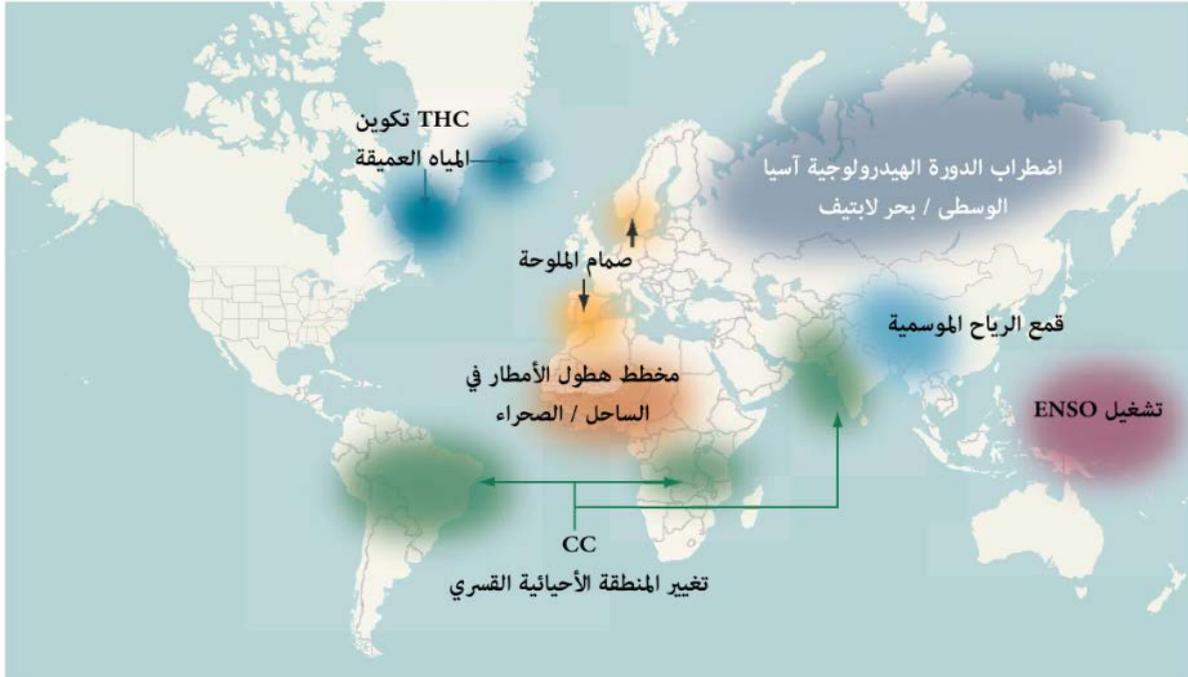




المضخة الحرارية لشمال الأطلسي (أي دوران الماء الدافئ إلى خطوط العرض الشمالية قد تتعطل بسبب التغيرات في الدورة الحرارية الملحية).

يمكن أن يبدأ **هذا التغيير** من خلال زيادة هطول الأمطار في القطب الشمالي وجريان الأنهار، وذوبان الثلوج والجليد في القطب الشمالي، وذلك يؤدي إلى انخفاض ملوحة مياه المحيط في شمال المحيط الأطلسي، وهو ما يظهر أعلاه. لاحظ **الباحثون** أنه قد يكون هناك بالفعل العديد من التغيرات التي ستحدث في جميع أنحاء العالم، من التغيرات في الدورة الهيدرولوجية في شمال آسيا، إلى قمع الرياح الموسمية في جنوب آسيا، إلى تغيرات المناطق الأحيائية في أمريكا الجنوبية، **كما هو الحال**.





التبديل الحرج ونقاط الاختناق داخل نظام الأرض بسبب الاحتباس الحراري.

• آثار تغير المناخ على صحة الإنسان

عامل آخر ذو أهمية كبيرة هو صحة الإنسان. اقترحت التقارير العلمية، على سبيل المثال، أنه مع حدوث استنفاد الأوزون وتجاوز الأشعة فوق البنفسجية عتبة معينة، فإن الأمراض الجلدية، وتشكل إعتام عدسة العين، وحتى العمى في البشر والحياة البرية، خاصة في أستراليا وأمريكا الجنوبية سيكون واقعاً لا محالة.

كما يبدو أن انتشار مسببات الأمراض وضعف جهاز المناعة إلى جانب جودة الهواء والماء سيكون لهما آثار ضارة في صحة الإنسان. يمكن أن يكون لتغير المناخ تأثير بعيد المدى في الأنماط الصحية في الولايات المتحدة، وسيأخذ هذا أشكالاً عدة ويتبع العديد من المسارات.





الآثار الصحية المحتملة لتقلبات المناخ وتغيره.

التغيرات في الأحداث البيولوجية للطفيليات والناجمة عن درجات الحرارة الأكثر دفئاً ومواسم النمو الأطول، وكذلك انتشار الأمراض وناقلات الأمراض، تلوح في الأفق بشكل كبير في كل من المشاهد العالمية والوطنية. كما سيناقد لاحقاً، يبدو أن الأنواع النباتية الغازية تنتج المزيد من حبوب اللقاح، مثل: (عشبة الرجيد) ولديها قوة كبيرة من السموم، على سبيل المثال، (تلك الموجودة في اللبلاب السام التي تسبب التهاب الجلد). يمكن أن تسبب أوبئة الأمراض مثل خنفساء الصنوبر الجبلية، على سبيل المثال (بحيرة أوتسا، كولومبيا البريطانية) وخنفساء التنوب، على سبيل المثال (شبه جزيرة كيناى الجنوبية، ألاسكا) أضراراً كبيرة للغابات.





التعتيم العالمي

التعتيم العالمي Global Dimming هو مفهوم مهم يصاحب ظاهرة الاحتباس الحراري. لم يفهم كثيراً حتى وقت قريب، إنه **ظاهرة** تؤدي دوراً في الصحة البيئية العامة للأرض ولها آثار محددة على ظاهرة الاحتباس الحراري.

مع وجود **التعتيم العالمي** منذ وجود التلوث، إلا أنه اكتسب اهتماماً خاصاً خلال **الهجمات على الولايات المتحدة يوم 11 سبتمبر 2001**، عندما توقفت حركة الطيران التجارية لمدة ثلاثة أيام. خلال هذا الإطار الزمني القصير، اكتشف العلماء أن درجة حرارة الغلاف الجوي ارتفعت (**1 درجة مئوية**) خلال تلك **الفترة القصيرة**. وأثناء دراستهم للاحتتمالات، أدركوا أن السبب في ذلك هو عدم وجود **نفثات في الغلاف الجوي** خلفتها **الطائرات التجارية**.

تعكس مسارات بخار الماء بعض الإشعاع الشمسي الوارد، مما يمنعه من الوصول إلى سطح الأرض. قاد هذا الاكتشاف علماء المناخ في وكالة ناسا والإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (**NOAA**) إلى فهم أن الأنشطة التي تعكس أشعة الشمس قد تعمل ضد ظاهرة الاحتباس الحراري.

بعبارة أخرى، فإن **الجسيمات** الموجودة في الغلاف الجوي - الملوثة (ثاني أكسيد الكبريت، والسخام، والرماد) وبخار الماء - في حين أنها غير صحية في حد ذاتها، وتسبب ظروفاً صحية مثل أمراض **الجهاز التنفسي**، تعمل في الواقع على مواجهة بعض الآثار **السيئة للاحتباس الحراري** من خلال عكس الحرارة بعيداً عن الأرض.





مع أن هذا قد يبدو كحل ممكن لمواجهة الاحتباس الحراري، إلا أنه ليس خياراً قابلاً للتطبيق لأن التعقيم العالمي له آثاره السلبية المرتبطة به. يعتقد علماء المناخ في وكالة ناسا أنه أدى إلى انخفاض هطول الأمطار في منطقة الساحل في شمال إفريقيا، حيث تسبب في الجفاف الشديد والمجاعة، مما تسبب في وفيات مرتبطة بالحرارة لأكثر من مليون شخص في إفريقيا وألحق الضرر بـ 50 مليون شخص بالجوع والمجاعة.

من الحقائق القاسية بشأن التعقيم العالمي، التي تثير قلق العلماء، أنه بينما تتعامل المدن مع تنظيف التلوث وتقليل مستويات الجسيمات في الغلاف الجوي، فإن ذلك سيزيد من آثار الاحتباس الحراري.

يعتقد الكثير أن التعقيم العالمي يعمل على مواجهة الآثار السلبية للاحتباس الحراري. إذا جرى التعامل مع قضايا التعقيم العالمي فقط، فإن الآثار السلبية للاحتباس الحراري ستزداد أكثر.

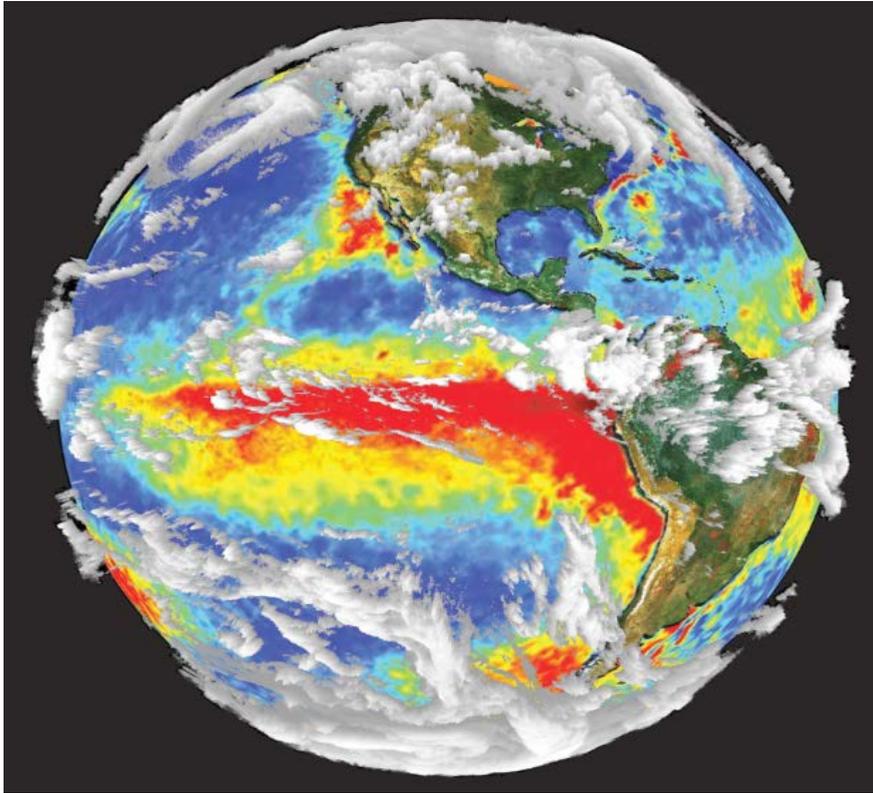
أحد الجوانب المقلقة لهذا الأمر في المجتمع العلمي هو أن التأثير المعاكس للتعقيم العالمي لم يُحسب بشكل كافٍ في النماذج المناخية الحالية. لذلك، مع تنظيف الغلاف الجوي، قد يؤدي ذلك إلى ارتفاع حاد في ظاهرة الاحتباس الحراري، مما يؤدي إلى الإضرار بالنظم البيئية بشكل أسرع مما كان متوقعاً. يعتقد الخبراء أن هذا قد يؤثر سلباً في بلايين الأشخاص.

في الواقع، استناداً إلى الفيلم الوثائقي (أفق Horizon) الذي بثته هيئة الإذاعة البريطانية في يناير 2005، يعتقد العلماء أن التعامل مع التعقيم العالمي دون التعامل أيضاً مع آثار الاحتباس الحراري من شأنه أن يتسبب في العديد من الآثار الخطيرة مع أضرار لا رجعة فيها في نحو عقدين فقط.





حيث سيزيد ذوبان الصفائح الجليدية في العالم؛ وتجفف الغابات الاستوائية المطيرة، مما يزيد من خطر الحرائق وبالتالي إطلاق المزيد من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي؛ وقتل الغطاء النباتي بما في ذلك المحاصيل وتدمير الصناعة الزراعية؛ وتدهور التربة وإطلاق كميات هائلة من هيدرات الميثان من قاع المحيط، وهي أقوى بنحو ثماني مرات من غازات الاحتباس الحراري من ثاني أكسيد الكربون.



صورة ثلاثية الأبعاد مأخوذة لكوكب الأرض باستخدام بيانات من أربعة أجهزة استشعار لأقمار صناعية، بما في ذلك الغطاء الأرضي (أخضر / في القارات)، وحرائق الغابات (النقاط الحمراء في القارات)، ودرجة حرارة سطح البحر (الألوان فوق المحيطات)، والغطاء السحابي. وظاهرة النينو ظاهرة في درجات حرارة سطح البحر الدافئة قبالة الساحل الغربي لأمريكا الجنوبية.





إذا لم يُتعامل مع ظاهرة الاحتباس الحراري في الوقت نفسه، فمن المتوقع أن ترتفع درجات الحرارة (10 درجات مئوية) خلال المائة عام القادمة - وهو ضعف ما تتوقعه معظم النماذج اليوم.

يتطلب التعامل بنجاح مع قضايا التفاعلات المختلفة لإشعاع الشمس مع الأرض والغلاف الجوي - غازات الدفيئة وتفاعلاتها ودورات الحياة، فضلاً عن التفاعلات بين الاحتباس الحراري والتعقيم العالمي - بحثاً مشتركاً واهتماماً من العلماء والمخططين والمديرين والسياسيين وعامة الناس على حد سواء.

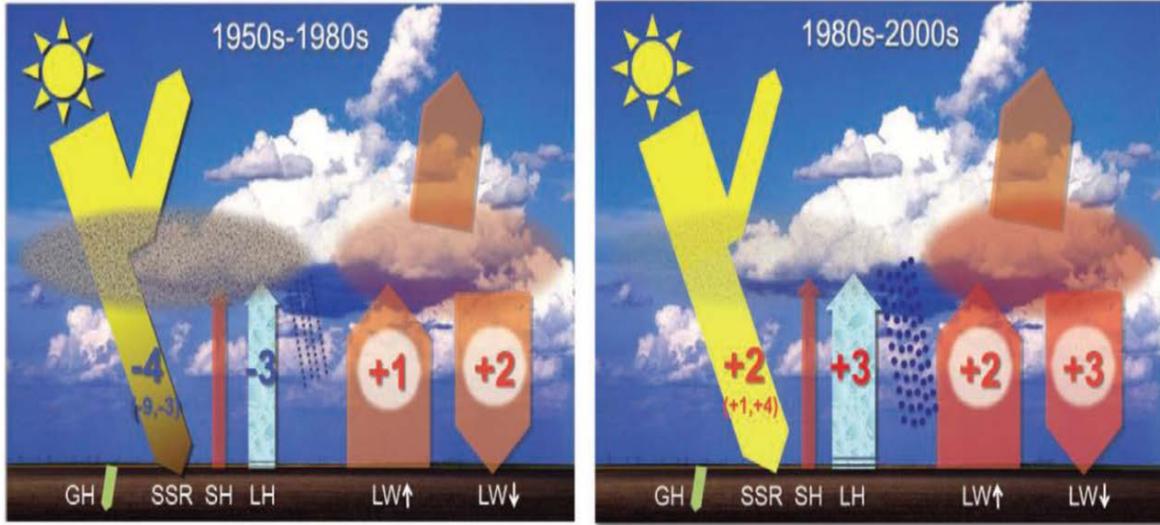
إن فهم القضايا الحالية المتعلقة بغازات الدفيئة والمعرفة التطبيقية لما سيحدث للبيئة - إذا لم يُتحكم فيها وإدارتها بشكل صحيح - هو نصف المعركة التي يواجهها سكان العالم اليوم. بمجرد فهم المشكلات وقبولها، فإن الانتقال إلى الخطوة التالية يمكن أن يحدث الإجراء الإيجابي المستتير بنجاح.





التعتيم

السطوع



تمثيل تخطيطي لفترات (التعتيم) و (السطوع) على سطح الأرض. (لليساار) أثناء التعتيم (من خمسينيات إلى ثمانينيات القرن العشرين)، ربما يكون الانخفاض في الإشعاع الشمسي السطحي (SSR) يفوق الإشعاع الحراري النازل في الغلاف الجوي (LW↓) من غازات الدفيئة المحسنة والتصدي بفعالية للاحتباس الحراري، مما تسبب فقط في زيادة طفيفة في الانبعاثات الحرارية السطحية (LW↑). قد يؤدي الانخفاض الناتج في الطاقة الإشعاعية على سطح الأرض إلى تبخر ضعيف وما يعادله من الطاقة، وهو التدفق الحراري الكامن (LH)، مما يؤدي إلى تباطؤ دورة المياه. (لليمين) مع الانتقال من التعتيم إلى السطوع (الثمانينيات والعقد الأول من الألفية الثانية)، لم يعد تأثير الدفيئة المعزز مقنعاً، مما تسبب في ارتفاع درجة حرارة أسرع، وتبخر أقوى (LH)، وتكثيف لدورة المياه. تشير القيم إلى أفضل التقديرات للتغيرات الإجمالية في تدفقات الطاقة السطحية خلال كلتا الفترتين مقدرةً بالواط / المتر المربع (نطاقات تقديرات الأدبيات للتعتيم / سطوع SSR بين قوسين). تشير الأرقام الموجبة، الموضحة باللون الأحمر، إلى زيادة مقادير تدفقات الطاقة في الاتجاه الذي تشير إليه الأسهم. تعتبر التغييرات في تدفق حرارة الأرض (GH) وتدفق الحرارة المعقول (SH) صغيرة مقارنة بتغييرات التدفق المذكورة أعلاه.





• الاستجابات الوطنية والدولية الأخيرة

اقترحت الأمم المتحدة بروتوكول كيوتو للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وقد وافق عدد من الدول على ذلك. بالإضافة إلى ذلك، اتخذت العديد من الدول مبادراتها الخاصة، كما فعلت العديد من الولايات في الولايات المتحدة، لتحقيق أهداف مماثلة.

