موسوعة العمري

في الأرض والفضاء

عبدالله بن محمد العمري

الطبعة الأولى
١٤٤٥هـ / ٢٠٢٤م

ح عبد الله بن محمد العمري، ١٤٤٥هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

العمري ، عبدالله بن محمد

موسوعة العمري في الأرض والفضاء. / عبدالله بن محمد العمري -

ط١..- الرياض، ١٤٤٥هـ

٩٦٤ صفحة ، ٢١ X ٢٧ سم

ردمك: ٨-٧٨٩٥-٠٤-٦٠٣-٩٧٨ رقم الإيداع ٥٤٣٣ / ١٤٤٥

حقوق الطبع محفوظة للمؤلف

الطبعة الأولى

١٤٤٥هـ / ٢٠٢٤م

العبيكان للنشر
Obeikan Publishing

للاستفسارات والملاحظات: الاتصال على المؤلف

alamri.geo@gmail.com

www.alamrigeo.com

هاتف : +966505481215

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

بسم الله الرحمن الرحيم

شكر وتقدير

الحمد والشكر لله الذي ساعدني في إنجاز هذا المجهود المتواضع المرتبط بتأليف **موسوعة الأرض والفضاء**. ربّما لا تُسعفني الكلمات في قول كلمة الحق في زملائنا الأفاضل، فأنتم خيرة الخيرة، ولولا جهودكم الحثيثة ومشاركتكم الدؤوبة ودعمكم اللامحدود ما كان لهذه الموسوعة أن تخرج بهذا الشكل، ونخص بالشكر:

د. ساير بصمجي، د. خالد الدخيل، د. فيصل القحطاني، د. مصطفى حريري، د. فوزان الفوزان، د. منصور الحميميدي د. ثامر الدعجاني، د. خالد القحطاني، د. طلال الحربي.

على مساهماتهم ومشاركتهم المميزة في الإضافة والتعديل في فصول هذه الموسوعة كل حسب اختصاصه.

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

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

موسوعة العمري في الأرض والفضاء
Alamri's Encyclopedia of Earth and Space

تمهيد

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

تغطي الموسوعات تحديدًا المجالات التالية:

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

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

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

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

المؤلف / عبدالله بن محمد العمري

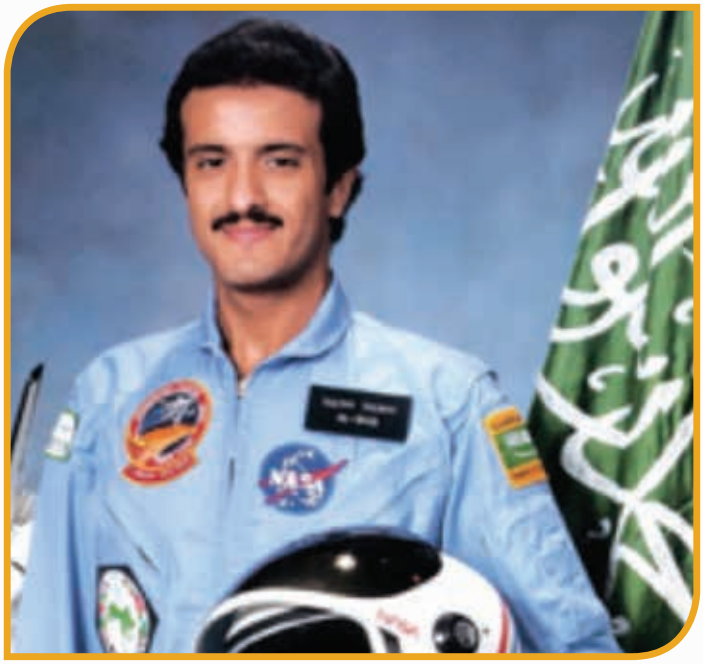
www.alamrigeo.com

تقديم

بقلم أول رائد فضاء عربي

صاحـــب الســـمو الملكـــي

الأمير سلطان بن سلمان بن عبدالعزيز آل سعود



يسعدني أن أقدم للقارئ العربي «موسوعة العمري في الأرض والفضاء» وهي إنتاج سعودي مميز وفريد من نوعه، يتناول العديد من الجوانب الأساسية والعلمية لكوكب الأرض والفضاء بإسلوب سلس وشيق، ويتسم بالعمق العلمي والتقني، ويقدم لنا تفاصيل دقيقة وشاملة عن تاريخ الأرض وتكوينها، مع تفاصيل مثيرة حول الفضاء، هذا العالم المجهول الذي اجتاحته التقنيات الحديثة والابتكارات العلمية المتواصلة، وأصبحت رحلات استكشافه تشكل هدفًا وتحديًا للإنسان في تجاوز مجاله الأرضي وسبر أسراره.

تقديـــم

تمثل هـذه الموسـوعة رحلـة سـنوات طويلـة مـن البحـث والتقصـي، بـذل فيهـا الأسـتاذ الدكتـور عبـدالله العمـري جهـودًا جبـارة لينقـل أحـداث هـذه الرحلـة العلميـة بإسـلوب يجمـع بـين الإثـارة والتعمـق العلمـي، مسـتعرضًا فيهـا إنجـازات العلمـاء والمستكشـفين الذيـن سـبقونا في هـذا الميـدان، مـع إبـراز دور وإسـهامات المملكـة العربيـة السـعودية في علـوم الأرض والفضـاء، متمثلـة في تأسـيس الهيئـة السـعودية للفضـاء عـام 2018م، والتـي شـكلت خطـوة شـجاعة نحـو مسـتقبل أكثـر إبتـكارًا وتطلعًـا لأحـدث التقنيـات والفـرص في قطـاع الفضـاء السـعودي.

لقـد استشـعرت وزارة التعليـم في الوقـت الراهـن أهميـة «علـوم الأرض والفضـاء»، وقامت بإدراج مادة «الأرض والفضاء»، كمقرر أساسـي لطلاب وطالبات التعليم العام وتأهيلهـم للتخصـص في هـذا العلـم عبـر الإلتحـاق بالجامعـات أو البعثـات الخارجيـة، منوهـاً في هـذه الموسـوعة بالـدور الريـادي الكبيـر التـي قامـت بـه الهيئـة السـعودية للفضـاء أولاً ووكالـة الفضـاء السـعودية مؤخـراً في رسـم وتنفيـذ اسـتراتيجيات نمـو هـذا القطـاع كرافـدٍ واعـدٍ يدعـم الاقتصـاد السـعودي مـن خـلال التصنيـع والابتـكار والاستكشـاف.

تمثل هـذه الموسـوعة جسـراً يربـط بـين الماضـي والحاضـر، في مجـالات العلـوم والفضـاء والبحـث العلمـي، ونحـن نتطلـع إلـى أن تكـون هـذه الموسـوعة مصـدر إلهـام للشـباب والمهتمـين في «علـوم الأرض والفضـاء»، وأن تسـاهم في تعزيـز الوعـي العلمـي حـول أهميـة استكشـاف الفضـاء، واسـتثمار مـوارده بمـا ينفـع الإنسـان.

وأخيـرًا أشـكر المؤلـف علـى هـذا العمـل المميـز، الـذي جـاء في توقيـت موائـم يلبـي فيـه احتيـاج المكتبـة العربيـة لمثـل هـذا الإثـراء النوعـي والمعرفي.

مقدمة

الأرض كوكب يسبح في الفضاء بصحبة عددٍ من الكواكب الأخرى حول نجم في مركز المجموعة الشمسية. وقد امتن الخالق عز وجل على البشرية بأن جعل موقعها مثالياً ومناسباً بشكل مدهش لاستمرار الحياة. كوكب الأرض الذي نعيش عليه هو كوكب صخري أرضي، ذو سطح صلب ونشط مع الجبال والوديان والأودية والسهول، وأكثر من ذلك بكثير. الأرض مميزة لأنها كوكب محيطي، حيث يغطي الماء 70 % من سطحها. يتكون غلافنا الجوي في الغالب من النيتروجين ويحتوي على نسبة عالية من الأكسجين. كما يحمينا الغلاف الجوي من النيازك القادمة، والتي يتفكك معظمها في غلافنا الجوي قبل أن تتمكن من الاصطدام بالسطح على شكل نيازك.

وبما أننا نعيش على كوكب الأرض، فقد نظن أننا نعرف كل ما يمكن معرفته عنها. في الواقع لا على الإطلاق! إذْ لدينا الكثير مما يمكننا تعلمه عن كوكبنا الأم. في الوقت الحالي، هناك الآلاف من الأقمار الصناعية التي تدور حول الأرض لالتقاط الصور والقياسات. هذه هي الطريقة التي يمكننا بها معرفة المزيد عن الطقس والمحيطات والتربة وتغير المناخ والعديد من المواضيع المهمة الأخرى.