في عام 1989، أقرت اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (UNFCCC) الذي يُعزى بشكل مباشر أو غير مباشر إلى النشاط البشري الذي يغير تكوين الغلاف الجوي العالمي، الذي يضاف إلى التقلبات المناخية الطبيعية التي لوحظت على مدى فترات زمنية مماثلة.

ولكن حتى قبل إقرار اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، أدركت المنظمة العالمية للأرصاد الجوية وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة الأثر العميق الذي قد يخلفه مثل هذا التغير المناخي على البشر والكائنات الحية الأخرى على حد سواء؛ قاموا بشكل مشترك بتأسيس IPCC وهو الفريق الحكومي الدولي المعني بتغير المناخ - في عام 1988.

كانت المهمة الموكلة إلى الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ هي دراسة وتوليف التغييرات المحتملة التي قد تحدث نتيجة لتراكم غازات الاحتباس الحراري وما يترتب على ذلك من تغير المناخ العالمي. ويضطلع الفريق بمهمة ثلاثية: تقييم المعلومات العلمية المتاحة بشأن تغير المناخ، وتقييم الآثار البيئية والاجتماعية والاقتصادية لتغير المناخ، وصياغة استراتيجيات يمكن من خلالها





معالجة التخفيف من هذه التغيرات. في عام 2007، أصدرت هذه الهيئة تقريرها الرابع الذي جرى بحثه بصرامة واستعراض الأقران على نطاق واسع.

مع أن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ تُعرِّف تغير المناخ على أنه أي نوع من التغيير في مناخ الأرض بغض النظر عن السبب، فقد وجدت أدلة دامغة على الزيادة الكبيرة في غازات الدفيئة الناتجة عن الأنشطة البشرية، وبخاصة استخدام الوقود الأحفوري، وتغير استخدام الأراضي، والزراعة.

قدمت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) حافزاً كبيراً لمزيد من التطوير والصقل لنماذج الدوران العام التي تتنبأ بزيادة درجة الحرارة بمقدار 1.0-4.5 درجة مئوية بحلول نهاية هذا القرن. وتقديراً لعملها النموذجي، تقاسمت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ جائزة نوبل للسلام في عام 2007.





الحلول المقترحة لمشكلات التغيرات المناخية والاحتباس الحراري

في الوقت الحالي، لا توجد اتفاقية دولية ملزمة لخفض الانبعاثات مع أن العديد من البلدان تتخذ سياسات الخفض من جانب واحد. من الواضح أن الاتجاه الحالي لانبعاثات غازات الدفيئة أعلى حالياً من أسوأ السيناريوهات التي تناولتها تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ 2014/2013.

ويرجع ذلك في المقام الأول إلى التطور السريع للاقتصادات الناشئة، مثل: (الصين والهند والبرازيل وجنوب إفريقيا). لذا سنبحث هنا ثلاثة أنواع من الحلول لتغير المناخ. الأول هو التكيف، والذي يعني ببساطة توفير الحماية للسكان؛ لأننا نعلم بالفعل أنه سيكون هناك تغير مناخي حتى لو انخفضت الانبعاثات بشكل جذري إلى مستويات عام 1990. ثانياً، التخفيف، والذي في أبسط مصطلحاته يقلل من بصمتنا الكربونية وبالتالي عكس اتجاه الزيادة المستمرة في انبعاثات غازات الدفيئة. ثالثاً، الهندسة الجيولوجية التي تتضمن استخراج ثاني أكسيد الكربون على نطاق واسع من الغلاف الجوي أو تعديل المناخ العالمي.

• التكيف

سيكون هناك بالتأكيد تغير مناخي. ستتأثر العديد من البلدان سلباً في المستقبل القريب، وستتأثر جميع البلدان تقريباً في الثلاثين عاماً القادمة؛ لذا فإن التقرير الثاني للتقييم الخامس للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ الذي نُشر في عام 2014 يفحص آثار تغير المناخ والحساسية المحتملة، والقدرة





على التكيف، وقابلية تأثر كل بيئة وطنية وأنظمة اقتصادية محيطية. على سبيل المثال، نظراً لأن الفيضانات ستصير أكثر انتشاراً في بريطانيا، يمكن منع الأضرار التي تلحق بالممتلكات وفقدان الأرواح من خلال دفاعات جديدة ضد الفيضانات وقوانين جديدة صارمة تحد من البناء في السهول الفيضية والسواحل المعرضة للخطر. تعتقد الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ أن هناك ستة أسباب تدفعنا للتكيف مع تغير المناخ:

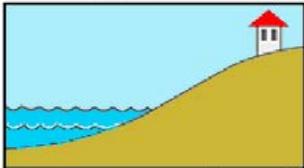
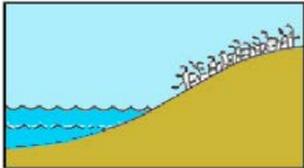
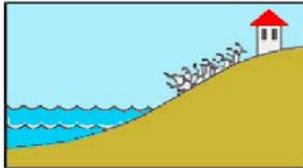
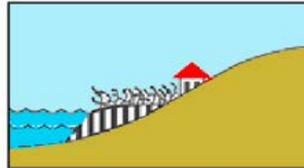
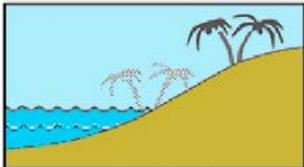
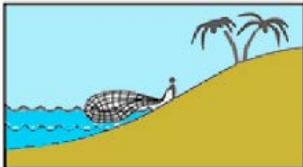
1. لا يمكن تجنب تغير المناخ.
2. يعد التكيف الاستباقي والوقائي أكثر فعالية وأقل تكلفة من الإصلاحات الطارئة القسرية في اللحظة الأخيرة.
3. قد يكون تغير المناخ أسرع وأكثر وضوحاً مما تشير إليه التقديرات الحالية، ومن المحتمل أن تحدث أحداث غير متوقعة ومنتظمة.
4. يمكن جني الفوائد الفورية من التكيف الأفضل مع تقلب المناخ والظواهر الجوية الشديدة، على سبيل المثال، (مع مخاطر العواصف، يجب تنفيذ قوانين البناء الصارمة وممارسات الإخلاء الأفضل).
5. يمكن أيضاً جني الفوائد الفورية من خلال إزالة السياسات والممارسات غير القادرة على التكيف، على سبيل المثال، (البناء على السهول الفيضية والسواحل المعرضة للخطر).
6. تغير المناخ يجلب الفرص وكذلك التهديدات.

التهديد الرئيسي من تغير المناخ هو عدم القدرة على التنبؤ به. يمكن للبشرية أن تعيش في أي مناخ متطرف تقريباً، من الصحاري إلى القطب





الشمالي، لكن لا يمكننا فعل ذلك إلا عندما نتمكن من التنبؤ بما سيكون عليه الطقس المتطرف؛ لذا فإن التكيف هو -حقاً- مفتاح التعامل مع تغير المناخ، ولكن يجب أن يبدأ حالياً، حيث يمكن أن يستغرق تنفيذ تغييرات البنية التحتية ما يصل إلى 30 عاماً.

التراجع	التكيف	الوقاية	
 <p>تأسيس أكواد بناء للنباتات</p>	 <p>تنظيم تنمية المباني</p>	 <p>تنمية حماية الساحل</p>	المباني
 <p>السماح بهجرة الأراضي الرطبة</p>	 <p>التوازن بين الحفظ والتنمية</p>	 <p>إنشاء موائل أرض رطبة / منحروف بوساطة الطمر والغرس</p>	الأراضي الرطبة
 <p>نقل الإنتاج الزراعي</p>	 <p>الانتقال للزراعة المائية</p>	 <p>حماية الأراضي الزراعية</p>	المحاصيل

مثال على كيفية تكيف البلدان مع الارتفاع المتوقع في مستوى سطح البحر.

على سبيل المثال، إذا كنت ترغب في تغيير استخدام الأراضي، عن طريق بناء دفاعات بحرية أفضل أو إعادة الأراضي الزراعية إلى الأراضي الرطبة الطبيعية في منطقة معينة، فقد يستغرق الأمر عشر سنوات للبحث والتخطيط للإجراءات المناسبة. قد يستغرق الأمر بعد ذلك عشر سنوات أخرى للعمليات





الاستشارية والقانونية الكاملة، وعشر سنوات أخرى لتنفيذ هذه التغييرات. يمكن أن تستغرق الاستعادة الطبيعية بعد ذلك عقداً آخر لإكمال مشروع التكيف. وخير مثال على ذلك هو حاجز التايمز، الذي يحمي لندن حالياً من الفيضانات. فقد جرى بناؤه استجابة للفيضانات الشديدة في عام 1953 ولكن لم يفتتح رسمياً حتى عام 1984، بعد 31 عاماً. منذ ذلك الحين، كان لدى وكالة البيئة في المملكة المتحدة برنامج للترقية المستمرة لجميع الدفاعات ضد الفيضانات على طول نهر التايمز لجعل الحاجز فعالاً قدر الإمكان.

ومع ذلك، هناك حدود للتكيف:

1. قد يتخطى تغير المناخ في مناطق معينة قدرتنا أو مواردنا المالية لحماية السكان الذين يعيشون هناك.
2. في بعض المناطق، تكون قدرتنا على التنبؤ بآثار تغير المناخ محدودة، وبالتالي فإن صياغة خطة للتكيف أمر صعب.

مثال حوض نهر الميكونغ وعجزنا الحالي عن التنبؤ فيما إذا كان تغير المناخ سيزيد أو ينقص تصريفه السنوي. يصير تقديم المشورة لصانعي السياسات صعباً جداً عندما لا تسمح حالات عدم اليقين حتى لأحد بمعرفة ما إذا كان نظام تجميع المياه في الأنهار في المستقبل سيحوي على مياه أكثر أو أقل. ولكن ينبغي أيضاً نقل هذا النقص في المعرفة إلى صانعي السياسات حتى يفهموا النطاق الكامل لسيناريوهات المناخ المحلي المحتملة التي قد يواجهونها.





المشكلة الأخرى هي أن التكيف يتطلب أموالاً تستثمر حالياً؛ كثير والمشكلة الأخرى هي أن التكيف يتطلب المال ليجري استثماره حالياً؛ العديد من البلدان ليس لديها المال، وعندما يتوفر لديها، لا يرغب الناس في دفع المزيد من الضرائب لحماية أنفسهم في المستقبل؛ يعيش معظم الناس في الوقت الحاضر. ومن ثم فإن حلول تغير المناخ يجب أن تجمع بين التكيفات واستراتيجيات التخفيف التي ستناقش أدناه. كان محور مفاوضات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ هو المساعدة في نقل التكنولوجيا من البلدان المتقدمة إلى البلدان النامية وإنشاء صندوق لتغير المناخ لمساعدة البلدان النامية على التكيف.

الشيء الوحيد الذي تفعله الحكومات حالياً هو إجراء تقييمات لتأثير تغير المناخ. على سبيل المثال، يوجد في المملكة المتحدة برنامج تأثير المناخ في المملكة المتحدة الذي أطلق في يناير 2009 منتجات جديدة، بناءً على أحدث تقارير IPCC 2007، والتي تُظهر التأثيرات المحتملة لتغير المناخ على المملكة المتحدة على مدار المائة عام القادمة.

تستهدف هذه المنتجات الحكومة الوطنية والمحلية في المملكة المتحدة، والصناعة، والأعمال التجارية، ووسائل الإعلام، وعامة الناس. وسيجري حالياً تحديث هذه التقارير وفقاً لآخر تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ 2013/2014. إذا أنشأت كل حكومة أحد هذه البرامج، فستتاح لمواطنيها على الأقل الفرصة لاتخاذ خيارات مستتيرة حول الكيفية التي ينبغي أن تتكيف بها بلدانهم مع تغير المناخ.





• التخفيف

قد تبدو فكرة خفض انبعاثات الكربون العالمية بمقدار النصف في السنوات الثلاثين المقبلة وبنسبة تصل إلى 80% بحلول نهاية القرن صعبة جداً؛ ومع ذلك، فقد قدمت المملكة المتحدة والمكسيك وكاليفورنيا بالفعل تعهدات ملزمة قانوناً لخفض انبعاثات الكربون بنسبة 80% و50% و60% على التوالي بحلول عام 2050. وقد نشر الأستاذان ستيف باكالا وروبرت سوكلو في جامعة برينستون ورقة مؤثرة جداً في مجلة العلوم مما يجعل هذا التحدي يبدو أكثر قابلية للتحقيق. لقد أخذنا سيناريو الانبعاثات غير العادية للأعمال والسيناريو المطلوب هو **450 جزءاً في المليون** ووصفوا الفرق بين الاثنين بعدد من «الأوتاد». بناءً على وجهة النظر هذه، بدلاً من رؤية مشكلة واحدة ضخمة لا يمكن التغلب عليها، فإن ما نواجهه حقاً هو ما بين 16 و20 تغييراً متوسط الحجم يضاف إلى التغيير الكبير المطلوب.

قدموا أيضاً عدة أمثلة للأوتاد، كل منها يوفر تقريباً 1 غيغا طن من الكربون كل عام. على سبيل المثال، يمكن أن يضاعف وتد واحد كفاءة بليونسي سيارة من 30 ميلاً للغالون (~ 9.4 لتر لكل 100 كم) إلى 60 ميلاً للغالون (~ 4.7 لتر لكل 100 كيلومتر)، وهو في الواقع هدف قابل للتحقيق جداً، حيث جرى بالفعل تصنيع سيارات يمكنها بسهولة أن تسير 100 ميل لكل غالون (2.8 لتر لكل 100 كيلومتر).

مع أن **ستيف باكالا وروبرت سوكلو** يقدمان أمثلة على ما يمكننا القيام به لتحقيق التخفيضات المطلوبة في غازات الدفيئة، سيكون لكل دولة نقاط قوة وضعف مختلفة، ويمكنها تطبيق الأوتاد الأكثر ملاءمة لها. من أولى الإجراءات



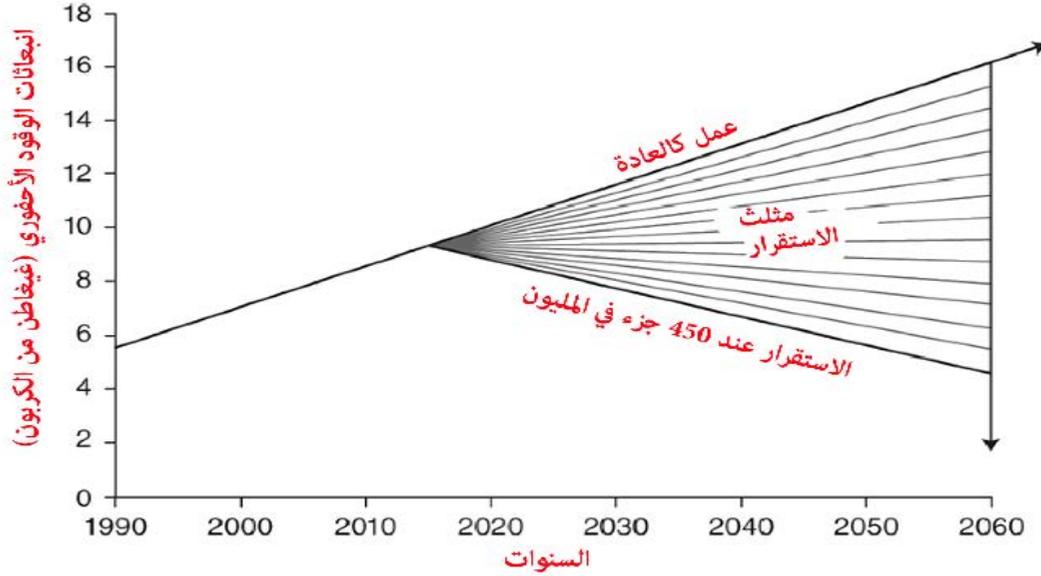


التي يمكن أن تتخذها جميع البلدان والصناعات والأفراد هو أن تكون أكثر كفاءة في استخدام الطاقة.

في الوقت الحالي، يبلغ استخدام الطاقة في منزل متوسط في إحدى الولايات المتحدة ضعف مثيله في المنزل العادي في ولاية كاليفورنيا، في حين يبلغ استخدام الطاقة المحلية في كاليفورنيا ضعف استخدام الدنمارك؛ لذلك يوجد بالفعل داخل العالم المتقدم مدخرات ضخمة يجب تحقيقها فقط من خلال تحسين كفاءة الطاقة.

لا يزال يمثل لغزاً لماذا لا تعمل الصناعة والأعمال على تحسين استخدامهما للطاقة، حيث يمكن أن يؤدي ذلك أيضاً إلى خفض تكاليف التشغيل بشكل كبير. ومع ذلك، سيتم الاستيلاء على مكاسب الكفاءة في نهاية المطاف عن طريق زيادة الاستخدام. على سبيل المثال، إذا ضاعفنا كفاءة بليونسيارة، فسيتم القضاء على هذا المكسب بمجرد وضع بليونسيارة أخرى على الطرق؛ لذا فإن أحد أهم المجالات هو إنتاج طاقة نظيفة أو خالية من الكربون.





أوتاد التثبيت لتحقيق تركيز في الغلاف الجوي يبلغ 450 جزءاً في المليون من ثاني أكسيد الكربون.

• الطاقة البديلة والمتجددة والنظيفة

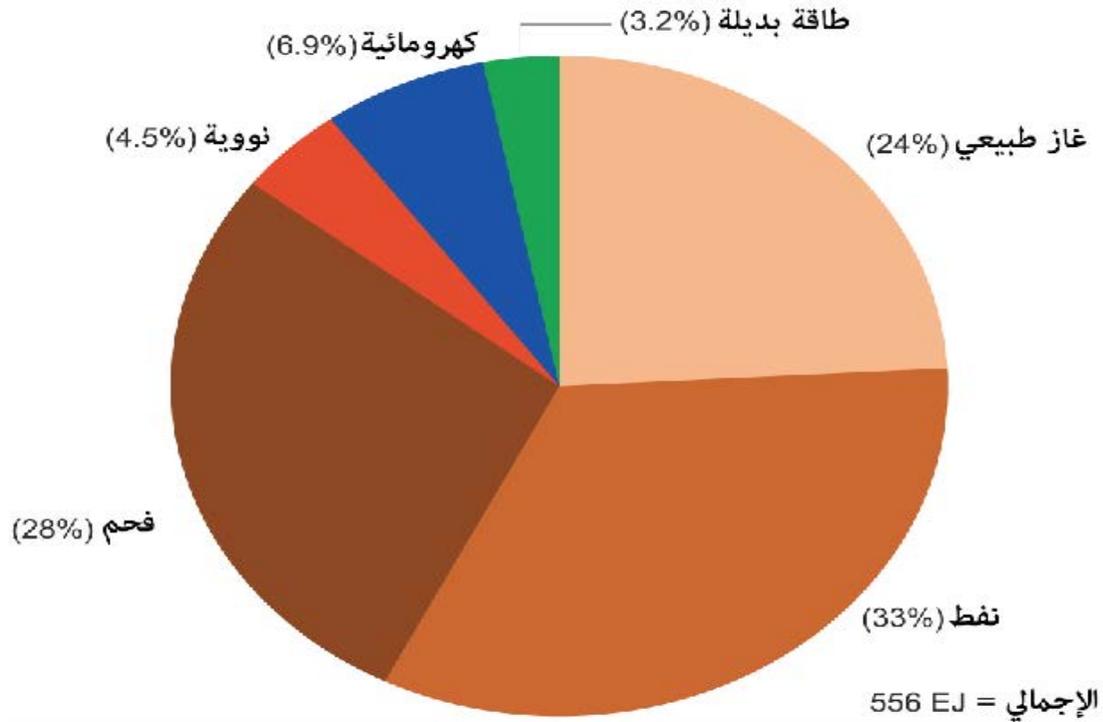
يعتبر الوقود الأحفوري اكتشافاً مذهلاً، وقد سمح للعالم بالتطور بمعدل أسرع مما كان عليه في أي وقت آخر في التاريخ. يعتمد مستوى المعيشة المرتفع في العالم المتقدم على أنواع الوقود الأحفوري الرخيصة والأمنة نسبياً. ولكن كما وجدنا، فإن حرق الوقود الأحفوري له نتيجة غير مقصودة لتغير المناخ العالمي.

لذا ففي القرن الحادي والعشرين، نحتاج إلى التحول من طاقة الوقود الأحفوري إلى طاقة خالية من الكربون. وتشمل هذه الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة المائية والأمواج والمد والجزر. هناك أسباب أخرى للتحول إلى





مصادر الطاقة المتجددة. الأول هو القلق من أننا وصلنا إلى مستويات موارد «ذروة النفط» و «ذروة الفحم»، وهما ينفدان حالياً من العالم.



الاستهلاك العالمي للطاقة الأولية حسب الوقود عام 2016. قدم الوقود الأحفوري 85% من طاقة العالم، بينما شكلت الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والأشكال المتجددة الأخرى للطاقة 3.2%. بلغ الاستهلاك الإجمالي 556 إكساجول (= 10¹⁸ جول).

هذا غير مرجح تماماً نظراً لجميع الاحتياطات الجديدة من النفط والفحم عالي الجودة التي جرى اكتشافها على مدار العشرين عاماً الماضية. ومع ذلك، وكما يقول الكيميائيون، فإن أكبر جريمة يمكن أن تفعلها بالنفط هي حرقه، حيث يجري بناء المجتمع الصناعي بكامله اعتماداً على البلاستيك المصنوع من النفط.





علاوة على ذلك، نظراً لدورة التكسير الهيدروليكي، يوجد حالياً إمدادات غير محدودة تقريباً من الغاز الطبيعي. ثانياً، صارت البلدان في القرن الحادي والعشرين على دراية تامة بـ (أمن الطاقة Energy security)؛ حيث تعتمد اقتصادات معظم البلدان المتقدمة بشكل كبير على استيراد الوقود الأحفوري، مما يجعلها عرضة لتقلبات الأسواق والابتزاز الدولي.

سنناقش فيما يأتي بشكل موجز لمصادر الطاقة البديلة الرئيسية. ويمكننا أن نرى على الفور كيف تناسب المحافظ المختلفة البلدان المختلفة. على سبيل المثال، تمتلك المملكة المتحدة أفضل موارد طاقة الرياح في جميع أنحاء أوروبا، بينما تتمتع المملكة العربية السعودية بظروف ممتازة للطاقة الشمسية. توجد جميع التقنيات الخاصة بهذه البدائل تقريباً، باستثناء الاندماج النووي.

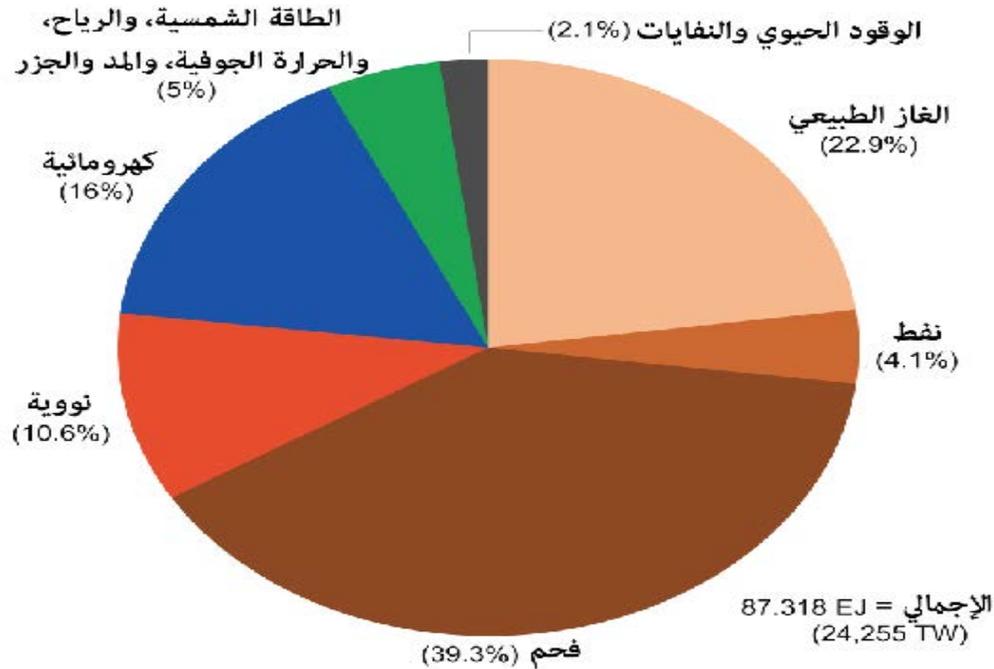
1. الطاقة الشمسية

تستقبل الأرض في المتوسط 343 واط / متر مربع من أشعة الشمس، ومع ذلك فإن الأرض ككل لا تتلقى سوى 2 بليون واط من كل الطاقة التي تبثها الشمس؛ لذا فإن الشمس من نواح عديدة هي المصدر النهائي للطاقة، وهي الطاقة التي تستخدمها النباتات لبلايين السنين. في الوقت الحالي يمكننا تحويل الطاقة الشمسية مباشرة إلى حرارة أو كهرباء أو يمكننا التقاط الطاقة من خلال عملية التمثيل الضوئي عن طريق زراعة الوقود الحيوي. وأبسط نهج هو التسخين الشمسي. على نطاق صغير، يمكن أن تحوي المنازل والمباني الأخرى في البلدان المشمسة على ألواح تسخين بالطاقة الشمسية على السطح،





مما يؤدي إلى تسخين المياه، بحيث يمكن للناس الحصول على حمامات ساخنة خالية من الكربون. على نطاق واسع، تُستخدم المرايا المكافئة لتركيز الطاقة الشمسية لتوليد سائل ساخن (ماء أو زيت) لتشغيل التوربينات لتوليد الكهرباء. أفضل الأماكن لوضع محطات التدفئة الشمسية هي الصحاري ذات خطوط العرض المنخفضة، التي يكون فيها عدد الأيام الملبدة بالغيوم قليل جداً في السنة. جرى بناء محطات التسخين الشمسية في ولاية كاليفورنيا منذ الثمانينيات ويجري بناؤها حالياً في العديد من البلدان الأخرى. تقوم الألواح الكهروضوئية الشمسية بتحويل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء؛ حيث تصطدم أشعة الشمس الفردية باللوح الشمسي وتحرر الإلكترونات الموجودة بداخلها، مما يُولّد تياراً كهربائياً.



توليد الكهرباء على مستوى العالم حسب مصدر الطاقة عام 2015؛ حيث شكل الوقود الأحفوري أكثر من 66% من توليد الكهرباء، بينما شكلت الطاقة الشمسية وطاقة الرياح أقل من 5%.





الميزة الرئيسية للألواح الشمسية هي أنه يمكنك وضعها في المكان المطلوب للطاقة وتجنب البنية التحتية المعقدة المطلوبة عادة لنقل الكهرباء. على مدى العقد الماضي، كانت هناك زيادة هائلة في كفاءتها، حيث كانت كفاءة أفضل الألواح الشمسية المتاحة تجارياً تبلغ نحو **21%**، وهو أكثر بكثير من التمثيل الضوئي عند نحو **1%**. علاوة على ذلك، كان هناك انخفاض كبير في الأسعار بسبب **الاستثمار الضخم** في التكنولوجيا.



توجد أشكال متعددة للاستفادة من الطاقة الشمسية: إما بتحويلها إلى كهرباء، وإما باستخدامها في التسخين.

تكنولوجيا تحويل طاقة الشمس إلى كهرباء ليست جديدة. مدفوعة بأزمة النفط في السبعينيات، جرى بناء تسع محطات للطاقة الحرارية الشمسية بسعة إجمالية قدرها 354 ميغاواط في **الثمانينيات** في صحراء موهافي، **كاليفورنيا**.





تضاءل الاهتمام بالطاقة الشمسية مع انخفاض أسعار النفط، إلا أنه استيقظ مرة أخرى عندما بدأت الأسعار في الارتفاع في عام 2002.

يمكن تحويل الإشعاع الشمسي إلى كهرباء باستخدام الخلايا الكهروضوئية. والآخر هو توجيه التوربينات بسائل يجري تسخينه بواسطة الطاقة الشمسية باستخدام المرايا.

تستخدم الخلايا الكهروضوئية التأثير الكهروضوئي، وهي عملية تحرير إلكترون من ذرة عن طريق امتصاص الذرة للفوتون الساقط، أو حزمة من الضوء. في أبسط أشكالها، تتكون الخلية الكهروضوئية من طبقات من مادة p و n شبه موصلة، غالباً ما تكون مصنوعة من السيليكون، محصورة بين طبقات من المواد الموصلة.

ينتج ضوء الشمس الساقط على الطبقة n إلكترونات يجري تجميعها في المشغل لإنشاء فرق جهد بين الوجهين الأمامي والخلفي للخلية. يحرك فرق الجهد تياراً كهربائياً عندما يكون الجانبان متصلين بواسطة موصل. تتناسب كمية الكهرباء التي تنتجها الخلية الكهروضوئية تقريباً مع كمية الإشعاع الشمسي الساقط عليها.

يجري تركيب الخلايا الكهروضوئية في وحدات تُدمج بدورها لتشكيل لوحات بأحجام وأرقام مختلفة، حسب التطبيق والاستخدام. مع أن وجود أنواع أخرى من الخلايا الكهروضوئية، فإن خلية السيليكون الكهروضوئية القياسية تشكل 90% من السوق. تنتج الخلايا الكهروضوئية تياراً كهربائياً مباشراً يجب تحويله إلى التيار المتردد المنزلي القياسي باستخدام أجهزة تعرف بالعاكسات (إنفرترات).





توفر الخلايا **الكهروضوئية** مرونة كبيرة. على سبيل المثال، يمكن تركيب آلاف الألواح الشمسية معاً لتشكيل مزارع شمسية شاسعة، أو يمكن تركيب عدد قليل من الألواح الشمسية على المباني السكنية والتجارية الفردية لتلبية الطلب المحلي. يعمل التكوين الأخير جيداً بشكل خاص إذا كانت الألواح الشمسية متصلة بالشبكة الكهربائية؛ لأنه يمكن بعد ذلك بيع الطاقة الزائدة أو مبادلتها بالكهرباء العامة عندما لا يجري الحصول على أي منها من **المصفوفات الكهروضوئية**. وهذا يعني أيضاً عن الحاجة إلى أجهزة تخزين باهظة الثمن، مثل بنوك البطاريات. والمصفوفات الكهروضوئية مناسبة أيضاً لأجهزة الطاقة المعزولة عن مصادر الطاقة الأخرى، مثل مضخات المياه في المراعي الزراعية البعيدة.



مشروع جاسبر للطاقة الشمسية الكهروضوئية **Jasper Solar PV Power Project**، في جنوب إفريقيا. يتكون مشروع جاسبر من 325000 لوح شمسي بسعة 96 ميغاواط. دخل المصنع الخدمة في أكتوبر 2014 وهو حالياً الأكبر في إفريقيا. اعتباراً من عام 2016، تبلغ قدرة أكبر محطة للطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم 648 ميغاواط وتقع في كاموثي، تاميل نادو، الهند.





تُعرف كفاءة **الخلية الشمسية** على أنها كمية الطاقة الكهربائية التي تنتجها الخلية مقسومة على كمية الطاقة الشمسية التي تتلقاها. تحقق الخلايا التجارية عموماً كفاءات تتراوح بين 16 و 20%. يجري توجيه الكثير من الجهد لإنتاج الخلايا الكهروضوئية ذات كفاءة أكبر.

على سبيل المثال، يتكون الإشعاع الشمسي من فوتونات ذات طيف من الطاقات، لكن مواد معينة من أشباه الموصلات يمكنها امتصاص الفوتونات فقط في نطاقات ضيقة من الطاقات، مما يحد من كفاءتها.

لذلك، تتمثل إحدى طرائق اكتساب الكفاءة في بناء خلايا تتكون من طبقتين أو ثلاث طبقات من أشباه موصلات مختلفة **تمتص الفوتونات** في أجزاء مختلفة من **طيف الطاقة**. اعتباراً من عام 2016، بلغت كفاءة الألواح الشمسية التجارية الأكثر كفاءة نحو 23%.

حققت بعض **الخلايا الكهروضوئية** المختبرية كفاءات تزيد على 40%، وكفاءات تصل إلى 50% ممكنة من الناحية النظرية. يشير أداء الخلايا البحثية إلى أنه لا يزال يتعين تحقيق تقدم تكنولوجي كبير في كفاءة الخلايا وتصنيعها، مما سيؤدي إلى مزيد من خفض التكاليف.

يمكن أيضاً **توليد الكهرباء** من الطاقة الشمسية باستخدام المرايا التي تركز ضوء الشمس على أجهزة الاستقبال. يتحول ضوء الشمس الذي يصيب جهاز الاستقبال إلى حرارة، مما يؤدي إلى تسخين سائل يدفع بدوره توربيناً بخارياً مقترناً بمولد قياسي. وتُعرف هذه العملية عموماً بتركيز الطاقة الشمسية، أو ببساطة الطاقة الشمسية الحرارية، وهي عملية أكثر في المناطق الخالية





من السحب التي تستقبل أكثر من 7 كيلو واط / متر مربع يومياً من الطاقة الشمسية، مثل معظم المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية في العالم.

الطريقة الشائعة لتركيز الطاقة الشمسية هي استخدام حوض خطي مكافئ يعكس ويركز ضوء الشمس على أنبوب مملوء بالزيت أو الملح المصهور يمر أسفل مركز الحوض.

يمكن **توجيه القيعان** في اتجاه الشمال والجنوب وتتبع الشمس مع تقدم اليوم. تتمثل الطريقة الثانية في استخدام مجال كبير من مرايا تتبع الشمس لتركيز ضوء الشمس على جهاز استقبال في أعلى برج مركزي، حيث يقوم الضوء المركز مرة أخرى بتسخين الزيت أو الملح المصهور.

في **كلتا الحالتين**، يستخدم السائل الساخن لغلي الماء، والذي بدوره يقود التوربينات البخارية. يعد نظام توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية ايفانبا **Ivanpah**، الموجود في صحراء موجا في **Mojave** في أمريكا، من بين أكبر أنظمة الأبراج الشمسية، بسعة 392 ميغاواط.

مع أن **أنظمة الطاقة الشمسية** المركزة أعلى من الأنظمة الكهروضوئية، إلا أن ميزتها الرئيسية هي أنه يمكن تصميمها لتخزين الطاقة لاستخدامها في الليل أو في الأيام الملبدة بالغيوم. أحد هذه الأنظمة هو مشروع أنداسول **AndaSol**، وهو عبارة عن محطة على الشكل قطع مكافئ للطاقة الشمسية بقدرة 150 ميغاواط في مقاطعة غرناطة بإسبانيا. وسيط التخزين عبارة عن ملح مصهور يشتمل على 60% نترات صوديوم و40% نترات بوتاسيوم. بعد التسخين، يُضخ الملح المصهور في خزان تخزين ساخن عند 386 درجة مئوية، ثم يمر عبر مبادل حراري لغلي الماء





حيث يُنقل إلى خزان «بارد» عند 292 درجة مئوية، وبعد ذلك يُضخ الملح المصهور للعودة إلى أنابيب **التسخين** في أحواض القطع المكافئ. يحافظ النظام على أكثر من سبع ساعات من سعة التخزين عند التحميل الكامل.