كوكب الأرض هو جزء صغير من الكون الواسع الذي تطور على مدى فترة زمنية ضخمة. يمكن فك رموز تاريخ الكون والهياكل والأشياء الموجودة فيه برصد حالتها الحالية والاستعانة بعلوم الفيزياء والكيمياء. وبالمثل، يمكن وصف أنماط حركة الأجرام الموجودة في النظام الشمسي والتنبؤ بها على أساس الرصد المستمر وفهم الجاذبية. ومن ثم يمكن استخدام فهم هذه الأنماط لتفسير العديد من الظواهر الأرضية، مثل

النهار والليل، الفصول، والمد والجزر، وأطوار القمر. يمكن رصد الأجرام الأخرى في النظام الشمسي والأرض نفسها لتحديد عمر الأرض وتاريخ التغيرات واسعة النطاق على سطحها.

تتناول موسوعة الأرض والفضاء العمليات التي تحدث على الأرض وموقع الأرض في النظام الشمسي والمجرة، وكذلك عن ظواهر طبيعة تتراوح في نطاقها من الكبير الذي لا يمكن تصوره إلى الصغير بشكل غير مرئي. فهي تتناول العلوم الجيولوجية والفيزيائية كوسيلة لفهم حجم وعمر وبنية وتكوين وسلوك الأرض والشمس والقمر. وبالمقابل فإن علوم الحياة تتجذر جزئيًا في علوم الأرض، حيث تبقى الأرض هي المثال الفريد لكوكب نشط بيولوجيًا، كما أن الحفريات الموجودة في السجل الجيولوجي للصخور تهم علماء الحياة وعلماء الأرض على حد سواء.

يأخذ هذا العمل القارئ الكريم في جولة فضائية، ثم تدور به حول سطح الأرض قبل ان تسبر به في باطن الأرض الى أن تصل الى عمق 6400 كم تقريبا. ففي الفصل الأول تناولنا غزو الفضاء الخارجي ومحاولة كشف أسراره، وفي الفصل الثاني عن المجموعة الشمسية، وفي الفصل الثالث عن ماهية القمر ودوره في ظاهرتي الخسوف والكسوف، وفي الفصل الرابع عن جاذبية الأرض، وفي الفصل الخامس عن المد والجزر، وفي الفصل السادس عن البحار والمحيطات، وفي الفصل السابع عن المعادن والصخور، وفي الفصل الثامن عن كل ما يتعلق بسطح الأرض وشكلها وحركاتها، وأخيرًا في الفصل التاسع أسهبنا في الحديث عن باطن الأرض والتغيرات الجيوديناميكية المؤثرة عليها.

آمل أن يسد هذا العمل ثغرة في مكتباتنا العربية ، وأن يكون سراجا تستضيء به الأجيال القادمة في مختلف تخصصاتهم العلمية.

والله الموفق

المحتويـــــات

• شـــكر وتقديـــــر	v
• تمهيـــــد	vii
• تقديـــم	ix
• مقدمـــة	xi
الفصل الأول الفضـــــــاء الخارجـــــي	1
مقدمـــة	3
• تشـــكل الفضـــــاء	5
• بيئـــة الفضـــاء الخارجـــي	8
• مناطـــق الفضـــاء الخارجـــي	11
• المناطـق القريبـة من الأرض	11
• الفضـاء الجغـرافـي	11
• الفضـاء العابـر للقمـر	13
• الفضـاء السـحيق	15
• الفضـــاء بين الكواكـب	15
• الفضـــاء بين النجـوم	16
• الفضـــاء بـين المجـرات	17
• اســتكشـــاف الفضـــــاء	18
• تاريـــخ الاستكشـــافات الفضائيـــة	23
• الوجـــود البشـــري في الفضـــاء	26
• دور الولايات المتحدة في ارتياد الفضاء	32
• السياسة الفضائية الأمريكية	37

الفهـــرس

الموضـــــــوع	الصفحة
• أثـر الفضـاء على جسـم الإنسـان	41
• الجاذبيـة	44
• الحـرارة	45
• الإشـعاع	45
• انعـدام الـوزن	46
• دوار الحركـة	48
• تدهـور العظـام والعضـلات	49
• إعـادة توزيـع السـوائل	53
• اضطـراب الحـواس	54
• قانـــون الفضـــاء	61
• اتفاقيـة محطـة الفضـاء الدوليـة لعـام 1998	63
• المبـادئ والإعلانـات الدوليـة	64
• الإجمـاع	69
• القانـون الوطنـي	70
• تعريف «الفضـاء»	71
• أخلاقيـات الفضـاء	72
• اسـتغلال الفضـاء	74
• آلات الرحلات الفضائية واستعمار الفضاء	75
• نظـام الاتصـال	76
• حـل النزاعـات	76

الفهـــرس

الموضـــــــوع	الصفحة
• الفريق العامل المفتوح العضوية المعني بالتهديدات الفضائية	77
• فوائـــد استكشـــاف الفضـــاء	78
• مســـتقبل استكشـــاف الفضـــاء	114
• تاريخ الفضاء في المملكة العربية السعودية	115
• الهيئة السعودية للفضاء	116
• وكالة الفضاء السعودية	119
• تجارب المملكة العربية السعودية في ارتياد الفضاء	120
• رائد الفضاء سلطان بن سلمان بن عبد العزيز	120
التجارب التي قام بها الأمير سلطان في الفضاء	123
إنجازات الرحلة الفضائية التي قام بها الأمير سلطان في الفضاء	125
• رائد الفضاء عبد المحسن البسام	125
• رائد الفضاء علي القرنـــي	129
• رائدة الفضاء ريانـة بـــرناوي	130
التجارب التي قام بها علي القرني وريانة برناوي في الفضاء	132

الفصل الثاني المجموعـــــة الشمســـية	135
مقدمـــة	137
• نشـــأة المجموعـــة الشمسيـــة	139
• استقرار على المدى الطويل	147
• أنظمة حلقات القمر	148
• هيكلية المجموعة الشمسية	138
• المدارات	150
• التركيب	152
• المسافات والمقاييس	154
• الوسط بين الكواكب	155
• صلاحية الحياة	157
• بنية المجموعة الشمسية	158
• المجموعة الشمسية الداخلية	163
• كوكب عطارد	164
• كوكب الزهرة	175
• كوكب الأرض	186
• كوكب المريخ	187
• حزام الكويكبات	204
• المجموعة الشمسية الخارجية	212
• كوكب المشتري	213
• كوكب زحل	219
• أورانوس	223
• كوكب نبتون	228
• حزام كويبر	233
• المذنبات	237
• حافة الغلاف الشمسي	243

الفصل الثالـث ماهيـــــة القمـــر	245
مقدمـــة	247
• نشـــأة القمـــر	250
• الدليـــل على نظريـــة الصـــدم العمـــلاق	252
• كيف عرف العلماء أن حجم القمر كان بحجم المريخ؟	253
• عُمـر القمـر	257
• القمـــــر عند العـــرب	259
• منـــازل القمـــر	260
• حركـــة القمـــر في الفضـــاء	266
• أطـــوار القمـــر	269
• ميســـان القمـــر	275
• إشـــراق الأرض	277
• قمـــر النهـــار	278
• القمـــر العمـــلاق	279
• القمـــر الأزرق	280
• قمـــر الحصـــاد أو قمـــر الصيـــاد	281
• الخســـوف والكســـوف	282
• خســـوف القمـــر	287
• التربـــة القمريـــة	291
• بنيـــة التربـــة القمـــرية	295
• نوافـــير غبـــار القمـــر	296
• درجـــة حـــرارة القمـــر	301
• التـــدرج الحـــراري على الطبقـــات الخارجيـــة للقمر	306
• معالـــم ســـطح القمـــر	308

الفهـــرس

الموضـــــوع	الصفحة
• تسمية المعالـــم القمريـــة	309
• الجبـــال القمريـــة	312
• الوديـــان القمريـــة	314
• المرتفعـــات القمريـــة	315
• طبقـــــات القمـــر	319
• الصخـــور القمريـــة	322
• البنيـــة الداخليـــة للقمـــر	330
• القشـــــرة	332
• الوشـــاح	334
• النـــواة	334
• المجـــال المغناطيســـي والغـلاف الجـوي للقمر	336
• المجـــال المغناطيســـي للقمـــر	336
• الغـــــلاف الجـــوي للقمـــــر	341
• جاذبيـــــة القمـــــر	343
• الـــــزلازل القمـــريـــة	350
• البراكـــــين القمـــريـــة	359
• ســـهول الحمـم البركانيـــة	362
• القبـــاب القمريـــة	364
• أنـــابيب الحمـــم البركانيـــة	366
• رواســـب البيروكلاســـتيك	367
• الأخاديـــد القمريـــة	368
• أحـــواض الصـــدم	369
• النشـــاط البركانـــي الأخـــير	373
• المـــــاء علـــــى القمـــــر	374
• العـــــودة لاستكشـــــاف القمـــر	379

الفصل الرابـــع جاذبيـــة الأرض	383
مقدمـــة	385
• الجاذبية الأرضية والقوى المؤثرة عليها	388
• قياس الجاذبية (التثاقلية) الأرضية	392
• الجاذبية المطلقة	392
• الجاذبية النسبية	392
• مقياس الجاذبية (الجرافيميتر)	393
• الإجراءات الحقلية في الجاذبية	395
• تأثير المد والجزر	395
• تأثير انجراف الجهاز	396
• المسافة بين المحطات	397
• إنشاء محطة القاعدة	397
• تحديد الارتفاعات	399
• تصحيح بيانات الجاذبية	400
• تصحيح خط العرض	401
• تصحيح الارتفاع (الهواء الحر)	403
• تصحيح بوجير	405
• تصحيح التضاريس	406
• تصحيح إيتفوش	407

الفهـــرس

الموضـــــــوع	الصفحة
• التفسير الوصفي والكمي لمعطيات الجاذبية	409
• شاذة الهواء الحر	410
• شاذة بوجير	410
• الضغط المتوازن (إيزوستاسي)	412
• نظرية إيري - هسكانين (1855)	413
• نظرية برات (1855)	415
• حساب عمق التعويض	418
• مفهوم الجاذبية من المنظورين الإسلامي والأوروبي	421
• العلمـــاء العرب والمســـلمون	421
• الأوربيـــون	450

الفصل الخامـس المـــد والجـــزر	481
مقدمـــة	483
• المـــد والجـــزر والقمـــر	485
• خصائـــص المـــد والجـــزر	490
• العوامـــل الفلكيـــة	491
• أســـباب ظاهـــرة المـــد والجـــزر	493
• قوة جاذبية القمر والشمس	493
• قوة الطرد المركزية	494
• دور القمـــر	495
• دور الشمـــس	497
• ميكانيكيـــة المـــد والجـــزر	498
• أنـــواع المـــد والجـــزر	502
• العوامل التي تتحكم في تعديل حركة المياه في حالات المد الحقيقي	511
• القوى المؤثـرة على المد والجـزر	514
• المفهـوم الرياضـي للمـد والـجـزر	517
• الاختلافات الرئيسية بين المد والجزر والأمواج	520
• طاقـــة المـــد و الجـــزر	521
• توربينـات المد والجـزر	521
• قناطـر المـد والجـزر	522
• بحيـرات المـد والجـزر	522
• مزايـــا طاقـــة المـــد والجـــزر	525
• عيـــوب طاقـــة المـــد والجـــزر	527
• الفـــرق بين طاقـــة الرياح وقـــوة المـــد والجـــزر	529
• توقـــع المـــد والجـــزر	530
• محاكـــاة المـــد والجـــزر	532

الفصل السـادس البحـــار والمحيطـــات	535
مقدمـــة	537
• أولًا: البحـــــار	538
• الخصائـص الطبيعيـة للبحـار	540
• ميـاه البحـار	542
• دورة الميـــاه	544
• مستوى سـطح البحـر	546
• أمـواج البحـر	547
• السـواحل	549
• الموائـل البحريـة	552
• ثانيـًا: المحيطـــات	554
• تشـكّل المحيـط	557
• التـوزع الجغرافي للمحيطـات	558
• أحـواض المحيطـات	560
• لـون المحيـط	561
• تيـارات المحيـط	563
• المناطـق المحيطيـة	566
• عمـــر المحيطـات	573

الفصل السابع المعـــادن و الصخـــور	577
مقدمـــة	579
المعـــادن	581
• نظريـــات نشـــأة المعـــادن	581
• اليونـانيـــون	582
• الصينيـــون	583
• العلمـــاء العـــرب والمســـلمون	583
• تأثير علم المعـــادن العربي على أوروبـا	587
• مفهـــوم المعـــادن حديثـاً	589
• المعـــادن	589
• المعادن الفلزية	589
• المعادن غير الفلزية أو اللافلزية	590
• تصنيـف المعـــادن	592
• خصائـص المعـــادن	599
• الخـــامـــات	600
• تصنـيف الخـامات المعدنيـــة	604
• خامات معدنيّة مُعاصرة	604
• خامات معدنيّة لاحقة	604
• الأحجـــار الكريمـــة	607
• تشـــكل الأحجـــار الكريمـــة	609
• أشهر الأحجار الكريمة	610
• الألماس	610
• الياقوت	611

الفهـــرس

الموضـــــــوع	الصفحة
• الزمـــرد	612
• اللـــؤلـــؤ	613
• المرجـــان	614
• أهميـــة الأحجـــار الكريمـــة	616
• أنـــواع الأحجـــار الكريمـــة	617
• الأهمية الاقتصادية للخامات	620
• خامات السبائك الحديدية	622
• أولاً: الخامات المعدنية الفلزية	622
• ثانياً: الخامات اللافلزية	623
الصخـــور	624
• أنـــواع الصخـــور	624
• سلسلة باون التفاعلية	625
• دورة الصخور	628
• الصخـور الناريـة	631
• الصخـور الرسوبيـة	648
• الصخـور المتحـولـة	658
• النيـــازك	666
• قيـاس عُمْـر الصخـور	668
• طريقـة العمـر الحقيقي	669

الفهـــرس

الموضـــــــوع	الصفحة
• الســـاعات النـــووية	670
• طريقـة العمـر النسبي	671
• ســـــلم الزمـــن الجيولوجـــي	672
• الأحافيـر المرشـدة	679
• بصمـات المغناطيسية الأرضيـة القديمة	682
• عـــدم التوافـــق	683
• العمـــود الجيولوجـي	686
• وحـدات الزمن الجيولـوجي	688
• ســاعة الأرض الرمليـــة	691
• مشكـلات تحديـد الأعمار في مقياس الزمن الجيولوجي	694
• طـرق أخـرى لتحديـد العمـر الجيولوجـي	695
• تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية	697
• التلألؤ الحـراري	698
• أوجه الشـبه والاختـلاف بين العمـر النسـبي والعمـر المشـع المطلـق	700

الفصل الثامـــن ســـطح الأرض	703
مقدمـــة	705
• شـــكل الأرض	708
• دوران الأرض	710
• الأرض المسطحة أم الكرويـــة؟	714
• الجيوئيـــد	728
• شـــاذة الجيوئيـــد	733
• محيـــط الأرض وقطـــرها	736
• مفهوم شكل الأرض عند العلماء العرب والمسلمون	752
• مفهـــوم شكل الأرض عنـــد الأوروبيـــين	769

الفصل التاسع باطـــن الأرض	777
مقدمـــة	779
• عُمـــــر الأرض	781
• كلفـن وعُمـــر الأرض	787
• الخصائـص الكيميائيـة لـلأرض	793
• الخصائـص الفيزيائيـة للأرض	795
• ما رأيـك أن نـــزن الأرض؟	798
• الزحـــف القـــاريّ والصفائـــح التكتونيـــة	800
• الأدلة العلمية على صحة نظرية الصفائح التكتونية	805
• البحـــث عن القـــارات المفقـــودة	809
• قـــارات المســـتقبل الفائقـــة	811
• القشرة الأرضية	813
• القشـــــرة القـــارية	813
• القشـــرة المحيطيـــة	818
• الانقطاعـــات داخـــل الأرض	823
• انقطـــاع كونـــراد	825
• انقطـــاع موهـــو	825
• انقطاعي المنطقة الانتقالية في الوشاح (عند 410 كم و 660 كم)	826
• انقطـــاع ريبيتـــي	828
• انقطـــاع غـوتنبـــرغ	830
• انقطـــاع ليمـــان	831
• الـــوشـــــاح	832
• الوشـــاح العلـــوي	832
• الغـــلاف المـوري (الغـلاف الوهـــن)	832
• الغلاف الصخري (الليثوسفير)	834
• منطقة السرعة المنخفضة (LVZ)	838

الفهـــرس

الموضـــــوع	الصفحة
• المنطقـــة الانتقاليـــة	839
• الوشـــاح السفـــلي	841
• المنطقـــــة (D″)	842
• طرائـــق استكشـــاف الوشـــاح	845
• تصـــوير باطـــن الأرض	846
• العلاقـــة بين ســـرعة الموجـــات والعمـــق	851
• الصخـــور الدخيلة (الزينوليثات)	858
• رســـائل من الأعمـــاق	860
• الحمـــل الحـــراري في الوشـــاح	860
• أعمـــدة الوشـــاح	864
• البقـــع الساخنـــة	865
• نـــواة الأرض	867
• الموجـــات الزلـــزالية	868
• فـــي المعمـــل	870
• النمذجـــة الحاســـوبيـــة	871
• النـــواة الخارجيـــة للارض	873
• المجـــال المغناطيســـي الأرضـــي	876
• نظريـــة الجيوديناـــمـــو	878
• النـــواة الداخليـــة للارض	882
• الكارثـــة الحديديـــة	884
• درجة حرارة نواة الأرض	892
• التصوير المقطعي الزلزالي	895
• التذبذب الحر للأرض	903
• المراجـــع	913
أولًا: المراجـــع العربيـــة	913
ثانيًا: المراجـــع الأجنبيـــة	930