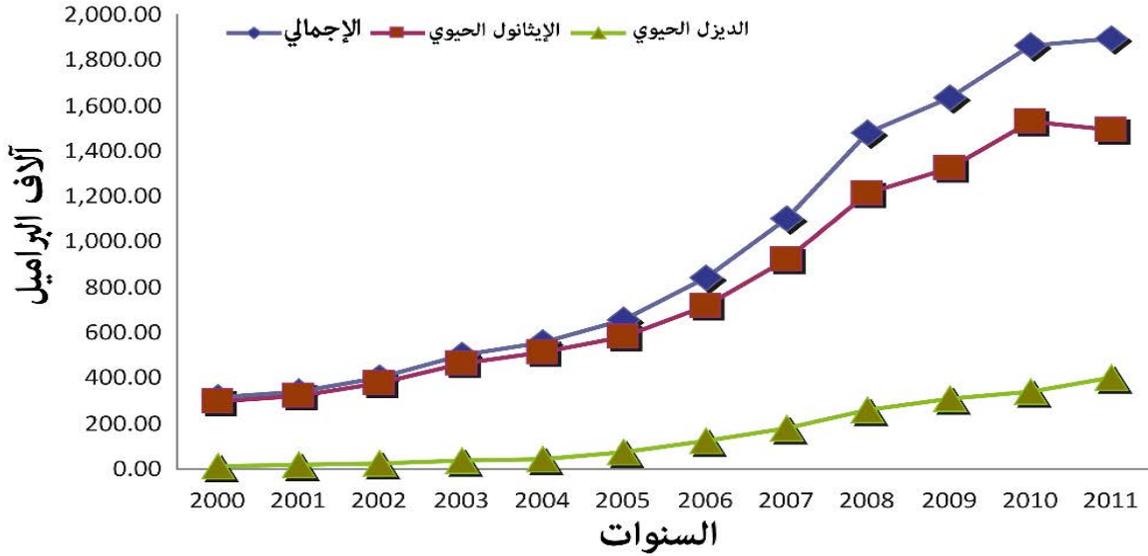
2. الوقود الحيوي

هذه هي نتاج الطاقة الشمسية التي يجري تحويلها إلى كتلة حيوية للنبات عن طريق التمثيل الضوئي، والتي يمكن استخدامها بعد ذلك لإنتاج وقود سائل. يقوم الاقتصاد العالمي على استخدام الوقود الأحفوري السائل، ولا سيما في قطاع النقل. لذلك على المدى القصير، يمكن أن يكون الوقود المشتق من النباتات وسيلة وسيطة منخفضة الكربون لتشغيل السيارات والسفن والطائرات.

هناك مخاوف من أن إنتاج الوقود الحيوي يمكن أن ينافس المحاصيل الغذائية. في الواقع، ألقى اللوم في البداية على ذروة أسعار الغذاء في الأعوام 2008 و 2011 و 2012 على إنتاج الوقود الحيوي، لكن تحليل هذه الزيادات الهائلة أظهر أن الجاني الحقيقي كان في الواقع زيادة أسعار النفط والمضاربة على الغذاء في الأسواق المالية.

في النهاية، السيارات الكهربائية هي المستقبل؛ لأن الكهرباء المطلوبة يمكن إنتاجها بطريقة محايدة الكربون. ومع ذلك، فإن مصدر الطاقة هذا ليس خياراً للطائرات. يجمع وقود الطائرات التقليدي الكيروسين بين الوزن الخفيف نسبياً وإنتاج الطاقة العالي. تجري الأبحاث لمعرفة ما إذا كان يمكن إنتاج وقود حيوي يكون خفيفاً وقوياً بدرجة كافية ليحل محل الكيروسين.





إجمالي إنتاج العالم من الوقود الحيوي والإيثانول الحيوي والديزل الحيوي من عام 2000 إلى عام 2011.

3. طاقة الرياح

ينعكس نمو صناعة طاقة الرياح في الحجم المتزايد لتوربينات الرياح. قبل ثلاثين عاماً، ربما كان التوربين النموذجي يبلغ قطره الدوار 10 أمتار (قطر الدائرة التي تعبرها الشفرة).

حالياً، يبلغ قطر التوربينات الأرضية النموذجية ذات الحجم الكبير 100 متر، وتقع على برج بارتفاع 80 متراً (ارتفاع يعادل ارتفاع مبنى مكون من 26 طابقاً)، ولها سعة (أقصى طاقة يمكن أن يولدها التوربين الواحد) 2 ميغاواط. تعد **التوربينات** البحرية أكبر حجماً، حيث يقترب قطر الدوار من 200 متر، وارتفاع البرج 120 متراً، وتصل قدرات توليد الطاقة حتى 10 ميغاواط.





أدت التطورات في تصميم التوربينات أيضاً إلى عوامل قدرة أعلى، تُعرّف على أنها متوسط ناتج الطاقة الفعلي مقسوماً على السعة لسرعة رياح معينة. قد تحقق التوربينات الحديثة في المناطق العاصفة نسبياً عوامل قدرة سنوية تبلغ نحو 40%.

يجري تجميع توربينات الرياح معاً في مزارع الرياح. معظمها لديها قدرات إجمالية تتراوح من عشرات إلى مئات ميغاواط، لكن أكبرها حالياً تبلغ طاقتها أكثر من 1000 ميغاواط. بعبارة أخرى، صارت محطات الطاقة هذه حالياً كبيرة، من حيث القدرة المنتجة، مثل محطات الطاقة النووية الكبيرة وتلك التي تعمل بالوقود الأحفوري.

تناسب الطاقة التي يمكن أن تولدها الرياح نظرياً مع مكعب سرعتها. وبالتالي، فإن الزيادة في سرعة الرياح بنسبة 50% لنقل من 10 إلى 15 كيلومتراً في الساعة يجب أن تنتج طاقة أكبر بنحو 3.4 مرة (مع أن التوربينات لا تلتقط هذه الزيادة بكاملها).

نتيجة لذلك، تعد سرعة الرياح بشكل عام عاملاً أكثر أهمية في تحديد موقع مزارع الرياح من موقع مستهلكي طاقة الرياح. في الولايات المتحدة، يكون متوسط سرعات الرياح السنوية أكبر بكثير في الحزام الشمالي الجنوبي الذي يمر عبر الجزء الأوسط من البلاد منه في أي مكان آخر، وهذا هو المكان الذي تتركز فيه مزارع الرياح حالياً.

تكون سرعات الرياح في المتوسط أقوى بنحو 90% وأكثر اتساقاً على الماء منها فوق الأرض، لذا فإن المواقع البحرية لديها إمكانات هائلة لتطوير مزارع الرياح واسعة النطاق.





جرى تطوير **توربينات الرياح البحرية** في الغالب في أوروبا، إذ أنشأ أول مشروع من هذا النوع في الدنمارك في عام 1991، وبحلول عام 2016 كان هناك ما يقرب من **15 غيغاواط** من طاقة الرياح البحرية المثبتة، ثلثها في المملكة المتحدة. ومع ذلك، فإن هذا لا يمثل سوى **3%** من إجمالي طاقة الرياح المثبتة في جميع أنحاء العالم.

في الولايات المتحدة، لم يُشغّل المشروع البحري الأول، مزرعة بلوك آيلاند للرياح قبالة رود آيلاند، حتى عام 2016. مع أن الرياح البحرية يمكن أن تولد ضعف كمية الكهرباء التي تستخدمها الولايات المتحدة حالياً، إلا أن تكلفتها المرتفعة نسبياً والبيئة التنظيمية المعقدة أدت إلى تباطؤ تطورها.

إذاً تعتبر **توربينات** الرياح وسيلة فعّالة لتوليد الكهرباء، إذا كانت كبيرة ويفضل أن تكون موجودة في البحر. من **الناحية المثالية**، نحتاج إلى توربينات بحجم تمثال الحرية لتحقيق أقصى قدر من الفعالية. يجري بناء مصفوفة لندن في مصب **نهر التايمز** وستولد 1000 ميغاواط، مما يجعلها أكبر مزرعة رياح بحرية جرت الموافقة عليها في العالم. وعند الانتهاء، يمكن أن تزود ما يصل إلى 750 ألف منزل في **لندن** الكبرى بالطاقة وتقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الضارة بمقدار **1.4 مليون** طن سنوياً. ومع ذلك، فإن مشكلة **توربينات** الرياح ذات شقين:

أولاً: لا توفر مصدراً ثابتاً للكهرباء؛ إذا لم تهب الرياح فلا كهرباء.

ثانياً: لا يحبها الناس، ويجدونها قبيحة، وصاخبة، ومقلقة من حيث الآثار التي قد تحدثها على الموائل الطبيعية المحلية.





طبعاً من السهل التغلب على كل هذه المشكلات من خلال وضع مزارع الرياح في مواقع بعيدة وفي البحر وبعيداً عن المناطق ذات الأهمية العلمية أو الطبيعية الخاصة.

علاوة على ذلك، أظهرت الأبحاث الحديثة تأثيراً ضئيلاً أو معدوماً على الحياة البرية المحلية حتى عندما تكون قريبة من توربينات الرياح الأرضية. تشير إحدى الدراسات إلى أن الرياح من حيث المبدأ يمكن أن تولد أكثر من 125000 تيراواط في الساعة، وهو ما يعادل خمسة أضعاف متطلبات الكهرباء العالمية الحالية.



طاقة الرياح العالمية: إجمالي السعة المركبة بالميغا واط 1997-2007، والزيادات المتوقعة لكل عام 2008-2010.





4. طاقة الأمواج والمد والجزر

يمكن أن تكون قوة الأمواج والمد والجزر أيضاً مصدراً مهماً للطاقة في المستقبل. المفهوم بسيط: تحويل الحركة الموجية المستمرة للمحيط إلى كهرباء. ومع ذلك، فإن قول هذا أسهل من فعله، ويشير الخبراء في هذا المجال إلى أن تقنية طاقة الأمواج كانت قبل تقنية الألواح الشمسية منذ نحو 20 عاماً، ولا يزال يلزمها الكثير للحاق بالركب. لكن قوة المد والجزر على وجه الخصوص لها ميزة رئيسية واحدة على الطاقة الشمسية وطاقة الرياح إنها ثابتة. في أي بلد، حتى يجري الحفاظ على إمدادات الطاقة عند مستوى ثابت، يجب أن يكون هناك ما لا يقل عن 20% من الإنتاج مضمون، والمعروف باسم متطلبات خط الأساس. مع التحول إلى الطاقة البديلة، يجب تطوير مصادر جديدة لخط الأساس المتسق هذا.

5. الطاقة الكهرومائية

تعد الطاقة الكهرومائية مصدراً مهماً للطاقة على مستوى العالم. في عام 2010، زودت 5% من طاقة العالم. تأتي غالبية الكهرباء من مشاريع السدود الكبيرة. يمكن أن تمثل هذه المشاريع مشكلات أخلاقية كبيرة حيث يجب غمر مساحات كبيرة من الأرض فوق السد، مما يتسبب في نقل جماعي للناس وتدمير البيئة المحلية.

يعمل السد أيضاً على إبطاء تدفق المياه إلى أسفل النهر ويمنع ترسب الطمي الغني بالمغذيات في الأسفل. إذا كان النهر يعبر الحدود الوطنية، فهناك قضايا محتملة حول الحقوق في الماء والظمي. على سبيل المثال، أحد أسباب **غرق بنغلاديش** هو نقص الطمي بسبب السدود على الأنهار الرئيسية في الهند.





هناك أيضاً نقاش حول مقدار ما توفره محطات توليد الطاقة الكهرومائية من غازات الاحتباس الحراري؛ لأنه مع أن إنتاج الكهرباء لا يتسبب في أي انبعاثات كربونية، فإن النباتات المتعضنة في المنطقة التي غمرتها المياه خلف السد تنتج كميات كبيرة من الميثان.

كما اتضح سابقاً، يجري توليد أكثر من ثلاثة أضعاف كمية الكهرباء التي جرى توليدها في عام 2015 من الطاقة الكهرومائية مقارنةً بالطاقة الشمسية والرياح مجتمعة. هذا يطرح السؤال عن مستقبل الطاقة الكهرومائية: هل ستبقى مصدراً مُهمّاً للكهرباء وتتمو لتلبية الطلب المتزايد، أم ستفوقها الرياح والطاقة الشمسية؟



سد إتايبو في الليل، وهو أكبر محطة لتوليد الطاقة الكهرومائية في العالم من حيث توليد الطاقة وثاني أكبر من حيث القدرة المركبة.





حدد الجرد الذي جُمع في عام 2014 وجود 3700 سد للطاقة الكهرومائية مخطط لها أو قيد الإنشاء في جميع أنحاء العالم بسعة تزيد على 1 ميغاواط. إذا تم بناؤها كلها، فإنها ستوفر نحو 700 غيغاواط من سعة الطاقة الإضافية خلال العقد أو العقدين القادمين. تقع معظم هذه السدود في **البلدان النامية** في آسيا وأمريكا الجنوبية وأفريقيا والبلقان.

وهي تشمل تطورات كبيرة جداً في حوض الغانج - **براهما بوترا في الهند**، وحوض نهر اليانغتسي في **الصين**، وحوض **الأمازون وبلاتا** في البرازيل، وحوض **الكونغو** في جمهورية **الكونغو الديمقراطية**.

على الجانب الإيجابي، فإن الطاقة الكهرومائية ليست مصدراً متقطعاً للكهرباء، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية. لكن من أجل الحفاظ على انخفاض التكاليف، يتطلب دمج مصادر الطاقة المتقطعة في شبكة الطاقة مع مصادر طاقة مصاحبة يمكنها توفير الكهرباء في أي وقت. لذلك، ينبغي أن يؤدي التوسع في استخدام الطاقة الشمسية وطاقة الرياح إلى زيادة جاذبية الطاقة الكهرومائية.

على الجانب السلبي، تأتي الطاقة الكهرومائية مع تأثيرات اجتماعية وبيئية كبيرة، التي صار بعضها واضحاً مؤخراً فقط. تضافرت هذه المخاوف، وارتفاع تكاليف التطوير، والتكلفة المنخفضة باستمرار للطاقة القادمة من الغاز الطبيعي لتكون سبباً في تأخيرات كبيرة في عدد من مشاريع الطاقة الكهرومائية الكبيرة.

في الواقع، توقعت وكالة الطاقة الدولية أن تتوسع قدرة الطاقة الكهرومائية بمقدار 27 غيغاواط فقط سنوياً من عام 2016 إلى عام 2021، وهو ما يمثل





معدل نمو سيكون أبطأ مما كان عليه في السنوات الخمس السابقة. في عام 2016، بالمقارنة، توسعت قدرات طاقة الرياح والطاقة الشمسية بنحو 50 و75 غيغاواط على التوالي مقارنة بعام 2015، وكلاهما ينمو بمعدلات متسارعة خلال العقد الماضي، ويرجع ذلك أساساً إلى انخفاض التكاليف والتقدم التكنولوجي. **كان هذا صحيحاً** بشكل خاص في الولايات المتحدة، حيث تجاوزت قدرة طاقة الرياح في عام 2016 قدرة الطاقة الكهرومائية. تشير هذه الاعتبارات إلى أن الطاقة الكهرومائية سيكون لها دور تؤول إليه في مستقبل الطاقة، ولكن توسعها سيكون محدوداً بسبب العوامل الاقتصادية والبيئية / الاجتماعية التي تفضل التوسع المستمر والسريع لطاقة الرياح والطاقة الشمسية.

6. الطاقة الحرارية الجوفية

تحت أقدامنا، في أعماق الأرض، توجد صخور منصهرة ساخنة. في بعض المواقع، على سبيل المثال في آيسلندا وكينيا، تقترب هذه الصخور الساخنة جداً من سطح الأرض ويمكن استخدامها لتسخين المياه لتكوين البخار. هذا مصدر طاقة ممتاز خالٍ من الكربون؛ لأن جزء الكهرباء الذي تولده من البخار الذي تستخدمه لضخ المياه إلى الصخور الساخنة، لسوء الحظ، **مقيد بالجغرافيا**. ومع ذلك، هناك طريقة أخرى يمكن من خلالها استخدام حرارة الأرض. يمكن أن تحوي جميع المباني الجديدة على بئر تحتها **بمضخات حرارية** من مصادر أرضية. ثم يُضخ الماء البارد إلى هذه الآبار وتسخن الأرض المياه، مما يقلل تكلفة توفير الماء الساخن للمباني ويمكن استخدامه في كل مكان في العالم تقريباً.





محطة نيسجافلير Nesjavellir لتوليد الطاقة في أيسلندا؛ تعطي 120 ميغاواط من الطاقة الكهربائية بالإضافة إلى 380 ميغاواط من الطاقة الحرارية من 83 درجة مئوية من المياه في عام 2010، وتصل درجات حرارة الخزان إلى 380 درجة مئوية.

7. الطاقة النووية

لا ينتج عن توليد الكهرباء من الطاقة النووية ثاني أكسيد الكربون (باستثناء الكميات الصغيرة نسبياً المرتبطة بإنتاج الوقود، وإنشاء المصانع، وإدارة الوقود المستهلك) أو تلوث الهواء، وبالتالي يمكن أن يكون له تأثير كبير في الانبعاثات. على سبيل المثال، ستؤدي زيادة قدرة التوليد الحالية للطاقة النووية من ثلاثة أضعاف إلى 1000 غيغاواط من الناتج الكهربائي بحلول عام 2050 إلى تقليل





انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 2.9 إلى 6.6 غيغا طن سنوياً، طبعاً اعتماداً على ما إذا كانت الطاقة النووية تحل محل الفحم أو الغاز. ويبقى أن نرى ما إذا كانت هذه الزيادة ستحدث. من ناحية أخرى، ينبغي إدراك أن الطاقة النووية هي تقنية عاملة. في عام 2015، كان هناك 450 مفاعلاً نووياً عاملاً توفر نحو 11% من الكهرباء في العالم، أو نحو 2500 تيراواط / ساعة من الطاقة، وهو ما يمثل أكثر من ضعف الكهرباء التي تنتجها الرياح بالإضافة إلى الطاقة الشمسية.

قادت الولايات المتحدة الطريق من خلال 99 مفاعلاً عاملاً زودت 20% من الكهرباء، في حين أن فرنسا لديها 58 مفاعلاً عاملاً توفر 76% من طاقتها الكهربائية. في جميع أنحاء العالم، كان هناك 60 مفاعلاً قيد الإنشاء، بطاقة إجمالية 60 غيغاواط. وكان من بينها 20 في الصين، وسبعة في روسيا، وخمسة في الهند، وأربعة في الولايات المتحدة.

من ناحية أخرى، يواجه التوسع في الطاقة النووية عقبات كبيرة. وتشمل هذه التكلفة والأمان وتخزين النفايات المشعة عالية المستوى وانتشار الأسلحة النووية. في الواقع، أشارت دراسة نُشرت في عام 2003 إلى أنه نظراً للتحديات التقنية والاقتصادية اللازمة للتغلب على هذه العقبات، فلا فائدة تذكر من تطوير الطاقة النووية ما لم يكن من الممكن القيام بها على نطاق واسع بما يكفي لتقليل الانبعاثات بشكل كبير.