الفصل الأول

الفضاء الخارجي

مُقَدِّمَة

الفضـاء الخارجـي Outer Space والـذي يشـار إليـه عـادة باسـم الفضـاء Space فقـط- هـو الامتـداد الموجـود خـارج الأرض وغلافهـا الجـوي وبـين الأجـرام السـماوية. الفضـاء الخارجـي ليـس فارغًـا تمامًـا كمـا يظـن الكثيـر مـن النـاس؛ إنـه فـراغ شـــبه مثالـي يحـوي علـى كثافـة منخفضـة مـن الجسـيمات، في الغالـب بلازمـا مـن الهيدروجـــين والهيليـــوم بالإضافـة إلـى الإشـعاع الكهرومغناطيسـي والمجـالات المغناطيســية والنيوتريـنـــوات والغبـــار والأشـعة الكونيـــة. درجـة الحـرارة الأساسـية للفضـاء الخارجـي، كمـا حددهـا إشـعاع الخلفيـة مـن الانفجـار الكبيـر، هـي (- 270 درجـة مئويـة).

يُعتقـد أن البلازمـا بـين المجـرات تمثـل نحـو نصـف المـادة الباريونيـة (العاديـة) في الكـون، ولهـا كثافـة عدديـة أقـل مـن ذرة هيدروجـين: واحـدة لـكل متـر مكعـب، ودرجـة حـرارة حركيـة تبلـغ ملايـين الكلفنـات.

تكثفـت التركيـزات المحليـة للمـادة في النجـوم والمجـرات. يشـغل الفضـاء بـين المجـرات معظـم حجـم الكـون، ولكـن حتـى المجـرات والأنظمـة النجميـة تتكـون بالكامـل تقريبًـا مـن مسـاحة فارغـة. تتكـون معظـم طاقـة الكتلـة المتبقيـة في الكـون المرئـي مـن شـكل غيـر معـروف، يطلـق عليـه اسـم المـادة المظلمـة والطاقـة المظلمـة.

لا يبـدأ الفضـاء الخارجـي علـى ارتفـاع محـدد فـوق سـطح الأرض. يُسـتخدم خـط كارمـان Kármán line، الـذي يبلـغ ارتفاعـه 100 كيلومتـر فـوق مسـتوى سـطح البحـر، بشـكل تقليـدي كبدايـة للفضـاء الخارجـي في معاهـدات الفضـاء ولحفـظ سـجلات الفضـاء الجـوي.

الفضاء الخارجي

بدأ البشر الاستكشاف المادي للفضاء خلال القرن العشرين مع ظهور رحلات المنطاد على ارتفاعات عالية. وأعقب ذلك رحلات صاروخية مأهولة، ثم الدوران حول الأرض بطاقم، وهو ما حققه يوري غاغارين من الاتحاد السوفييتي لأول مرة في عام 1961. والتكلفة الاقتصادية لوضع الأجرام، بما في ذلك البشر، في الفضاء مرتفعة جدًا، مما يحد من رحلات الفضاء البشرية إلى المدار الأرضي المنخفض والقمر.

ومن ناحية أخرى، وصلت المركبات الفضائية غير المأهولة إلى جميع الكواكب المعروفة في المجموعة الشمسية. يمثل الفضاء الخارجي بيئة مليئة بالتحديات للاستكشاف البشري بسبب مخاطر الفراغ والإشعاع. الجاذبية الصغرى لها تأثير سلبي على فسيولوجيا الإنسان مما يسبب ضمور العضلات وفقدان العظام.

يدرس الفضاء اليوم في فرع متخصص اسمه علم الفضاء Space Science، وهو المجال الأجرام المادية ويشمل جميع التخصصات العلمية التي تنطوي على استكشاف الفضاء ودراسة الظواهر الطبيعية والأجرام المادية التي تحدث في الفضاء الخارجي، مثل طب الفضاء وعلم الأحياء الفلكي.

• تشـكل الفضـــاء

حجـم الكـون كلـه غيـر معـروف، وقـد يكـون لانهائيًـا في مـداه. وفقًـا لنظريـة الانفجـار الكبيـر، كان الكون المبكر جدًا عبارة عن حالة شديدة الحرارة والكثافة قبل نحو 13.8 بليون سنة، ثم توسع بسرعة. وبعد نحو 380 ألف سنة، برد الكون بدرجة كافية للسماح للبروتونات والإلكترونات بالاندماج وتكوين الهيدروجين، وهو ما يسمى بحقبة إعادة البناء Recombination Epoch.

وعندما حدث ذلك، انفصلت المادة والطاقة، مما سمح للفوتونات بالسفر بحرية عبر الفضاء المتوسع باستمرار. المادة التي بقيت بعد التوسع الأولي تعرضت منذ ذلك الحين لانهيار الجاذبية لتكوين النجوم والمجرات والأجرام الفلكية الأخرى، تاركة وراءها فراغًا عميقًا يشكل ما يسمى حاليًا بالفضاء الخارجي. وبما أن الضوء له سرعة محدودة، فإن هذه النظرية تقيد حجم الكون الذي يمكن رصده مباشرة.

أمكن تحديد الشكل الحالي للكون من خلال قياسات الخلفية الكونية الميكروية باستخدام الأقمار الصناعية مثل: مسبار ويلكنسون لتباين الموجات الميكروية. تشير هذه الأرصاد إلى أن الهندسة المكانية للكون المرصود «مسطحة»، مما يعني أن الفوتونات الموجودة على مسارات متوازية عند نقطة واحدة تبقى متوازية أثناء انتقالها عبر الفضاء إلى حدود الكون المرصود، باستثناء الجاذبية المحلية. يشير الكون المسطح، بالإضافة إلى كثافة الكتلة المقاسة للكون والتوسع المتسارع للكون، إلى أن الفضاء لديه طاقة فراغية غير صفرية، والتي تسمى الطاقة المظلمة.

جزء من صورة حقل هابل فائق العمق يُظهر قسمًا نموذجيًا من الفضاء يحوي على مجرات يتخللها فراغ عميق. ونظرًا لسرعة الضوء المحدودة، فإن هذا الرأي يغطي الـ 13 بليون سنة الماضية من تاريخ الفضاء الخارجي.

تشير التقديرات إلى أن متوسط كثافة الطاقة في الكون الحالي يعادل 5.9 بروتونًا لكل متر مكعب، بما في ذلك الطاقة المظلمة والمادة المظلمة والمادة الباريونية (مادة عادية تتكون من ذرات). تمثل الذرات 4.6 % فقط من إجمالي كثافة الطاقة، أو كثافة بروتون واحد لكل أربعة أمتار مكعبة.

من الواضح أن كثافة الكون ليست موحدة؛ فهي تتراوح بين الكثافة العالية نسبيًا في المجرات - بما في ذلك الكثافة العالية جدًا في الهياكل داخل المجرات، مثل الكواكب والنجوم والثقوب السوداء - إلى الظروف في الفراغات الشاسعة ذات الكثافة الأقل بكثير، على الأقل من حيث المادة المرئية.

على عكس المادة والمادة المظلمة، يبدو أن الطاقة المظلمة لا تتركز في المجرات: على الرغم من أن الطاقة المظلمة قد تمثل غالبية كتلة الطاقة في الكون، إلا أن تأثير الطاقة المظلمة أصغر بمقدار 5 مرات من تأثير الجاذبية من المادة والمادة المظلمة.

• بيئـــة الفضـــاء الخارجـــي

الفضـاء الخارجـي هـو أقـرب تقريـب معـروف للفـراغ المثالـي. حيـث إنـه ليـس لديـه أي احتـكاك فعلـي، ممـا يسـمح للنجـوم والكواكـب والأقمـار بالتحـرك بحريـة علـى طـول مداراتهـا المثاليـة، بعـد مرحلـة التكويـن الأوليـة. والفـراغ العميـق للفضـاء بـين المجـرات لا يخلـو مـن المـادة، إذ يحـوي علـى عـدد قليـل مـن ذرات الهيدروجـين في المتـر المكعـب.

سحابة الغبار بين الكواكب مضاءة ومرئية كضوء فلكي، مع أجزائها الفجر الكاذب وجيجنشاين وبقية شريطها، الذي تعبره مجرة درب التبانة بصريًا.

وبالمقارنـة، فـإن الهـواء الـذي يتنفسـه الإنسـان يحـوي علـى نحـو 10^{25} جـزيء في المتـر المكعـب. تعنـي الكثافـة المنخفضـة للمـادة في الفضـاء الخارجـي أن الإشـعاع الكهرومغناطيسـي يمكـن أن ينتقـل لمسـافات كبيـرة دون أن يتشـتت: يبلـغ متوسـط المسـار الحـر للفوتـون في الفضـاء بـين المجـرات نحـو 10^{23} كـم، أو 10 بليونـات سـنة ضوئيـة. ومـع ذلـك، فـإن الانتشـار، وهـو امتصـاص وتشـتت الفوتونـات بواسـطة الغبـار والغـاز، يعـد عامـلًا مهمًـا في علـم الفلـك المجـري (الخـاص بمجـرة درب التبانـة) ومـا بـين المجـرات.

تحتفـظ النجـوم والكواكـب والأقمـار بغلافهـا الجـوي عـن طريـق الجاذبيـة. ليـس للغـلاف الجـوي حـدود عليـا محـددة بوضـوح: تتناقـص كثافـة غـاز الغـلاف الجـوي

تدريجيًا مع المسافة من الجرم حتى يصبح من الصعب تمييزه عن الفضاء الخارجي.

وينخفض الضغط الجوي للأرض إلى نحو 0.032 باسكال عند ارتفاع 100 كيلومتر، مقارنة بـ 100000 باسكال وفقًا لتعريف الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية (IUPAC) للضغط القياسي. فوق هذا الارتفاع، يصبح ضغط الغاز الخاص غير مهم بسرعة بالمقارنة مع الضغط الإشعاعي الصادر عن الشمس والضغط الديناميكي للرياح الشمسية. يتميز الغلاف الحراري في هذا النطاق بتدرجات كبيرة في الضغط ودرجة الحرارة والتركيب، ويختلف بشكل كبير بسبب الطقس الفضائي.

وتقاس درجة حرارة الفضاء الخارجي من حيث النشاط الحركي للغاز كما هو الحال على الأرض. تختلف درجة حرارة إشعاع الفضاء الخارجي عن درجة حرارة حركية الغاز، مما يعني أن الغاز والإشعاع ليسا في حالة توازن ديناميكي حراري.

يمتلئ الكون المرئي بكامله بالفوتونات التي جرى إنشاؤها أثناء الانفجار الكبير، والذي يُعرف باسم إشعاع الخلفية الكونية الميكروي (CMB). ومن المحتمل جدًا أن يكون هناك عدد كبير مماثل من النيوترينوات تسمى خلفية النيوترينو الكونية.

تبلغ درجة حرارة الجسم الأسود الحالية لإشعاع الخلفية نحو (270- درجة مئوية). يمكن أن تختلف درجات حرارة الغاز في الفضاء الخارجي بشكل كبير. على سبيل المثال، تبلغ درجة الحرارة في سديم بوميرانغ 1 كلفن، في حين تصل درجات حرارة الهالة الشمسية إلى أكثر من 1.2 – 2.6 مليون كلفن.

أمكن اكتشاف مجالات مغناطيسية في الفضاء المحيط بكل فئة من الأجرام السماوية تقريبًا. يمكن أن يؤدي تكوين النجوم في المجرات الحلزونية إلى توليد دينامو صغير الحجم، مما يخلق مجالًا مغناطيسيًا مضطربًا. يتسبب تأثير ديفيس–جرينشتاين Davis–Greenstein effect في محاذاة حبيبات الغبار الطويلة مع المجال المغناطيسي للمجرة، مما يؤدي إلى ضعف الاستقطاب البصري. وقد جرى استخدام هذه الظاهرة لإظهار وجود مجالات مغناطيسية مرتبة في العديد من المجرات القريبة.

تنتج العمليات الهيدروديناميكية المغناطيسية في المجرات الإهليلجية النشطة نفثاتها وفصوصها الراديوية المميزة. فقد جرى اكتشاف مصادر راديوية غير حرارية حتى بين المصادر البعيدة ذات التردد العالي، مما يشير إلى وجود مجالات مغناطيسية.

خارج الغلاف الجوي الوقائي والمجال المغناطيسي، هناك القليل من العوائق التي تحول دون مرور الجسيمات دون الذرية النشطة عبر الفضاء والمعروفة باسم الأشعة الكونية. تمتلك هذه الجسيمات طاقات تتراوح من نحو 10^6 فولت إلى 10^{20} فولت من الأشعة الكونية فائقة الطاقة.

تحدث ذروة تدفق الأشعة الكونية عند طاقات تبلغ نحو 10^9 إلكترون فولت، مع ما يقرب من 87 % بروتونات، و12 % نواة هيليوم، و1 % نوى أثقل. في نطاق الطاقة العالية، يبلغ تدفق الإلكترونات نحو 1 % فقط من تدفق البروتونات. يمكن للأشعة الكونية أن تلحق الضرر بالمكونات الإلكترونية وتشكل تهديدًا صحيًا للمسافرين عبر الفضاء. وفقًا لرواد الفضاء، مثل دون بيتيت، فإن الفضاء له رائحة معدنية محترقة تلتصق ببدلاتهم ومعداتهم، تشبه رائحة شعلة اللحام القوسي.

• مناطــق الفضــاء الخارجــي

الفضـاء هـو فـراغ جزئـي يتـم تحديـد مناطقـه المختلفـة مـن خـلال المجـالات المغناطيسـية المختلفـة و«الريـاح» التـي تهيمـن عليهـا، وتمتـد إلـى النقطـة التـي تفسح فيها تلك المجالات المغناطيسية المجال لتلك التي تتجاوزها. يمتد الفضاء الجغرافي من الغلاف الجوي للأرض إلى الأطراف الخارجية للمجال المغناطيسي الخاص بها، وعندها يفسح المجال للرياح الشمسية في الفضاء بين الكواكب.

يمتد الفضاء بين الكواكب إلى الغلاف الشمسي، حيث تفسح الرياح الشمسية المجال للمجالات المغناطيسية للوسط البينجمي. ثم يستمر الفضاء بين النجوم حتى الأطراف الخارجية للمجرة، حيث يتلاشى في الفراغ بين المجرات.

أ. المناطــق القريبــة من الأرض

الفضاء القريب من الأرض هو منطقة من الفضاء الخارجي تقع فوق خط كارمان، بدءًا من المدارات الأرضية المنخفضة وحتى المدارات الثابتة بالنسبة للأرض. تضم هذه المنطقة المدارات الرئيسة للأقمار الصناعية وهي موقع معظم النشاط الفضائي للبشرية. وشهدت المنطقة مستويات عالية من التلوث الفضائي، خاصة على شكل حطام فضائي، مما يهدد أي نشاط فضائي في هذه المنطقة.

ب. الفضـــاء الجغـرافـي

هي منطقة من الفضاء الخارجي بالقرب من الأرض تشمل الغلاف الجوي العلوي والغلاف المغناطيسي. تقع أحزمة فان ألن الإشعاعية داخل الفضاء الجغرافي. الحد الخارجي للفضاء الأرضي هو الفاصل المغناطيسي، والذي

يشكل واجهة بين الغلاف المغناطيسي للأرض والرياح الشمسية. أما الحد الداخلي فهو الأيونوسفير.

تتأثر الظروف الجوية الفضائية المتغيرة للفضاء الأرضي بسلوك الشمس والرياح الشمسية؛ يرتبط موضوع الفضاء الأرضي بالفيزياء الشمسية، أي دراسة الشمس وتأثيرها على كواكب المجموعة الشمسية.

يضغط الفاصل المغناطيسي على الجانب النهاري بواسطة ضغط الرياح الشمسية، حيث تبلغ المسافة تحت الشمسية من مركز الأرض عادةً 10 أضعاف نصف قطر أرضي. على الجانب الليلي، تمد الرياح الشمسية الغلاف المغناطيسي لتشكل ذيلًا مغناطيسيًا يمتد أحيانًا إلى أكثر من 100–200 ضعف نصف قطر الأرض. لمدة أربعة أيام تقريبًا من كل شهر، يكون سطح القمر محميًا من الرياح الشمسية أثناء مرور القمر عبر الذيل المغناطيسي.

يمتلئ الفضاء الأرضي بجسيمات مشحونة كهربائيًا ذات كثافات منخفضة جدًا، ويتم التحكم في حركاتها بواسطة المجال المغناطيسي للأرض. تشكل هذه البلازما وسطًا يمكن من خلاله أن تؤدي الاضطرابات الشبيهة بالعواصف التي تدعمها الرياح الشمسية إلى دفع التيارات الكهربائية إلى الغلاف الجوي العلوي للأرض. يمكن للعواصف الجيومغناطيسية أن تزعج منطقتين من الفضاء الأرضي: الأحزمة الإشعاعية والغلاف الأيوني.