الدافع حالياً هو تطوير جيل جديد من المفاعلات القابلة للتطبيق تجارياً، التي يمكن نشرها على المستويين الكبير والصغير. تعد هذه المفاعلات بتحسينات كبيرة في السلامة والتكلفة والميزات الأخرى مقارنة بأسطول المفاعلات الحالي.





يؤكد مؤيدو **الطاقة النووية** أنه ليس لدينا خيار سوى تطوير هذه المفاعلات الجديدة لأنه لا توجد طريقة أخرى لتوفير تيار مستمر من الطاقة النظيفة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وحدهما بسبب تقطعهما. يشير المعارضون إلى النمو السريع للطاقة الشمسية وطاقة الرياح وإلى مخاوف تتعلق بالسلامة ومخاطر الانتشار والتكاليف المرتبطة بالأسطول الحالي من المفاعلات النووية ليقولوا إن السعي وراء الطاقة النووية هو **(حماقة)**.

يوجد لدينا نوعان من الطاقة النووية:

1. طاقة الانشطار النووي

تتولد الطاقة عندما نقوم بشطر ذرات ثقيلة مثل اليورانيوم وهذا إصدار نووي. لديها بصمة كربونية منخفضة جداً، ولكن يجري توليد كمية كبيرة من الكربون لتعدين اليورانيوم واستخراجه من خاماته، وبناء محطة الطاقة النووية، وإيقاف تشغيل محطة الطاقة والتخلص من النفايات النووية بأمان. في الوقت الحالي يجري توليد 5% من الطاقة العالمية بواسطة الطاقة النووية.

يعتبر الجيل الجديد من محطات الطاقة النووية عالي الكفاءة، حيث ينتج ما يقرب من 90% من إنتاج الطاقة الممكن نظرياً. تتمثل العيوب الرئيسية للطاقة النووية في توليد نفايات مشعة عالية المستوى ومخاوف بشأن السلامة، مع أن التحسينات في الكفاءة تقلل من النفايات وأن الأجيال الجديدة من المفاعلات النووية تحوي على أحدث احتياطات الأمان المضمنة فيها.

ومع ذلك، كما تظهر كارثة تشيرنوبيل في عام 1986 و كارثة فوكوشيما دايتشي النووية في عام 2011، لا تزال المحطات النووية غير آمنة، وعرضة





للخطأ البشري والكوارث الطبيعية. ومع ذلك، فإن مزايا الطاقة النووية هي أنها موثوقة ويمكن أن توفر الحمل الأساسي المطلوب في مزيج الطاقة، وهي التكنولوجيا المتاحة بالفعل التي جرى اختبارها بدقة.

2. طاقة الاندماج النووي

يحدث توليد الطاقة هذا عندما تلتحم ذرتان صغيرتان معاً. إنه يحدث في شمسنا وأي نجم آخر. الفكرة هي أنه يمكن الجمع بين الشكل الثقيل للهيدروجين الموجود في مياه البحر وأن منتج النفايات الوحيد هو الغاز غير المشع أي الهليوم.

تكمن المشكلة بالطبع في إقناع هاتين الذرتين بالاتحاد معاً. وتقوم الشمس بذلك عن طريق تعريض الذرات لدرجات حرارة وضغوط عالية بشكل هائل. لقد أُحرز بعض التقدم في **مشروع طوروس Torus** الأوروبي المشترك (JET) في المملكة المتحدة، الذي أنتج **16 ميغاواط** من طاقة الاندماج. تكمن المشكلة في كمية الطاقة المطلوبة لتوليد درجات الحرارة الهائلة في المقام الأول وصعوبة زيادتها إلى حجم محطة توليد الكهرباء.





محطة الطاقة النووية هذه في إنجلترا بها مفاعلان نوويان. يحوي كل منهما على قضبان من اليورانيوم المشع تتفاعل في تفاعل نووي متسلسل. ينظم التفاعل بواسطة (قضبان التحكم) التي تنزل بين قضبان الوقود المشعة لامتصاص النيوترونات ومنع القضبان من التفاعل. تعمل الحرارة الناتجة عن التفاعل النووي على تسخين السائل الذي يُضخ عبر مرجل لتحويل الماء إلى بخار. ويعمل هذا بدوره على تشغيل التوربينات المرتبطة بمولدات الكهرباء.

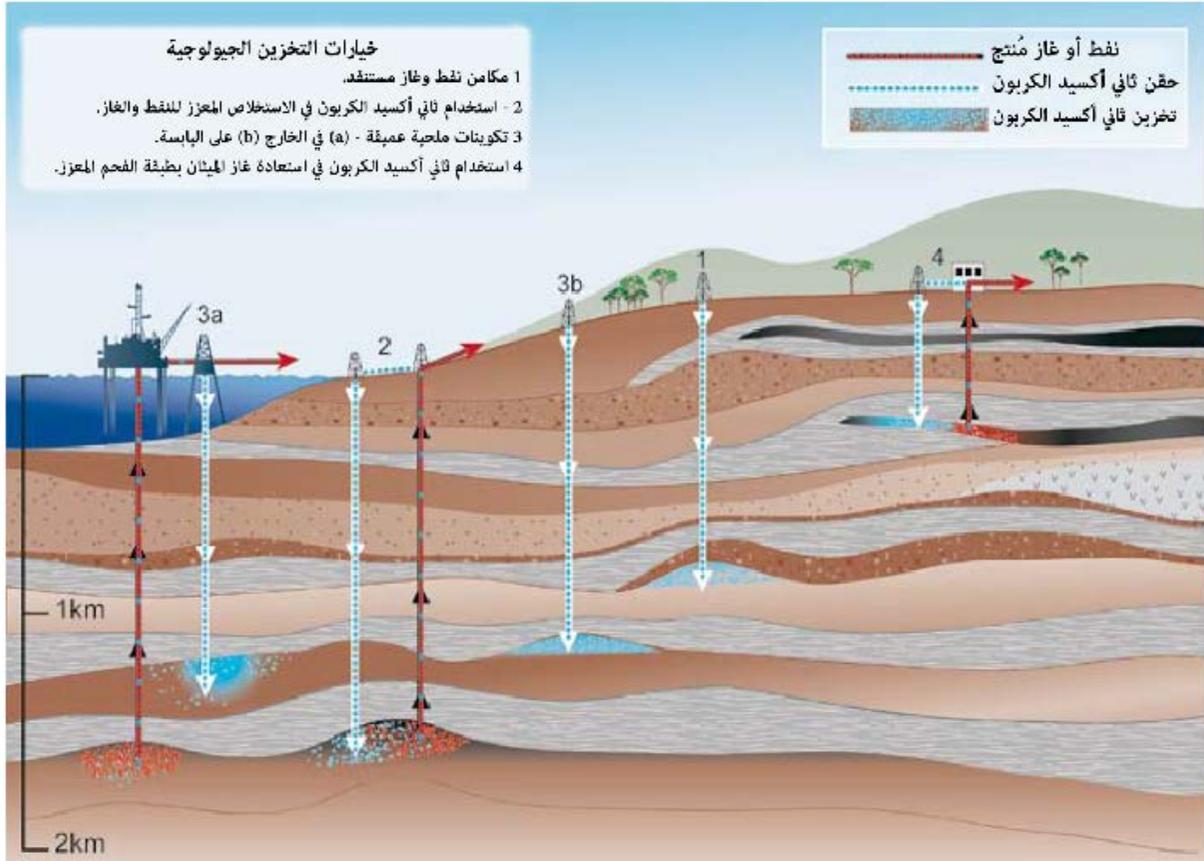
• احتجاز الكربون وتخزينه

يمكن أن تكون إزالة ثاني أكسيد الكربون أثناء العمليات الصناعية أمراً صعباً ومكلفاً؛ لأنه لا يلزم إزالة الغاز فحسب، بل يجب تخزينه في مكان ما أيضاً. في المملكة المتحدة، جرى حساب كلفة أول مشروع تجريبي لاحتجاز الكربون وتخزينه (CCS) في العالم يسمى (الوردة البيضاء White Rose) الذي ستكون جزءاً من موقع Drax Power Station بالقرب من سيلبي، شمال يوركشاير، لتوليد الكهرباء للمملكة المتحدة بالإضافة إلى التقاط ما يقرب من 2 مليون طن من





ثاني أكسيد الكربون سنوياً، وهي نحو 90% من جميع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التي تنتجها المحطة.



إحدى طرائق احتجاز وتخزين الكربون هي إعادته لطبقات الصخور تحت الأرض.

سيتم نقل ثاني أكسيد الكربون عبر خط الأنابيب المقترح للشبكة الوطنية للتخزين الدائم تحت البحر في بحر الشمال. يتم دعم المشروع مالياً من قبل كل من المفوضية الأوروبية (نحو 250 مليون جنيه إسترليني) وحكومة المملكة المتحدة (نحو 100 مليون جنيه إسترليني). يتم تنفيذ هذا المشروع الواسع النطاق





لإثبات أن التكنولوجيا تعمل بالفعل وأن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يؤدي دوراً رئيسياً في الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في المستقبل.

مطلوب دعم مالي من المملكة المتحدة والاتحاد الأوروبي، حيث يمكن أن تتراوح تكاليف الإزالة والتخزين في مكان ما بين 10 دولارات و50 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون. سيؤدي هذا إلى زيادة بنسبة 15 إلى 100% في تكاليف إنتاج الطاقة. ومع ذلك، لا يلزم تخزين ثاني أكسيد الكربون المستعاد؛ يمكن استخدام بعضها في الاستخلاص المعزز للنفط، وصناعة الأغذية، والتصنيع الكيميائي (**إنتاج رماد الصودا، واليوريا، والميثانول**)، وصناعات معالجة المعادن.

يمكن أيضاً استخدام ثاني أكسيد الكربون في إنتاج مواد البناء، والمذيبات، ومركبات التنظيف، والتعبئة، وفي معالجة مياه الصرف. ومع ذلك، في الواقع، يجب تخزين معظم ثاني أكسيد الكربون الذي يتم التقاطه من العمليات الصناعية.

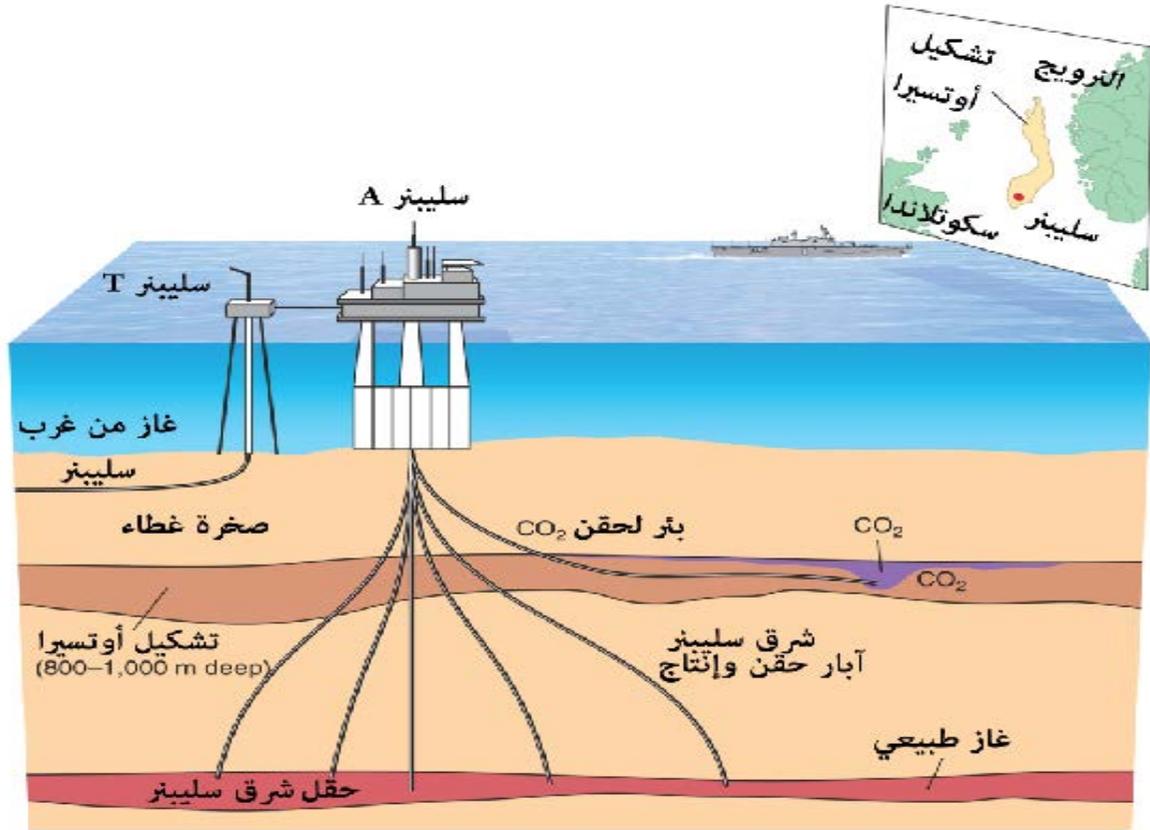
تشير التقديرات إلى أنه من الناحية النظرية يمكن **تخزين ثلثي** ثاني أكسيد الكربون المتكون من احتراق إجمالي احتياطيات النفط والغاز في العالم في الخزانات المقابلة. تشير تقديرات أخرى إلى تخزين 90-400 غيغا طن في حقول الغاز الطبيعي وحدها و90 غيغا طن أخرى في طبقات المياه الجوفية.

يمكن أيضاً استخدام المحيطات للتخلص من ثاني أكسيد الكربون. تضمنت الاقتراحات التخزين عن طريق تفرغ الهيدرات إذا قمت بخلط ثاني أكسيد الكربون والماء عند ضغط مرتفع ودرجات حرارة منخفضة، فإنه ينتج مادة صلبة، أو هيدرات، وهي أثقل من المياه المحيطة، وبالتالي تنخفض إلى القاع.





اقترح آخر أكثر حداثة هو حقن ثاني أكسيد الكربون بعمق نصف ميل في الصخور البركانية المحطمة بين تدفقات الحمم البركانية العملاقة.



يقع مشروع سليبتر Sleipner Project في بحر الشمال قبالة النرويج. يُفصل ثاني أكسيد الكربون عن الغاز الطبيعي ويتم حقنه في تكوين أوتسيرا Utsira Formation، وهو حجر رملي مشبع بالمحلول الملحي يقع على عمق 800 إلى 1000 متر تحت قاع البحر. تمنع الطبقة العلوية من الصخر الزيتي غير المنفذ (صخرة الغطاء cap rock) ثاني أكسيد الكربون من الهروب إلى أعلى. سيذوب ثاني أكسيد الكربون المحاصر في نهاية المطاف في ماء المسام الملحي ويغوص. سليبتر هو واحد من عدة مشاريع كبيرة في جميع أنحاء العالم يتم فيها مراقبة عزل ثاني أكسيد الكربون بعناية لتحديد كيفية عمله. سميت على اسم سليبنيير، حصان أودين ذو الثمانية أرجل في الأساطير الإسكندنافية.





يتفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الصخور البركانية بين تدفقات الحمم البركانية العملاقة. كما يتفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الماء المتسرب عبر الصخور. وستعمل المياه الحمضية على إذابة المعادن في الصخور، وبخاصة الكالسيوم والألومنيوم.

بمجرد أن تتكون بيكربونات الكالسيوم مع الكالسيوم، فإنها لا تستطيع أن تخرج وتهرب. مع أنه إذا هرب إلى المحيط، فإن البيكربونات غير ضارة نسبياً. يوجد في تخزين المحيطات، تعقيد إضافي يتمثل في دوران مياه المحيطات، لذلك مهما كان مصدر ثاني أكسيد الكربون الذي يجري التخلص منه، فإن بعضاً منه سيعود في النهاية. علاوة على ذلك، فإن العلماء غير متأكدين تماماً من الآثار البيئية في النظم البيئية للمحيطات.

المشكلة الرئيسية في كل طرق التخزين هذه هي السلامة. ثاني أكسيد الكربون غاز خطير جداً لأنه أثقل من الهواء ويمكن أن يسبب الاختناق. كان أحد الأمثلة المهمة على ذلك في عام 1986، عندما أدى **انفجار** هائل لثاني أكسيد الكربون من **بحيرة نيوس**، في غرب الكاميرون، إلى مقتل أكثر من 1700 شخص ونفوق **الماشية** على مسافة تصل إلى **25 كيلومتراً**.

مع وقوع كوارث مماثلة في السابق، إلا أنه لم يجر اختناق هذا العدد الكبير من الأشخاص والحيوانات على هذا النطاق في حدث قصير واحد. ما يعتقد العلماء حالياً أنه حدث تسرب لثاني أكسيد الكربون المذاب من البركان القريب من الينابيع تحت البحيرة وكان محاصراً في المياه العميقة بسبب وزن الماء أعلاه.





في عام 1986، كان هناك **انهيار جليدي** اختلط بمياه البحيرة، مما أدى إلى **انقلاب متفجر** للبحيرة بكاملها، وأطلق كل ثاني أكسيد الكربون المحاصر دفعة واحدة. ومع ذلك، في هذه اللحظة بالذات، يُضخ كميات هائلة من ثاني أكسيد الكربون القديم المستخرج في جميع أنحاء الولايات المتحدة لتعزيز استخلاص النفط. لا توجد تقارير عن أي حوادث كبيرة ويشعر المهندسون العاملون في خطوط الأنابيب هذه بأنها أكثر أماناً من خطوط أنابيب الغاز والنفط، التي تمر عبر معظم المدن الكبرى.

• المواصلات

يعتبر النقل من أكبر التحديات التي تواجه التخفيف من انبعاثات غازات الدفيئة. في الوقت الحالي، يمثل النقل 13 % من انبعاثات غازات الدفيئة على مستوى العالم. في المملكة المتحدة، تنخفض انبعاثات الكربون من استهلاك الطاقة والأعمال والقطاعات السكنية مع أن النمو السنوي في الاقتصاد يزداد؛ لكن حتى حكومة المملكة المتحدة تقر بأن انبعاثات النقل، بشكل أساسي من السيارات، تتزايد بمعدل هائل.

يمكن أن يؤدي نمو السيارات على مدار العشرين عاماً القادمة إلى القضاء على جميع التخفيضات في انبعاثات الكربون التي أجرتها المملكة المتحدة منذ عام 1990. إذا قمنا باستقرار هذا الأمر في بقية أنحاء العالم، فإن كل شخص في العالم النامي يطمح في الحصول على مستوى المعيشة نفسه الذي يعيشه الغرب، ويشمل ذلك سيارة واحدة على الأقل لكل أسرة وعطلات منتظمة بالطائرة.





فيما يتعلق بوقود السيارات، يوجد نوعان من الحلول الممكنة: الوقود الحيوي والكهرباء. وقد ناقشنا **الوقود الحيوي** سابقاً، وهذا يعني أنه يمكن الحفاظ على البنية التحتية الحالية لتوفير الوقود السائل للسيارات. ولكن كما رأينا، يجب إنتاج **الوقود الحيوي** بعناية حيث يمكنه المنافسة على استخدام الأراضي مع إنتاج الغذاء، ويمكن أن يؤدي إلى إزالة **الغابات الاستوائية**، ويمكن أن يبقى مصدراً نقياً لانبعاثات الكربون بسبب تكاليف النقل والإنتاج.

في الوقت الحالي، لدينا بالفعل سيارات هجينة تجمع بين محرك بنزين ونظام البطارية. أنتجت بورش وماكلارين بالفعل أول سيارات هجينة خارقة في العالم، حيث يمكن للمحرك الكهربائي توليد المزيد من عزم الدوران الذي ينتج من 0 إلى **60 ميلاً** في الساعة في **2.5 و 2.8 ثانية** على التوالي.

بالنسبة للسيارات العادية، يمكن للنظام الهجين تحسين كفاءة المحرك وتقليل انبعاثات الكربون بمعدل **50%**. ستكون خطوة مُهمّة إلى الأمام إذا كان لا بد من أن تتمتع جميع السيارات الجديدة المنتجة بهذا النوع من الأنظمة. ستكون الخطوة التالية هي الانتقال إلى السيارات الكهربائية بالكامل.





في نهاية المطاف، فإن السيارات الكهربائية هي المستقبل الذي سيعتمده الناس في تنقلاتهم؛ لأنه يمكن ضمان أن الكهرباء المنتجة محايدة الكربون.

سيطلب هذا الانتقال تحسناً مستمراً في عمر البطارية وبناء البنية التحتية للسماح للسيارات بشحنها، تماماً كما تشحن هاتفك المحمول في المنزل. في الرؤية طويلة المدى للجنة تغير المناخ في المملكة المتحدة، تتمثل الخطوة الأولى في إزالة الكربون تماماً من توليد الكهرباء في المملكة المتحدة، ثم زيادة الإنتاج بشكل كبير لضمان أن تكون أنظمة النقل البري والسيارات والحافلات والقطارات كهربائية بنسبة 100%.

صارت الطائرات هدفاً سهلاً لنشطاء تغير المناخ حيث لم يجز تغطية الرحلات الجوية الدولية من قبل معاهدة دولية. حاول الاتحاد الأوروبي من خلال مخطط تداول الانبعاثات تضمين **الانبعاثات** الناتجة عن انبعاثات الطيران التجاري، لكن يُحارب هذا الأمر في المحاكم الدولية.

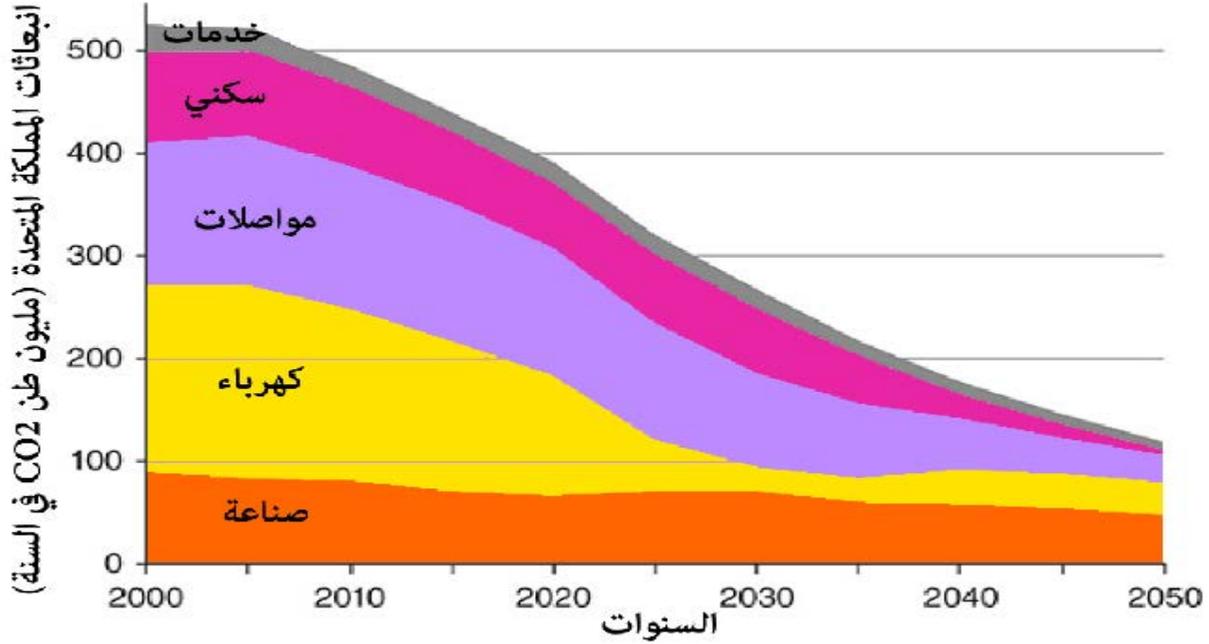




في الوقت الحالي، يأتي 1.6% فقط من الانبعاثات العالمية من الطيران. تُجرى الأبحاث لمعرفة ما إذا كان يمكن إنتاج وقود حيوي يكون خفيفاً وقويّاً بدرجة كافية ليحل محل كيروسين وقود الهواء التقليدي، مع أن هذا يبدو بعيداً وقت كتابة هذا العمل.

الهيدروجين ليس حلاً، لأنّ منتجه **الثانوي** هو الماء؛ هذا جيد على الأرض، ولكن في الهواء العالي ينتج غيوماً رمادية تسهم في ارتفاع درجة حرارة الكوكب. نظراً لعدم وجود حل حقيقي لوقود الطائرات في الوقت الحالي، تحرص شركات الطيران على المشاركة في تجارة الكربون. بهذه الطريقة، يمكن لشركات الطيران تعويض انبعاثات الكربون الخاصة بها من خلال ضمان توفير كمية معادلة في مكان آخر.





انبعاثات الكربون المتوقعة في المملكة المتحدة حتى عام 2050.

• تجارة الكربون وتعويضه

تعتبر تجارة الكربون واحدة من أهم الأدوات في أوروبا لضمان خفض انبعاثات الكربون. هذا هو أحد النهجين اللذين يمكن استخدامهما لجعل الطاقة البديلة وتخزين **الكربون** مجدية اقتصادياً. النهج الثاني هو شراء **تصاريح** الكربون الناتج عن طريق **الوقود الأحفوري** من خلال **مخطط تجاري**.

نظراً لأنه من غير الفعال من حيث **التكلفة** أبداً ملاءمة احتجاز الكربون لمحطات الطاقة التي تعمل بالفحم، يمكن تقليل هذه التكلفة من خلال السماح لهذه الشركات بتبادل الكربون الذي جرى توفيره. تعمل قوانين **ETS** الأوروبية والاتحاد الأوروبي





بالفعل على جعل مصادر **الطاقة المتجددة** أكثر **تنافسية**؛ لذا يجب أن نتذكر أنه إذا أردنا فعلاً تحويل الاقتصاد العالمي بعيداً عن الكربون إلى مصادر **الطاقة البديلة** وتخزين الكربون، فنحن بحاجة إلى طريقة **مالية** لدفع الأسواق.

حتى الوقت الحالي، النهج الوحيد الذي يبدو أنه نجح هو داخل البلدان، واستخدام الكتل التجارية هو نظام الحد الأقصى والتجارة، مما يؤكد بحقيقة أن الحد من انبعاثات الكربون يختلف اختلافاً كبيراً في البلدان والمناطق المختلفة.

أحد أكثر الجوانب إثارة للجدل في **تجارة الكربون** هو التعويض، والذي حدث من خلال **نظامين**: آلية التنمية النظيفة التابعة للأمم المتحدة والأسواق الطوعية. حيث تتضمن آلية التنمية النظيفة برامج معتمدة من الأمم المتحدة في البلدان النامية التي يجري تمويلها لتحقيق وفورات كبيرة في غازات الدفيئة. ويمكن أن يشمل ذلك منع إطلاق غاز الميثان من منجم مهجور، أو زيادة كفاءة الطاقة، أو توليد الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، أو تقليل تصنيع مركبات الكربون **الهيدروفلورية** ومركبات الكلورو فلورو كربون. ويمكن شراء اعتمادات آلية التنمية النظيفة من قبل الدول أو **الشركات** أو من خلال **السوق التطوعي**.

على سبيل المثال، في كل مرة تسافر فيها بالطائرة، يمكنك شراء تعويضات الكربون من خلال عدد من الشركات بما يعادل الكربون المنبعث من رحلتك. في الغرب، شوهدت علامة تجارية جديدة للمنتجات (**المحايدة للكربون**). يبدو أن هذا يشمل أي شيء من شركات التلفزيون مثل **BSkyB** إلى الشركات المصنعة للورق مثل **Arjowiggins**.





الموازنة أمر مثير للجدل حيث يقال إن العديد من هذه التخفيضات كان من الممكن إجراؤها على أي حال، وهذا يعني أيضاً أن الشركات والأفراد قد لا يكون لديهم الدافع لتغيير سلوكياتهم الفعلية. على المستوى العملي، فإنه يوفر طريقة يمكن للأفراد والشركات والدول أن تحدث فرقاً.

كما أنه يوفر وسيلة للتعامل مع انبعاثات الكربون التي لا يمكن تجنبها مثل انبعاثات الطيران. ما يجب أن يحدث هو أن تكون هناك قواعد عالمية واضحة بشأن تعويض الكربون المقبول وغير المقبول. يجب أيضاً أن تكون هناك خدمة تحقق واضحة لضمان توفير الكربون الذي جرى توفيره بالفعل.

• الإعانات

تتعلق إحدى المشكلات السياسية الرئيسية المتعلقة بالحد من انبعاثات الكربون بدعم الطاقة:

أولاً: هناك إعانات ضخمة للوقود الأحفوري، والتي تستمر في جعل النفط والغاز والفحم رخيصاً نسبياً.

ثانياً: هناك مقاومة لتقديم الإعانات والحوافز الضريبية لشركات الطاقة لبناء وتوفير الطاقة المتجددة بأسعار تنافسية.

ويرجع ذلك أساساً إلى وجهة النظر النيوليبرالية الحالية القائلة بأنه لا ينبغي للدول أن تتدخل في الأسواق. ومع ذلك، فإن وجهة النظر هذه بشأن دعم الطاقة المتجددة تأتي عادة من الجهل بالمبالغ الهائلة من دعم الوقود الأحفوري.





في عام 2011، وصل دعم الوقود الأحفوري إلى **90 بليون** دولار في دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية وأكثر من **500 بليون** دولار على مستوى العالم. بالمقارنة مع دعم الطاقة المتجددة، الذي وصل إلى **88 بليون** دولار فقط على مستوى العالم. وإذا ركزنا فقط على الولايات المتحدة الأمريكية، فقد قدرت دراسة أجرتها شركة خدمات المعلومات الإدارية الاستشارية أنه بين عامي 1950 و2010، قدمت الحكومة الأمريكية **369 بليون** دولار لشركات النفط، و121 بليون دولار لشركات الغاز الطبيعي، و**104 بليون** دولار لشركات الفحم.

كما استفاد النفط بشكل كبير من الدعم التنظيمي مثل الإعفاءات من ضوابط الأسعار. خلال الفترة نفسها، استفادت الطاقة غير المائية المتجددة (الرياح والطاقة الشمسية بشكل أساسي) من **74 بليون** دولار من الإعانات، إلى حد كبير في شكل سياسة ضريبية ونفقات حكومية مباشرة على البحث والتطوير (R & D).

واستفادت الطاقة النووية من **73 بليون** دولار من الإعانات، إلى حد كبير في شكل بحث وتطوير، وحصلت الطاقة المائية على **90 بليون** دولار من الدعم. وفقاً لوكالة الطاقة الدولية، فإن دعم الطاقة يخفض بشكل مصطنع سعر الطاقة التي يدفعها المستهلكون، أو يرفع السعر الذي يتقاضاه المنتجون، أو يخفض تكلفة الإنتاج.

(تكاليف دعم **الوقود الأحفوري** عموماً تفوق الفوائد. يمكن أن تحقق الإعانات لمصادر الطاقة المتجددة وتقنيات الطاقة منخفضة الكربون فوائد اقتصادية وبيئية **طويلة الأجل**) وفقاً لفاتح بيرول، كبير الاقتصاديين في وكالة الطاقة الدولية، دون الإلغاء التدريجي لدعم **الوقود الأحفوري**، لن تكون لدينا فرصة للوصول إلى أي أهداف مناخية.





ومع ذلك، هناك سبب آخر لاستمرار دعم الوقود الأحفوري، وهذا يعود إلى ملكية شركات النفط والغاز الكبرى. من بين أكبر 26 شركة للنفط والغاز، هناك 7 شركات خاصة فقط، بينما تمتلك الدول الـ 19 الأخرى بالكامل أو جزئياً.

ومن ثم فإن الشركات المملوكة للدولة تجني مبالغ طائلة للبلاد وستستمر في الحصول على مساعدة الدولة في شكل إعانات وإعفاءات ضريبية لضمان قدرتها على المنافسة مع الدول الأخرى المنتجة للنفط والغاز. من المقرر أن يزداد هذا الأمر سوءاً مع دورة التكسير والغاز الصخري، حيث وجدت العديد من البلدان مثل الولايات المتحدة الأمريكية والمملكة المتحدة احتياطات جديدة من الغاز الطبيعي تحت الأرض.

• الهندسة الجيولوجية أو المثبتات التقنية

الهندسة الجيولوجية **Geoengineering** هو المصطلح العام المستخدم للتكنولوجيات التي يمكن استخدامها إما لإزالة غازات الدفيئة من الغلاف الجوي إما لتغيير مناخ الأرض. تتراوح الأفكار التي يُنظر فيها في إطار الهندسة الجيولوجية من العقلانية جداً إلى الجنون تماماً. في الوقت الحالي، صدر حالياً أكثر من **8.5 بليون** طن من الكربون سنوياً؛ لذلك يجب عمل أي تدخلات على نطاق واسع جداً من شأنها أن تخفّفه.

يوجد ثلاث طرائق رئيسية لإزالة ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي والتخلص منه: البيولوجية، والفيزيائية، والكيميائية.





1. النهج البيولوجية على الأرض. وتشمل استخدام الوقود الحيوي، وإعادة التشجير. إن التشجير أو إعادة التشجير وتجنب إزالة الغابات حلان منطقيان ومفيدان للطرفين. من خلال الحفاظ على غاباتها، يمكننا الاحتفاظ بالتنوع البيولوجي، واستقرار التربة والأمطار المحلية، وتوفير سبل العيش للسكان المحليين من خلال ائتمانات الكربون.

وخير مثال على ذلك عملياً موجود في الصين. بحلول عام 1990، تحولت هضبة اللوس، سلة الخبز للصين لمدة 3000 عام على الأقل، إلى قصعة غبار. بدأت إزالة الغابات والعمل الزائد في التربة في تقليل الخصوبة؛ لذلك كان المزارعون يقطعون المزيد من الأشجار لفتح المزيد من الأراضي لإنتاج ما يكفي من الغذاء للبقاء على قيد الحياة.

صارت الحكومة الصينية على علم بهذه المشكلة وعلى مدى السنوات العشر التالية حرضت على برنامج غرس الأشجار الجذري مع عقوبات قاسية لأي شخص يُقبض عليه وهو يقطع الأشجار. كانت التأثيرات مذهلة: عملت الأشجار على تثبيت التربة، مما قلل بشكل كبير من تآكل التربة. أضافت الأشجار من خلال النتج الرطوبة إلى الغلاف الجوي، مما قلل من التبخر وفقدان المياه.

بمجرد أن وصلت الأشجار إلى الحجم والمساحة الحرجين، بدأت أيضاً في تثبيت هطول الأمطار. يمتص الغلاف الحيوي للأرض بالفعل نحو 2 مليون طن من الكربون سنوياً من تلوثنا، جميع الفوائد مفيدة عند إعادة التشجير.

تشير تقديرات الدكتور **يود بان (دائرة الغابات الأمريكية) وزملائه** في العلوم إلى أن هذا قد يكون أعلى بكثير إذا توقفنا تماماً عن إزالة الغابات والتغيرات الأخرى

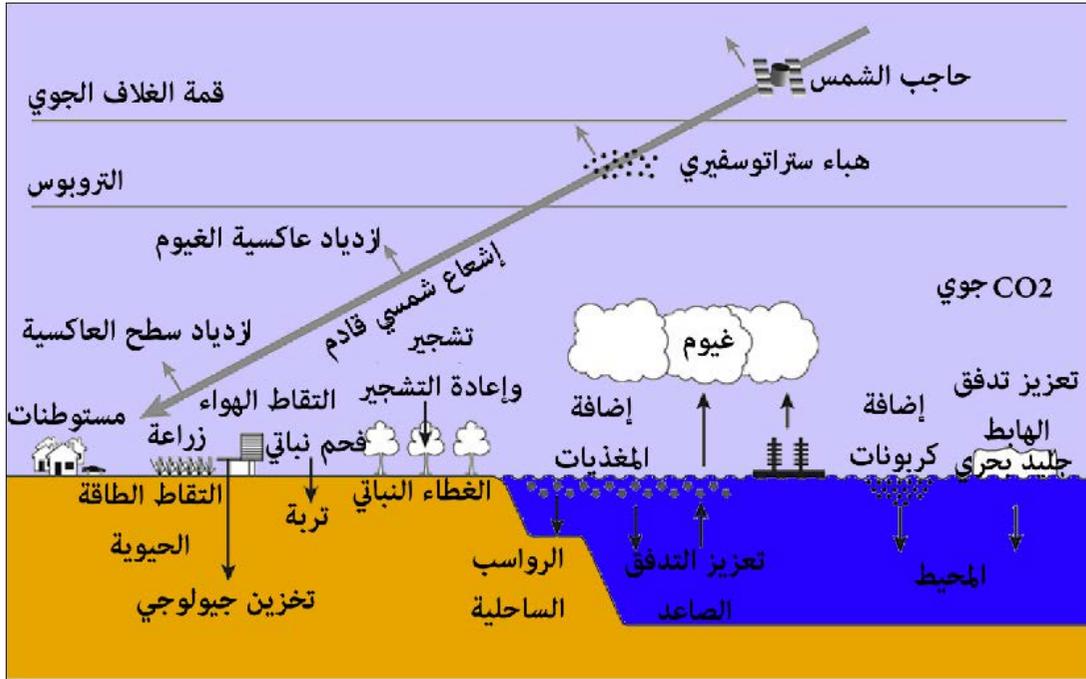




في استخدام الأراضي. في المملكة المتحدة، اقترحت لجنة الغابات زيادة مساحة الغابات في المملكة المتحدة من 12% إلى 16% بحلول عام 2050. وهذا يعني أن هدف الحكومة لخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة 80% بحلول عام 2050 سيكون 70% فقط بسبب امتصاص وتخزين الكربون بواسطة غاباتنا.