تزيد هذه العواصف من تدفقات الإلكترونات النشطة التي يمكن أن تلحق ضررًا دائمًا بإلكترونيات الأقمار الصناعية، وتتداخل مع الاتصالات اللاسلكية على الموجات القصيرة وموقع نظام تحديد المواقع العالمي (GPS) وتوقيته. يمكن أن تشكل العواصف المغناطيسية أيضًا خطرًا على رواد الفضاء، حتى في المدار

الأرضي المنخفض. وهي تشكل الشفق القطبي الذي يُرى عند خطوط العرض العالية في شكل بيضاوي يحيط بالقطبين المغنطيسيين الأرضيين.

مع أنها تلبي تعريف الفضاء الخارجي، إلا أن كثافة الغلاف الجوي ضمن مئات الكيلومترات القليلة الأولى فوق خط كارمان لا تزال كافية لإحداث سحب كبير على الأقمار الصناعية. تحوي هذه المنطقة على مواد متبقية من عمليات الإطلاق السابقة المأهولة وغير المأهولة والتي تشكل خطرًا محتملًا على المركبات الفضائية. ويعود بعض هذا الحطام إلى الغلاف الجوي للأرض بشكل دوري.

ج. الفضـــاء العابـــر للقمـــر

هو منطقة مدارات النقل القمري، بين القمر والأرض. الفضاء القمري هو منطقة خارج الأرض تتضمن مدار القمر والفضاء المداري للقمر حول الأرض ونقاط لاغرانج. xGeo space هو مفهوم تستخدمه الولايات المتحدة للإشارة إلى مساحة المدارات الأرضية العالية، والتي تتراوح بين ما وراء المدار المتزامن مع الأرض (GEO) عند نحو 35786 كم، إلى نقطة لاغرانج L2 بين الأرض والقمر عند 448900 كم. يقع هذا خارج مدار القمر وبالتالي يشمل الفضاء القمري.

الأرض والقمر كما نشاهدهما من الفضاء القمري (في الأمام المركبة الفضائية أرتميس- 1).

المنطقة التي تبقى فيها جاذبية الأرض مهيمنة ضد اضطرابات الجاذبية القادمة من الشمس هي كرة هيل للكوكب. ويشمل ذلك كل الفضاء من الأرض إلى مسافة تقارب 1 % من متوسط المسافة من الأرض إلى الشمس، أو 1.5 مليون كيلومتر.

يمتد ما وراء مجال هيل الأرضي على طول المسار المداري للأرض والفضاء المداري المشترك. يسكن هذا الفضاء مجموعات من الأجرام القريبة من الأرض (NEOs)، مثل أغرام حدوة الحصان وأحصنة طروادة الأرضية، مع تحول بعض الأجرام القريبة من الأرض في بعض الأحيان إلى أقمار صناعية مؤقتة وأشباه أقمار للأرض.

د. الفضـــاء الســـحيق

يتم تعريف الفضاء السحيق من قبل حكومة الولايات المتحدة على أنه منطقة من الفضاء خارج مدار الأرض المنخفض، بما في ذلك الفضاء القمري. ويختلف البعض الآخر في نقطة البداية مما وراء الفضاء القمري إلى ما وراء المجموعة الشمسية. ويحدد الاتحاد الدولي للاتصالات المسؤول عن الاتصالات الراديوية، بما في ذلك مع الأقمار الصناعية، بداية الفضاء السحيق بـ 2 مليون كيلومتر، أي نحو خمسة أضعاف المسافة المدارية للقمر.

هـ. الفضـــاء بين الكواكـــب

يتم تعريف الفضاء بين الكواكب بواسطة الرياح الشمسية، وهي تيار مستمر من الجسيمات المشحونة المنبعثة من الشمس والتي تخلق غلافًا جويًا ضعيفًا جدًا (الغلاف الشمسي) لبليونات الكيلومترات في الفضاء. تبلغ كثافة جسيمات هذه الرياح 5–10 بروتونات/سم3 وتتحرك بسرعة 350–400 كم/ث.

يمتد الفضاء بين الكواكب إلى حافة الغلاف الشمسي حيث يبدأ تأثير البيئة المجرية في السيطرة على المجال المغناطيسي وتدفق الجسيمات من الشمس. تختلف مسافة حافة الغلاف الشمسي وقوتها تبعًا لمستوى نشاط الرياح الشمسية. يقوم الغلاف الشمسي بدوره بإبعاد الأشعة الكونية المجرية منخفضة الطاقة، ويبلغ تأثير هذا التعديل هذا ذروته خلال الحد الأقصى للطاقة الشمسية.

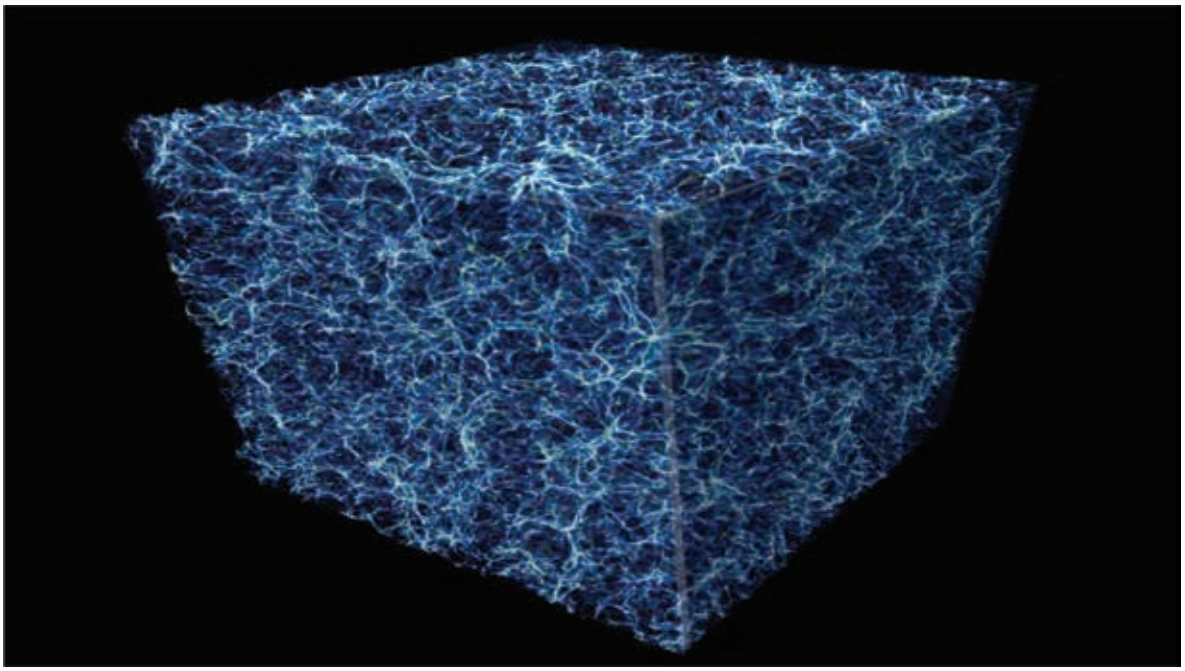
و. الفضـــــاء بين النجـــوم

الفضـاء بـين النجـوم هـو الفضـاء المـادي الـذي يقـع خلـف فقاعـات البلازمـا، والمعروفـة باسـم الغـلاف الفلكـي، والـذي تشـكل بواسـطة الريـاح النجميـة الناشـئة مـن النجـوم الفرديـة. يُطلـق علـى محتويـات الفضـاء بـين النجـوم اسـم الوسـط بـين النجـوم، وتُعـرف الحـدود بـين الغـلاف الفلكـي والفضـاء بـين النجـوم باسـم التوقـف الفلكـي.

صدمة القوس المتكونة من الغلاف المغناطيسي للنجم الفتي LL Orionis (في الوسط) أثناء اصطدامه بتدفق سديم الجبار الذي يقع في الفضاء بين النجوم.

ز. الفضـــاء بـــين المجـــرات

الفضاء بين المجرات هو الفضاء المادي بين المجرات. تُظهر دراسات التوزيع الواسع النطاق للمجرات أن الكون له بنية تشبه الرغوة، حيث تقع مجموعات وعناقيد من المجرات على طول خيوط تشغل نحو عُشر المساحة الإجمالية. ويشكل الباقي فراغات ضخمة معظمها خالي من المجرات. عادةً، يمتد الفراغ لمسافة تتراوح بين 7–30 ميغا فرسخ فلكي.



توزيع المادة على نطاق واسع في مكعب من الكون. تمثل هياكل الألياف الزرقاء المادة، والمناطق الفارغة بينهما تمثل الفراغات الكونية للوسط بين المجرات.