المجال الوحيد لمفاوضات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ التي تمضي قدماً هو مناقشة برنامج خفض الانبعاثات الناتجة عن إزالة الغابات وتدهورها في البلدان النامية والذي رمز له اختصاراً بـ (REDD+)، حيث ستحصل البلدان النامية الاستوائية على مدفوعات لحماية الغابات الحالية المهددة بالتهديد أو لإعادة التشجير. يمكن أن تسهم (REDD+) بشكل كبير في تقليل ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، فضلاً عن دعم خدمات النظام البيئي وتوفير الأمن البيئي المحلي والإقليمي.





مجموعة نُهج الهندسة الجيولوجية.

2. النهج البيولوجي الثاني: هو تغيير امتصاص المحيطات لثاني أكسيد الكربون. أشهر إصلاح تقني للمحيطات هو **Technofix** الذي اقترحه البروفيسور الراحل **جون مارتين**. وأشار إلى أن العديد من محيطات العالم تعاني نقصاً في الإنتاج. وذلك بسبب نقص المغذيات الدقيقة الحيوية وأهمها الحديد الذي يسمح للنباتات بالنمو في المياه السطحية. حيث تحتاج النباتات البحرية إلى كميات ضئيلة من الحديد، التي بدونها لا تستطيع النمو. في معظم المحيطات، يتدفق ما يكفي من الغبار الغني بالحديد من اليابسة، ولكن يبدو أن مناطق واسعة من المحيط الهادئ والمحيط الجنوبي لا تتلقى الكثير من الغبار، وبالتالي فهي قاحلة من الحديد؛ لذا فقد اقترح أنه يمكننا تخصيص المحيط بالحديد لتحفيز الإنتاجية البحرية.





ستعمل عملية التمثيل الضوئي الإضافية على تحويل المزيد من ثاني أكسيد الكربون في المياه السطحية إلى مادة عضوية. عندما تموت الكائنات الحية، تسقط المادة العضوية إلى قاع المحيط، وتأخذ معها وتخزن الكربون الإضافي، ثم يتجدد ثاني أكسيد الكربون في المياه السطحية المخفّضة عن طريق ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي؛ لذلك -باختصار- يمكن أن يساعد تسميد محيطات العالم على إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي وتخزينه في رواسب أعماق البحار.

كانت التجارب على هذا في البحر متغيرة جداً، حيث لم يظهر بعضها أي آثار على الإطلاق بينما أظهر البعض الآخر أن كمية الحديد المطلوبة ضخمة. أيضاً، بمجرد التوقف عن إضافة الحديد الإضافي، يُطلق معظم ثاني أكسيد الكربون المخزن، حيث يُسمح بالقليل جداً من المواد العضوية للهروب من المنطقة الضوئية سنوياً.

3. الفيزيائية: من الممكن إزالة ثاني أكسيد الكربون مباشرة من الهواء. ومع ذلك، بالنظر إلى أن ثاني أكسيد الكربون يشكل 0.04% فقط من الغلاف الجوي، فإن هذا أصعب بكثير مما يبدو. إحدى الأفكار المجنونة هي إنتاج أشجار اصطناعية أو بلاستيكية. قام كلاوس لاكنر، الفيزيائي النظري والمهندس ألين رايت، بدعم من عالم المناخ والي بروكر، بتصميم بلاستيك يربط ثاني أكسيد الكربون، الذي يمكنه إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي، ثم يُطلق ثاني أكسيد الكربون من البلاستيك ويُقلل للتخزين.

المشكلة الأولى هي الماء، حيث يطلق البلاستيك ثاني أكسيد الكربون في محلول عندما يكون مبللاً، لذلك يجب وضع الأشجار البلاستيكية في مناطق قاحلة جداً أو تتطلب مظلات عملاقة. **المشكلة الثانية** هي كمية الطاقة المطلوبة لبناء وتشغيل ثم تخزين ثاني أكسيد الكربون. **والمشكلة الثالثة** هي مشكلة





الحجم. ستكون هناك حاجة لعشرات الملايين من هذه الأشجار الاصطناعية العملاقة فقط للتعامل مع انبعاثات الكربون في الولايات المتحدة، فلماذا لا تزرع الأشجار العادية فقط؟ ومع ذلك، فمن الواضح أن تكنولوجيا إزالة ثاني أكسيد الكربون عند المصدر من **الغلاف الجوي** قد تكون مطلوبة.

4. التجوية: تتم إزالة ثاني أكسيد الكربون بشكل طبيعي من الغلاف الجوي على مدى مئات وآلاف السنين من خلال عملية التجوية، بمعدل **0.1 غيغا طن** سنوياً، لكن هذا أقل 100 مرة مما نبعثه. فقط تجوية معادن السيليكات هي التي تحدث فرقاً في مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، حيث إن تجوية صخور **الكربونات** بواسطة حمض **الكربونيك** يعيد ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي.

المنتجات الثانوية لتفاعلات التحلل المائي التي تؤثر في معادن **السيليكات** هي **الكربونات** الحويوية (**HCO₃⁻**)، وتلك التي يجري استقلابها بواسطة العوالق البحرية وتحويلها إلى كربونات الكالسيوم. تترسب بقايا الهياكل العظمية من **الكالسيوم** للكائنات الحية البحرية في نهاية المطاف على شكل رواسب في أعماق البحار، وبالتالي تُفقد من دورة الكربون **البيوجيوكيميائية** العالمية طوال مدة دورة حياة القشرة المحيطية التي ترسبت عليها.

يوجد عدد من أفكار الهندسة الجيولوجية التي تهدف إلى تعزيز تفاعلات التجوية الطبيعية هذه. أحد الاقتراحات هو إضافة معادن السيليكات إلى التربة المستخدمة في الزراعة. سيؤدي ذلك إلى إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي وإصلاحه كمعادن كربونات وكربونات حيوية في محلول. ومع ذلك، فإن النطاق الذي يجب القيام به كبير جداً وهناك تأثيرات غير معروفة في التربة وخصوبتها.





اقترح آخر هو تعزيز معدل تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع البازلت وصخور الزبرجد الزيتوني في قشرة الأرض. سيُحقن ثاني أكسيد الكربون المركز في الأرض وسيشكل الكربونات في أعماق الأرض. مرة أخرى، مثل العديد من أفكار الهندسة الجيولوجية، يعد هذا اقتراحاً رائعاً ولكن بئد القليل جداً من العمل لمعرفة ما إذا كان ذلك ممكناً وآمناً وقابلاً للتطوير.

5. إدارة الإشعاع الشمسي: كما وجدنا سابقاً، فإن العديد من الأفكار المقترحة كحلول للهندسة الجيولوجية لا تزال مجرد أفكار، وتحتاج إلى الكثير من العمل لمعرفة ما إذا كانت مجدية. هذا ينطبق بشكل خاص على أفكار إدارة الإشعاع الشمسي، التي يبدو الكثير منها وكأنه من فيلم هوليوود سيئ فعلاً.

تتضمن هذه الاقتراحات تغيير عاكسية الأرض، أي زيادة كمية الطاقة الشمسية التي تنعكس مرة أخرى في الفضاء لموازنة التسخين الناتج عن الاحتباس الحراري. تشمل هذه الأفكار أيضاً إقامة مرايا ضخمة في الفضاء، وحقن الهباء الجوي في الغلاف الجوي، وجعل المحاصيل أكثر انعكاساً، وطلاء جميع الأسطح باللون الأبيض، وزيادة غطاء السحب البيضاء، وتغطية مناطق كبيرة من صحاري العالم بألواح عاكسة من البولي إيثيلين والألومنيوم.

تكمن المشكلة الأساسية في كل هذه الأساليب في أنه ليس لدينا أي فكرة عن الآثار التي قد تترتب عليها. في الوقت الحالي، يجري واحدة من أكبر تجارب الهندسة الجيولوجية التي أجريت على الإطلاق عن طريق حقن كميات هائلة من غازات الدفيئة في الغلاف الجوي، ومع أن أننا نعرف ما سيحدث بشكل عام، فليس لدينا أي فكرة عما يمكن أن تكون عليه التأثيرات المحددة في نظامنا المناخي.





هذا صحيح بالقدر نفسه مع حلول الهندسة الجيولوجية هذه، إذ لدينا حالياً فكرة قليلة عما إذا كانت ستتجح أو ما هي الآثار الجانبية غير المحسوبة التي قد تكون لها. من نواح عديدة، يمكن رؤية تغير المناخ على الأرض بالطريقة نفسها لرؤية المرض **وجسم الإنسان**: من الأفضل دائماً **الوقاية** من المرض بدلاً من محاولة **تقديم** علاج واحد، ونعلم جميعاً الآثار الجانبية المحتملة للعقار والعلاج الكيميائي أو العلاج الإشعاعي.

دعونا نلقي نظرة على واحدة فقط من هذه الأفكار البعيدة المنال كمثال على الخطأ في إدارة الإشعاع الشمسي: المرايا في الفضاء لتشتيت ضوء الشمس. أكثر هذه الاقتراحات تعقيداً هو من روجر أنجل، مدير مركز البصريات التكيفية الفلكية بجامعة أريزونا، الذي يقترح شبكة من العاكسات الصغيرة لثني بعض الضوء بعيداً عن الأرض. هو نفسه يعترف بأن هذا سيكون مكلفاً، حيث يتطلب **16 تريليون** مركبة فضائية خفيفة الوزن تكلف ما لا يقل عن **1 تريليون** دولار وتستغرق **30 عاماً** لإطلاقها. مثل كل أفكار الهندسة الجيولوجية لتغيير العاكسية على الأرض، فإنها لن تتجح.

تركز كل هذه الأساليب على خفض متوسط درجة حرارة الأرض وتفقد أهمية توزيع درجة الحرارة مع خط العرض، وهو في الواقع ما يدفع المناخ. في الواقع، أوضح دان لونت وزملاؤه في جامعة بريستول، باستخدام نماذج مناخية، أن هذه الأساليب تأخذنا إلى مناخ عالمي مختلف تماماً، مع وجود المناطق الاستوائية يوجد 5 درجات مئوية أكثر برودة، وخطوط العرض المرتفعة **1.5** درجة مئوية أكثر دفئاً، وهطول الأمطار ينخفض بنسبة **5%** على مستوى العالم مقارنة بأوقات ما قبل الصناعة.





• إدارة الهندسة الجيولوجية

لم يستعرض تقرير الجمعية الملكية لعام 2009 حول الهندسة الجيولوجية واقع العلم الحالي فحسب، بل اتخذ أيضاً خطوة مُهمّة لمحاولة فهم قضايا **الحوكمة** المرتبطة بالعمل مع نظام المناخ العالمي. يوجد العديد من القضايا الأخلاقية التي تظهر عند النظر في كيفية تأثير تغير المناخ الإقليمي والعالمي في البلدان بشكل مختلف.

قد تكون هناك نتائج إيجابية عامة ولكن تغييرات طفيفة في أنماط هطول الأمطار، مما قد يعني أن البلدان بكاملها تتلقى القليل جداً أو الكثير من الأمطار، مما قد يؤدي إلى كارثة. لخصت الجمعية الملكية الموقف الحالي، موضحةً أنه يوجد ثلاث وجهات نظر رئيسية حول الهندسة الجيولوجية:

1. إنها طريق لشراء بعض الوقت للسماح بمفاوضات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ الفاشلة بالحق بالركب.
2. تمثل تلاعباً خطيراً بنظام الأرض وقد تكون غير أخلاقية في جوهرها.
3. هي بوليصة تأمين بشكل صارم ضد الفشل الجسيم لسياسة التخفيف. حتى إذا سُمح للبحث بالمضي قدماً وكانت حلول الهندسة الجيولوجية مطلوبة، مثل العديد من المجالات الناشئة للتكنولوجيا الحديثة، فستكون هناك حاجة إلى **حوكمة** وأطر تنظيمية جديدة مرنة.

يوجد حالياً العديد من **المعاهدات الدولية** التي لها تأثير في الهندسة الجيولوجية ويبدو أنه لا يوجد صك واحد يُطبّق. ومن ثم فإن الهندسة الجيولوجية مثل تغير المناخ تتحدى وجهة نظرنا القومية للعالم، وستكون هناك حاجة إلى طرائق جديدة للحكم في المستقبل.





عشرة أشياء يمكنك القيام بها لإبطاء الاحتباس الحراري

في الواقع، نهنئك إذا كنت تريد أن تفعل شيئاً حياً لغير المناخ. يعتمد ما يمكنك فعله للمساعدة في إبطاء الاحتباس الحراري على المكان الذي تعيش فيه والموارد التي لديك ومقدار الوقت الذي يمكنك منحه. قد لا تتمكن من وضع الألواح الشمسية على سطح منزلك غداً، ومن المحتمل ألا تتخلى عن سيارتك لصالح سيارة هجينة بحلول يوم الثلاثاء المقبل. لكن يمكنك إجراء تغييرات بسيطة لها تأثير كبير في المناخ.

1. القيادة الذكية

تمثل انبعاثات الوقود من النقل نحو 16% من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري العالمية أو (24% من الانبعاثات الناتجة عن استخدام الطاقة، باستثناء إزالة الغابات). يمثل النقل أيضاً ما يقرب من ثلثي استخدام النفط في الولايات المتحدة، وبقدر ما يبدو الأمر مؤلماً، يمكنك تقليل انبعاثات سيارتك بشكل أفضل من خلال عدم امتلاك سيارة على الإطلاق (مع أن عدم وجود تغييرات كبيرة في تخطيط استخدام الأراضي والوصول إلى وسائل النقل الجماعي، سيكون هذا أكثر صعوبة بالنسبة للبعض من البعض الآخر)!

إذا كان يجب عليك القيادة، فقم بالقيادة بذكاء. القيادة الفعّالة هي القيادة الصديقة للمناخ. يمكن أن يؤدي إجراء الكثير من التغييرات الطفيفة إلى خفض انبعاثات سيارتك بشكل كبير:





- **تشارك ركوب السيارة عندما تستطيع.**
- **قم بإيقاف تشغيل سيارتك** عندما تتوقف لمدة عشر ثوانٍ أو أكثر. يسري هذا عندما يجري إيقافك للتوقف أو التأخير بسبب حركة المرور التي تؤدي إلى توقف الجميع، وليس إذا كنت في منتصف حركة المرور عند إشارة مرور.
- **قم بجميع مهامك** في الوقت نفسه، بدلاً من توزيعها على مدار اليوم.
- **حافظ على نظافة محرك سيارتك** وتحديثه وتشغيله بكفاءة من خلال أخذ سيارتك لإجراء فحوصات منتظمة أو (القيام بذلك بنفسك).
- **املاً الإطارات** بنقطة الضغط المثالية (التي يمكنك أن تجدها مكتوبة مباشرة على الإطار) لاستخدام وقود أقل.

2. دعم الطاقة النظيفة والمتجددة

يمكنك دعم تطوير الطاقة النظيفة والمتجددة بطرائق عدة، اعتماداً على المكان الذي تعيش فيه.

فيما يأتي الطريقتان الأكثر شيوعاً لإحداث تأثير كبير:

- **اصنع الطاقة:** يمكنك صنع الطاقة بنفسك باستخدام خيارات، مثل: الطاقة الشمسية لإنتاج الماء الساخن، وتوليد الكهرباء.
- **اشتر الطاقة:** يمكنك شراء الطاقة من شركة تستخدم مصادر طاقة منخفضة الانبعاثات. يمكن شراء الطاقة الخضراء في معظم المقاطعات في كندا. تغطي الشركات أيضاً 30 ولاية في الولايات المتحدة، مع شركات مماثلة في جميع أنحاء المملكة المتحدة، وفي كل ولاية في أستراليا.





3. راقب طاقة منزلك

المفتاح في إنشاء منزل موفر للطاقة (سواء أكنت ترغب في الحفاظ على الحرارة داخله أم خارجه) هو العزل، ثم العزل. تشكل تكاليف التدفئة والتبريد 80% من فاتورة الطاقة لديك، لذا أغلق مداخلك ونوافذك وتأكد من أن لديك العزل المناسب لمساحة المشي والعلية والجدران. قد تستغرق بعض هذه التغييرات بعض الوقت والجهد، لكنها تستمر لعقود وتوفر لك بشكل كبير في تكاليف الطاقة، كل ذلك مع تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. ابدأ بتدقيق الطاقة حتى تعرف أين يمكن أن تمنحك أموالك أفضل النتائج.

4. ضع تغير المناخ نصب عينيك

التغييرات التي تجريها في المنزل مهمة، بلا شك. لكن معظم الناس يقضون غالبية ساعات استيقاظهم في العمل. يقدم أسطول البناء والنقل الخاص بصاحب العمل (إذا كان لدى شركتك واحداً) مشروعين رئيسيين ينتظران فقط معالجتهم. إذا كنت تتذمر، فقد تجد أن زملاءك يريدون أيضاً تحويل مكتبك إلى اللون الأخضر.

فيما يأتي بعض الاقتراحات التي يمكنك تقديمها لرئيسك في العمل أو مدير المبنى أو صانعي القرار الآخرين في العمل للبدء:

- **ضع سياسة للطاقة** تقلل من استخدام الشركة أو المنظمة للطاقة وضع هدفاً لتقليل الانبعاثات.





- **ضع نظام إعادة التدوير** والتحويل إلى سماد .
- **ضع لافتات** أو إخطارات لتذكير الأشخاص بإغلاق أجهزة الحاسوب والأضواء وغيرها من المعدات المكتبية عند مغادرتهم مكاتبهم .
- **نظم برامج** غداء شهرية واطلب من المتحدث الحضور للتحديث عن حلول لتغير المناخ .

تعني العديد من هذه المهام رفع القضية إلى مدير المشروع أو الرئيس، أو حتى إلى **مدير الصيانة** أو إدارة المرافق. يمكن أن يجعلك تشكيل لجنة أو **فريق استشاري** مع زملائك أكثر فاعلية ونجاحاً، يمكنك أن تجد القوة والدعم بالأعداد .

عندما تمثل الشركة أكثر من الأرباح، يُظهر **الموظفون** ولاءً أكبر للشركة وتحسناً في معنوياتهم، مما يؤدي إلى أداء وظيفي أفضل وانخفاض في التغيب عن العمل .

5. **قلل من تناول منتجات اللحوم**

يمكن أن يساعد تناول عدد أقل من منتجات اللحوم حقاً في تقليل بصمتك الكربونية. على مدار عام واحد، فإن تأثير التحول إلى نباتي يشبه انتقال سيارتك العادية لسيارة هجينة .

لست بحاجة إلى أن تصير نباتياً بشكل كامل. لكن حاول أن تبدأ يوم أو يومين في الأسبوع بدون لحم. الحل الأفضل التالي هو محاولة شراء اللحوم البرية أو التي يجري تربيتها محلياً، والتي تأتي عادةً من عمليات أصغر وأقل استهلاكاً للطاقة .





6. شراء أجهزة إلكترونية وأجهزة موفرة للطاقة

كن متحفظاً في **اختياراتك الشرائية**. عندما تشتري الأجهزة الإلكترونية أو الكهربائية، لا تشتتر ما لا تحتاجه. إذا حصلت على مجموعة من الأدوات التي أغريت بشرائها، فسوف ينتهي بك الأمر إلى استهلاك المزيد من الكهرباء أكثر مما تنوي.

في بعض الأحيان تحتاج فقط إلى **جهاز جديد** أو إلكتروني. الخبر السار هو أن كل أنواع الأجهزة الإلكترونية والأجهزة تقريباً، من غسالات الأطباق إلى شاشات الحاسوب، تأتي في نماذج موفرة للطاقة. ابدأ عادة البحث عن ملصقات كفاءة الطاقة، مثل **نجمة الطاقة Energy Star**.



توضع علامة خدمة نجمة الطاقة على المنتجات الموفرة للطاقة. ابحث عن هذا الشعار عند التفكير في مواد وأجهزة جديدة. شعار برنامج نجمة الطاقة مدعوم من وكالة حماية البيئة.





يمكن أن تحدث عادات الطاقة التي لديك في حياتك اليومية فرقاً أيضاً. فيما يأتي بعض **التغييرات** الموفرة للطاقة التي يمكنك إجراؤها على روتينك اليومي:

- **استخدم علاقة** تجفيف أو حبل غسيل بدلاً من مجفف الملابس الكهربائي. إذا كنت تستخدم المجفف، املاه ولا تشغله أكثر من اللازم.
- **قم بالتبديل** إلى مصابيح الفلوريسنت المدمجة أو لمبات الصمام الثنائي الباعث للضوء (LED)، وقم بتشغيل المصابيح فقط عندما تحتاج إليها.
- **قم بإغلاق جهاز الحاسوب** الخاص بك عند عدم استخدامه.
- **قم بشراء المنتجات القابلة** لإعادة التدوير أو التي تتضمن محتوى معاد تدويره.
- **اختر أشكال السفر** الموفرة للطاقة، مثل: (القطار أو الحافلة) للرحلات القصيرة، أو للوصول إلى العمل، استقل دراجتك أو الحافلة أو المترو.
- **تجنب الرحلات** غير الضرورية تماماً.

يمكن أن يساعد أي خيار تتخذه، سواء أكنت عند مكتب الخروج أم تقوم بضبط منظم الحرارة في المنزل، في تقليل انبعاثاتك.





7. إطلاق حملة بيئية محلية

من خلال إطلاق **حملة بيئية محلية**، يمكنك المساعدة في زيادة الوعي والعمل مع الآخرين لإحداث تغيير إيجابي في مجتمعك. لست مضطراً إلى تنظيم احتجاج أو اعتصام. عليك ببساطة وضع **خطة مصممة** خصيصاً لاحتياجات مجتمعك وحملتك.

فيما يأتي بعض الخطوات التي يمكنك اتباعها لمساعدتك على البدء:

- **اختر قضية ذات صلة بمجتمعك** مرتبطة بشكل مباشر بتغير المناخ. على سبيل المثال، ربما لا يوجد في بلدتك لوائح داخلية لمكافحة التباطؤ في الاستجابة، وتعتقد أنه ينبغي ذلك. من خلال معالجة هذه المشكلة، يمكنك المساعدة في مكافحة تغير المناخ وحماية الأطفال المصابين بالربو.
- **اتصل بالمنظمات المحلية المرتبطة** بمشكلتك أو التي تعمل على حلها، واطلب منها الموارد والمشورة. قم بالتقاء شبكة واسعة، وتحقق من مجموعات خدمة المجتمع، ومجموعات الشباب، والمجموعات البيئية، وما إلى ذلك.
- **ابحث عن مكان** للاجتماع. ابحث عن مكان مجاني أو غير مكلف، مثل: (مكتبة عامة أو قاعة مجتمعية).
- **حدد موعداً لاجتماعك**. اختر وقتاً تعتقد أنه يتوافق مع جداول معظم الأشخاص. أيضاً، قد ترغب في تقديم رعاية للأطفال. وفكر في إمكانية الوصول للمعاقين جسدياً. وامنح الأشخاص إشعاراً مسبقاً حتى يتمكنوا من اتخاذ الترتيبات اللازمة لحضور الاجتماع.





- **تواصل مع المجتمع** لجذب أكبر عدد ممكن من الأشخاص لحضور الاجتماع. أرسل معلومات الحدث إلى محطات الراديو والصحف. اطلب من الأصدقاء وضع لافتات وإرسال الدعوات، وإرسال رسائل بريد إلكتروني جماعية.
- **قم بإعداد مجموعة** على أحد مواقع التواصل الاجتماعي. لا تخجل من نشر الخبر.
- **قل ما تريد في الاجتماع**، ثم اطلب من الجميع التحدث. حدد هدفك الملموس، وحدد خطة عمل، وتأكد من أن كل شخص لديه ما يفعله عندما يغادر.

8. اكتب لقادتك

يمكن للرسائل الموجهة إلى ممثلك أن تحدث فرقاً. قد **تجذب البطاقات البريدية** انتباه شخص ما، ويحدث أحياناً تقديم التماسات، ولكن الرسائل هي الأكثر فاعلية إلى حد بعيد. المسؤولون حريصون على معرفة رأي الناس.

لا تقلق بشأن كتابة **خطاب طويل** أو عميق جداً. استخدم الرسالة للتعبير عن مخاوفك وأفكارك بأبسط قدر ممكن من البساطة، ثم أرسلها. للحصول على مزيد من التأثير لباقي كتابات الخطابات، انسخ الرسالة وأرسلها بالبريد إلى **مسؤولين محليين وإقليميين آخرين**. يمكنك حتى أن تطلب مقابلة أحد المسؤولين لمناقشة ما تفعله الحكومة بشأن تغير المناخ.

يمكنك توسيع نطاق وصولك إلى ما وراء المسؤولين. يمكن أن تؤدي الكتابة إلى الأشخاص في مجال عملك أو مدرسة أطفالك، أو حتى الكتابة إلى رئيسك في العمل، إلى تغيير عميق.





9. نشر الكلمة

سواء أكنت تحب التحدث (وهو ما نفعله!) أم تكره ذلك، يمكنك نشر الكلمة. يمكن للعروض التقديمية الرسمية إيصال الرسالة المتعلقة بتغير المناخ بشكل فعال إلى عائلتك وأصدقائك وزملائك في العمل ومجتمعك.

يمكنك إما تقديم عرض تقديمي بنفسك، وإما أن تطلب من شخص ما الحضور وتقديمه لك. يمكن لحملة **آل جور** والمنظمة غير الحكومية المسماة **The Climate Project** أن توضح لك كيفية تقديم عرض الشرائح نفسه الذي قدمه **آل جور** في «حقيقة مزعجة» حتى الوقت الحالي، قاموا بتدريب 1000 متقدم في الولايات المتحدة، و250 في كندا، و400 آخرين عبر المملكة المتحدة وأستراليا. يخطط المشروع دائماً لمزيد من الدورات التدريبية؛ لذا تحقق من موقع الويب الخاص به (www.theclimateproject.org) للحصول على التحديثات. من الموقع، يمكنك طلب عرض تقديمي لمجتمعك أو مجموعتك.

يمكنك أيضاً الاتصال بأي منظمة محلية تعمل في مجال تغير المناخ لطلب عرض تقديمي. من يدري، ربما، بعد حصولك على بعض المؤشرات من المنظمة المحلية، يمكنك تقديم العرض بنفسك.

10. الحصول على (أو صنع) وظيفة لذوي الياقات الخضراء

توفر العديد من الوظائف الفرصة للمساهمة بشكل مباشر في حلول تغير المناخ. وأنت لست مقيداً بالعمل داخل منظمة غير حكومية بيئية، مع أننا نوصي بشدة بهذا الخيار! يمكنك العثور على فرص لا حصر لها، سواء أكنت رائد أعمال أم باحث عن عمل، إذا كنت تبحث عن وظيفة ذوي الياقات الخضراء.

إحداث فرق في المناخ هو شعور رائع





المراجع

Cowie, Jonathan, (2007), **Climate change: Biological and Human Aspects**, Cambridge University Press, Cambridge.

Environmental Law Institute, (2003), **Reporting on Climate Change: Understanding the Science**, 3Ed, Washington D.C.,

Ingrid, & Kurt Bucher, (2013), **Geothermal Energy**, Stober, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Jacobson, Mark Z., (2012), **Air Pollution and Global Warming**, 2ed, Cambridge University Press, Cambridge.

Julie, Kerr Casper, (2010), **Changing Ecosystems: Effects of Global Warming**, Facts On File, Inc., New York.

Julie, Kerr Casper, (2010), **Global Warming Cycles: Ice Ages and Glacial Retreat**, Facts On File, Inc., New York,

Julie, Kerr Casper, (2010), **Greenhouse Gases: Worldwide Impacts**, Facts On File, Inc., New York.

Kumar, Ashwani, & Shinjiro Ogita & Yuan-Yeu Yau Editors, (2018), **Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation**, Springer (India) Pvt. Ltd.

Maslin, Mark, (2014), **Climate Change: A Very Short Introduction**, Oxford University Press, 3ed., Oxford.

Maslin, Mark, (2004), **Global Warming: A Very Short Introduction**, Oxford University Press, Oxford,





May, Elizabeth, & Zoë Caron, (2009), **Global Warming For Dummies**, John Wiley & Sons Canada, Ltd., Mississauga.

Metz, Bert et al., (2005), **Carbon Dioxide Capture and Storage**, Cambridge University Press, New York.

National Academy of Sciences, (2010), **Adapting to the Impacts of Climate Change**, Washington DC.

United Nations Environment Programme, (2008), **Africa - Atlas of our Changing Environment** (Malestrom), Nairobi.

Wali, Mohan K., & Fatih Evrendilek, & M. Siobhan Fennessy, (2010), **The Environment: science, issues, and solutions**, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis.

Wild, Martin, (2012), **Enlightening Global Dimming and Brightening**, American Meteorological Society, Boston, January.

Woodward, John, (2008), **Eyewitness: Climate Change**, Dorling Kindersley Limited, New York.





الموسوعة العمري في علوم الأرض







أ.د. عبد الله بن محمد العمري

www.alamrigeo.com E.mail : alamri.geo@gmail.com Cell : +966505481215

المناصب الإدارية والفنية

- ❖ دكتوراه في الجيوفيزياء عام 1990 م من جامعة مينيسوتا - أمريكا.
- ❖ المشرف على مركز الدراسات الزلزالية- جامعة الملك سعود.
- ❖ المشرف على كرسي استكشاف الموارد المائية في الربع الخالي.
- ❖ المشرف على مركز الطاقة الحرارية الأرضية بجامعة الملك سعود.
- ❖ رئيس الجمعية السعودية لعلوم الأرض.
- ❖ رئيس قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود.
- ❖ مؤسس ورئيس تحرير المجلة العربية للعلوم الجيولوجية AJGS.
- ❖ رئيس فريق برنامج زمالة عالم مع جامعة أوريغون الحكومية ومعهد ماكس بلانك الألماني.

الاستشارات والعضويات

- مستشار مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية.
- مستشار هيئة المساحة الجيولوجية وهيئة المساحة العسكرية والدفاع المدني.
- مستشار مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة.
- مستشار هيئة الرقابة النووية والإشعاعية.
- باحث رئيس في عدة مشاريع بحثية مدعمة من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية وشركة أرامكو.
- باحث رئيس في مشاريع مدعمة من وزارة الطاقة الأمريكية وجامعة كاليفورنيا ومعهد ليفرمور الأمريكي LLNL.
- عضو الجمعية الأمريكية للزلازل.
- عضو الاتحاد الأمريكي للجيوفيزياء.
- عضو الاتحاد الأوروبي للجيولوجيين.
- عضو لجنة كود البناء السعودي وعضو المنتدى الخليجي للزلازل GSF.
- عضو لجنة تخفيف مخاطر الزلازل في دول شرق البحر الأبيض المتوسط RELEMR.
- باحث رئيسي ومشارك في مشاريع بحثية مع جامعات الاباما وبنسلفانيا وأوريغون الأمريكية.
- ضمن قائمة (المنجزون البارزون العرب) من قبل منظمة ريفاسيمنتو الدولية.
- ضمن قائمة Who's Who في قارة آسيا للتميز العلمي.
- ضمن قائمة Who's Who في العالم للإسهامات العلمية.

النشر العلمي والتأليف

- ❖ نشر أكثر من 200 بحثاً علمياً في مجلات محكمة.
- ❖ ألف 35 كتاباً علمياً.
- ❖ أصدر موسوعة رقمية في علوم الأرض من 14 مجلداً و 107 ملفات علمية.

المشاريع البحثية

- ❖ أنجز 40 مشروعاً بحثياً محلياً و 16 مشروعاً بحثياً دولياً و 74 تقريراً فنياً.

المؤتمرات والندوات

- ❖ شارك في أكثر من 125 مؤتمراً محلياً ودولياً و 75 ندوة وورشة عمل متخصصة.

التعاون الدولي

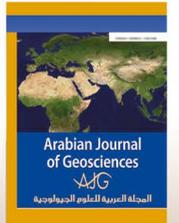
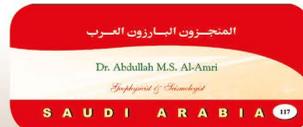
- ❖ باحث رئيسي في 13 مجموعة عمل أمريكية وألمانية.

الجوائز

- ❖ حصل على جائزة المراعي للإبداع العلمي عام 2005 م.
- ❖ حصل على جائزة التميز الذهبي من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية عام 2006 م.
- ❖ حصل على جائزة أبها التقديرية للإسهامات العلمية عام 2007 م.
- ❖ حصل على جائزة جامعة الملك سعود للتميز العلمي عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة الاتحاد الأمريكي للجيوفيزياء للتعاون الدولي والنشاط البحثي عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة جامعة السلطان قابوس للإسهامات العلمية عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة الملك سعود لإدراج المجلة العربية للعلوم الجيولوجية في قائمة ISI.
- ❖ حصل على جائزة أفضل رئيس تحرير مجلة علمية عام 2017 من الناشر الألماني SPRINGER.
- ❖ حصل على جائزة ألبرت نيلسون ماركيز للإنجاز مدى الحياة عام 2018 من منظمة Who's Who العالمية.

دروع التكريم

- ❖ حصل على 85 درعاً تكريمياً وشهادات تقدير من المملكة وعمان والكويت والإمارات والأردن ومصر وتونس والجزائر وألمانيا وأمريكا.





موسوعة أمري في علوم الأرض



Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences



المد
والجزر



المعادن
والتعدين



التركيب
الداخلي للأرض



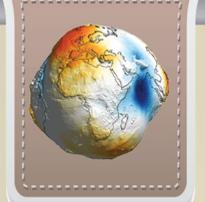
الجاذبية
الأرضية وتطبيقاتها



شكل
الأرض وحركاتها



تقدير
عمر الأرض



الأغلفة
المحيطة بالأرض



جيولوجية
القمر



البراكين
وسبل مجابقتها



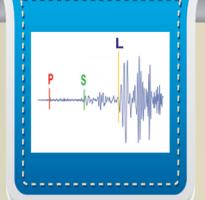
تقييم
مخاطر الزلازل



الزلازل
والتفجيرات



موجات
التسونامي



التصحّر
والجفاف



الأمطار
السيول والسدود



الانزلاقات
والانهيارات والفيضانات



التشجير
التحديات والحلول



التغيرات المناخية
والاحتباس الحراري



المشاكل
البيئية وحلولها



دليل كتابة
الرسائل والنشر العلمي



الجيولوجيا
الطبية



الجيوفيزياء
النووية



هل انتهى
عصر النفط؟



الطاقة
الحرارية الأرضية



مستقبل
الطاقة في عالمنا



300 سؤال وجواب
في الجيوفيزياء
التطبيقية



303 سؤال وجواب
في علم الزلازل
والزلزالية الهندسية



380 سؤال وجواب
في المخاطر
الجيولوجية



358 سؤال وجواب
في الثروات
الطبيعية



325 سؤال وجواب
في علم الصخور
والجيوكيمياء



321 سؤال وجواب
في تطور
الأرض



www.alamrigeo.com