• استكشاف الفضاء

إن غياب الهواء يجعل الفضاء الخارجي موقعًا مثاليًا لتطوير علم الفلك في جميع الأطوال الموجية للطيف الكهرومغناطيسي. ويتجلى ذلك من خلال الصور المذهلة التي أرسلها تلسكوب هابل الفضائي، والتي سمحت برصد الضوء منذ أكثر من 13 بليون سنة، أي حتى وقت الانفجار الكبير تقريبًا.

ليس كل موقع في الفضاء مثاليًا للتلسكوب. يصدر الغبار البروجي بين الكواكب إشعاعًا ينتشر قريبًا من الأشعة تحت الحمراء يمكنه إخفاء انبعاث مصادر باهتة مثل الكواكب خارج المجموعة الشمسية. لذلك فإن تحريك تلسكوب الأشعة تحت الحمراء خارج الغبار يزيد من فعاليته.

وبالمثل، يمكن لموقع مثل فوهة ديدالوس على الجانب البعيد من القمر أن يحمي التلسكوب الراديوي من تداخل الترددات الراديوية الذي يعيق عمليات الرصد الأرضية.

تعد المركبات الفضائية غير المأهولة في مدار الأرض تقنية أساسية للحضارة الحديثة. فهي تسمح بالمراقبة المباشرة للأحوال الجوية، وتنقل الاتصالات بعيدة المدى مثل التلفزيون، وتوفر وسيلة للملاحة الدقيقة، وتسمح باستشعار الأرض عن بعد. ويخدم الدور الأخير مجموعة واسعة من الأغراض، بما في ذلك تتبع رطوبة التربة لأغراض الزراعة، والتنبؤ بتدفق المياه من كتل الثلوج الموسمية، والكشف عن الأمراض في النباتات والأشجار، ومراقبة الأنشطة العسكرية.

يمكن لفراغ الفضاء العميق أن يجعله بيئة جذابة لبعض العمليات الصناعية، مثل تلك التي تتطلب أسطحًا فائقة النظافة. وكما هو الحال في تعدين الكويكبات، فإن التصنيع في الفضاء يتطلب استثمارًا ماليًا كبيرًا مع احتمال ضئيل لتحقيق عائد فوري.

أحد العوامل المهمة في إجمالي النفقات هو التكلفة العالية لوضع الكتلة في مدار الأرض: 9000 إلى 29000 دولار للكيلوغرام الواحد، وفقًا لتقديرات عام 2006 (مع مراعاة التضخم منذ ذلك الحين). انخفضت تكلفة الوصول إلى الفضاء منذ عام 2013. وقد أدت الصواريخ القابلة لإعادة الاستخدام جزئيًا مثل فالكون- 9 إلى خفض تكلفة الوصول إلى الفضاء إلى أقل من 3500 دولار للكيلوغرام الواحد. ومع وجود هذه الصواريخ الجديدة، تبقى تكلفة إرسال المواد إلى الفضاء مرتفعة جدًا بالنسبة للعديد من الصناعات. تشمل المفاهيم المقترحة لمعالجة هذه المشكلة أنظمة الإطلاق القابلة لإعادة الاستخدام بالكامل، والإطلاق الفضائي غير الصاروخي، وحبال تبادل الزخم، والمصاعد الفضائية.

بالإضافة إلى علم الفلك والسفر عبر الفضاء، يمكن استخدام درجة الحرارة فائقة البرودة في الفضاء الخارجي كتقنية تبريد متجددة لتطبيقات مختلفة على الأرض من خلال التبريد الإشعاعي السلبي أثناء النهار، والذي يعزز نقل الحرارة بالإشعاع الحراري للأشعة تحت الحمراء الطويلة الموجة (LWIR) على سطح الأرض من خلال نافذة الأشعة تحت الحمراء في الفضاء الخارجي لخفض درجات الحرارة المحيطة. أصبح من الممكن مع هذا الاكتشاف قمع التسخين الشمسي باستخدام المواد الضوئية.

صورة للفضاء الخارجي من محطة الفضاء الدولية على ارتفاع 400 كيلومتر في مدار أرضي منخفض. في الخلفية، يظهر الفضاء بين النجوم لمجرة درب التبانة، وكذلك في المقدمة، فوق الأرض، الوهج الهوائي للغلاف الأيوني أسفل وخارج حافة الفضاء المحددة، يقع خط كارمان في الغلاف الحراري.

في حين أن استكشاف الفضاء Space Exploration يجري حاليًا بشكل أساسي بواسطة علماء الفلك باستخدام التلسكوبات، فإن الاستكشاف المادي يكون عن طريق مجسات فضائية روبوتية غير مأهولة ورحلات الفضاء البشرية. يعد استكشاف الفضاء، مثل علم الفلك في شكله الكلاسيكي، أحد المصادر الرئيسية لعلوم الفضاء.

بينما مراقبة الأجرام في الفضاء، المعروفة باسم علم الفلك، تسبق التاريخ المسجل الموثوق به، فإن تطوير الصواريخ الكبيرة والفعالة نسبيًا خلال منتصف

القرن العشرين هو الذي سمح للاستكشاف المادي للفضاء بأن يصبح حقيقة واقعة.

تشمل الأسباب المنطقية المشتركة لاستكشاف الفضاء تطوير البحث العلمي، والهيبة الوطنية، وتوحيد الدول المختلفة، وضمان بقاء البشرية في المستقبل، وتطوير المزايا العسكرية والاستراتيجية ضد البلدان الأخرى.

كان الدافع وراء العصر المبكر لاستكشاف الفضاء هو «سباق الفضاء» بين الاتحاد السوفيتي والولايات المتحدة. كانت القوة الدافعة لبدء استكشاف الفضاء خلال الحرب الباردة. بعد القدرة على صنع أسلحة نووية، وترك سردية (الدفاع/الهجوم) الأرضي أصبحت القدرة على التحكم في الهواء هي محور التركيز.

كان كل من السوفييت والأمريكيين يكافحون لإثبات تفوقهم في التكنولوجيا من خلال استكشاف المجهول: الفضاء. في الواقع، كان سبب إنشاء وكالة ناسا هو رد فعل على إطلاق القمر الصناعي الروسي (سبوتنيك- 1).

غالبًا ما يعد إطلاق أول جرم من صنع الإنسان إلى مدار حول الأرض، وهو الاتحاد السوفييتي سبوتنيك- 1، في 4 أكتوبر 1957، وأول هبوط على سطح القمر بواسطة بعثة أبولو- 11 الأمريكية في 20 يوليو 1969، بمثابة معالم بارزة لهذه الفترة الأولية من عصر الفضاء.

حقق برنامج الفضاء السوفييتي العديد من المعالم الأولى، بما في ذلك أول كائن حي في المدار في عام 1957، وأول رحلة فضائية بشرية (يوري غاغارين على متن فوستوك- 1) في عام 1961، وأول عملية سير في الفضاء (بواسطة أليكسي ليونوف) في 18 مارس 1965، وأول رحلة في الفضاء (بواسطة أليكسي ليونوف) في 18 مارس 1965، والهبوط الآلي على جرم سماوي آخر عام 1966، وإطلاق أول محطة فضائية (ساليوت- 1) عام 1971.

بعد السنوات العشرين الأولى من الاستكشاف، تحول التركيز من الرحلات الجوية لمرة واحدة إلى الأجهزة المتجددة، مثل برنامج المكوك الفضائي، ومن المنافسة إلى التعاون كما هو الحال مع محطة الفضاء الدولية (ISS).

مع الانتهاء بشكل كبير من محطة الفضاء الدولية بعد STS-133 في مارس 2011، بقيت خطط استكشاف الفضاء من قبل الولايات المتحدة في حالة تغير مستمر. فقد جرى الحكم على برنامج إدارة بوش للعودة إلى القمر بحلول عام 2020 بأنه غير ممول بشكل كاف وغير واقعي من قبل لجنة مراجعة الخبراء التي قدمت تقاريرها في عام 2009.

اقترحت إدارة أوباما مراجعة الخطط في عام 2010 للتركيز على تطوير القدرة على البعثات المأهولة خارج المدار الأرضي المنخفض (LEO)، مع تصور تمديد تشغيل محطة الفضاء الدولية إلى ما بعد عام 2020، ونقل تطوير مركبات الإطلاق للأطقم البشرية من وكالة ناسا إلى القطاع الخاص، وتطوير التكنولوجيا لتمكين البعثات إلى ما بعد المدار الأرضي المنخفض، مثل الأرض-القمر L1، والقمر، والأرض-الشمس L2، والكويكبات القريبة من الأرض، ومدار فوبوس أو المريخ.

في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، بدأت الصين برنامجًا ناجحًا لرحلات الفضاء المأهولة بينما أطلقت الهند تشاندرايان- 1. دعت الصين وروسيا واليابان إلى إرسال بعثات مأهولة إلى القمر خلال القرن الحادي والعشرين، في حين دعا الاتحاد الأوروبي إلى إرسال بعثات مأهولة إلى كل من القمر والمريخ خلال القرنين العشرين والحادي والعشرين.

تاريـــخ الاستكشـــافات الفضائيـــة

أول رحلـــة للفضـــاء الخارجـــي

كان (MW 18014) اختبارًا ألمانيًا لإطلاق صاروخ V-2 تم في 20 يونيو 1944، في مركز أبحاث جيش بينيموند في بينيموند. وكان أول جسم من صنع الإنسان يصل إلى الفضاء الخارجي، حيث وصل إلى أوج بلغ 176 كيلومترًا، وهو أعلى بكثير من خط كارمان. لقد كان إطلاقًا تجريبيًا عموديًا. على الرغم من أن الصاروخ وصل إلى الفضاء، إلا أنه لم يصل إلى السرعة المدارية، وبالتالي عاد إلى الأرض في حالة اصطدام، ليصبح أول رحلة فضائية شبه مدارية.

أول جسم في المدار

كان أول إطلاق مداري ناجح لمهمة سبوتنيك1- السوفيتية غير المأهولة («القمر الصناعي- 1») في 4 أكتوبر 1957. كان وزن القمر الصناعي نحو 83 كغ (183 رطلاً)، ويُعتقد أنه دار حول الأرض على ارتفاع نحو 250 كم. كان يحوي على جهازي إرسال لاسلكي (20 و40 ميجاهرتز)، يصدران «صافرات» يمكن سماعها بواسطة أجهزة الراديو في جميع أنحاء العالم. أمكن استخدام تحليل الإشارات الراديوية لجمع معلومات حول كثافة الإلكترونات في الغلاف الأيوني، في حين جرى تشفير بيانات درجة الحرارة والضغط خلال مدة أصوات الراديو. وأشارت النتائج إلى أن القمر الصناعي لم يتعرض لثقب نيزكي. جرى إطلاق سبوتنيك - 1 بواسطة صاروخ آر- 7. وقد احترق عند عودته في 3 يناير 1958.

أول رحلة بشرية إلى الفضاء الخارجي

كانت أول رحلة فضائية بشرية ناجحة هي فوستوك- 1 («وتعني الشرق- 1»)، وعلى متنها رائد الفضاء الروسي البالغ من العمر 27 عامًا، يوري غاغارين، في 12 أبريل 1961. أكملت المركبة الفضائية مدارًا واحدًا حول الكرة الأرضية، استمر نحو ساعة و48 دقيقة. تردد صدى رحلة غاغارين في جميع أنحاء العالم. لقد كان عرضًا لبرنامج الفضاء السوفيتي المتقدم وفتحا لحقبة جديدة تمامًا في استكشاف الفضاء: رحلات البشرية.

أول استكشاف لجرم فلكي

كان أول جسم اصطناعي يصل إلى جرم سماوي آخر هو لونا- 2 الذي وصل إلى القمر في عام 1959. وأجري أول هبوط لطيف على جرم سماوي آخر بواسطة لونا- 9 عندما هبط على سطح القمر في 3 فبراير 1966. وأصبح لونا- 10 أول قمر صناعي يدخل في مدار حول القمر في 3 أبريل 1966.

أول محطة فضائية

كانت ساليوت- 1 أول محطة فضائية من أي نوع، أطلقها الاتحاد السوفييتي إلى مدار أرضي منخفض في 19 أبريل 1971. تعد محطة الفضاء الدولية حاليًا أكبر وأقدم محطتين فضائيتين تعملان بكامل طاقتهما، وهي مأهولة بشكل مستمر منذ عام 2000، أما المحطة الفضائية الأخرى، تيانجونج، التي بنتها الصين، فهي الآن مأهولة بالكامل وتعمل بكامل طاقتها.

أول رحلــة فضائيــة بين النجـــوم

أصبحت فوياجر- 1 أول جسم من صنع الإنسان يغادر المجموعة الشمسية إلى الفضاء بين النجوم في 25 أغسطس 2012. اجتاز السابر حافة الشمس عند 121 وحدة فلكية.

أبعـــد مـــن الأرض

مرت رحلة أبولو 13 بالجانب البعيد من القمر على ارتفاع 254 كيلومترًا فوق سطح القمر، وعلى بعد 400171 كيلومترًا من الأرض، مما يمثل الرقم القياسي لأبعد مسافة سافرها البشر على الإطلاق من الأرض عام 1970.

اعتبارًا من 26 نوفمبر 2022، كانت المركبة الفضائية فويايجر- 1 على مسافة 159 وحدة فلكية (23.8 بليون كم) من الأرض. وهو أبعد جسم من صنع الإنسان عن الأرض.

الوجـــود البشـــري في الفضـــاء

إن الوجود البشري في الفضاء يتعلق بوجود الإنسانية في الفضاء، ولا سيما كل الوجود البشري في الفضاء والنشاط البشري في الفضاء، أي في الفضاء الخارجي، وبمعنى أوسع أيضًا أي جسم فلكي خارج كوكب الأرض.

لقد كان البشر حاضرين في الفضاء إما، بالمعنى العام، من خلال وجودهم المباشر ونشاطهم مثل رحلات الفضاء البشرية، أو من خلال ممثلي وجودهم ونشاطهم مثل رحلات الفضاء غير المأهولة، مما يجعل «الوجود عن بعد» ممكنًا.

يمكن للوجود البشري في الفضاء، وخاصة من خلال ممثليه، أن يتخذ أشكالًا مادية عديدة، بدءًا من الحطام الفضائي، والمركبات الفضائية المأهولة وغير المأهولة، والأقمار الصناعية، والمراصد الفضائية، والفن في الفضاء، إلى المواقع البشرية في الفضاء الخارجي مثل المحطات الفضائية.

في حين أن الوجود البشري في الفضاء، ولا سيما استمراره ودوامه يمكن أن يكون هدفًا في حد ذاته، فإن الوجود البشري يمكن أن يكون له مجموعة من الأغراض والأساليب بدءًا من استكشاف الفضاء والاستخدام التجاري للفضاء والاستيطان فيه أو حتى استعمار الفضاء وعسكرته.

يتم تحقيق الوجود البشري في الفضاء واستدامته من خلال تقدم وتطبيق علوم الفضاء، وخاصة الملاحة الفضائية في شكل رحلات فضائية وبنية تحتية فضائية.

لقد حقق البشر بعض الوجود الوسيط في جميع أنحاء المجموعة الشمسية، ولكن الوجود الأكثر شمولاً كان في المدار حول الأرض. لقد حافظ البشر على وجودهم المباشر في المدار حول الأرض منذ عام 2000 من خلال طاقم محطة الفضاء الدولية بشكل مستمر، ومع انقطاعات قليلة من خلال طاقم محطة الفضاء مير منذ أواخر الثمانينات.

إن الوجود البشري المتزايد والواسع النطاق في الفضاء المداري حول الأرض، إلى جانب فوائده، أنتج أيضًا تهديدًا له من خلال حمل الحطام الفضائي معه، والذي من المحتمل أن يتدفق إلى ما يسمى بمتلازمة كيسلر. وقد أثار هذا الحاجة إلى تنظيم وتخفيف هذه المخاطر لضمان الوصول المستدام إلى الفضاء الخارجي.

لقد استمر تأمين الوصول إلى الفضاء والوجود البشري فيه من خلال إنشاء قانون الفضاء وصناعة الفضاء، وإنشاء البنية التحتية الفضائية. لكن الاستدامة بقيت هدفًا صعبًا، حيث ترى الأمم المتحدة الحاجة إلى تعزيز استدامة أنشطة الفضاء الخارجي على المدى الطويل في علوم الفضاء وتطبيقاته، وتعتبرها الولايات المتحدة هدفًا حاسمًا لسياستها الفضائية المعاصرة وبرنامجها الفضائي.

تحقق الوجود البشري المباشر في الفضاء عندما قام يوري غاغارين بالتحليق في كبسولة فضائية في عام 1961 في مدار واحد حول الأرض لأول مرة. كما تحقق أن الوجود البشري المباشر في الفضاء المفتوح، أو ما يسمى بالنشاط خارج المركبة، من خلال الخروج من مركبة فضائية ببدلة فضائية، منذ أول شخص يفعل ذلك، أليكسي ليونوف، في عام 1965.

على الرغم من أن فالنتينا تيريشكوفا كانت في عام 1963 أول امرأة تصعد إلى الفضاء، إلا أن المرأة لم تشهد أي وجود آخر في الفضاء حتى الثمانينات وما زالت ممثلة تمثيلاً ناقصًا، مع عدم وجود أي امرأة تهبط على سطح القمر. بدأ تدويل الوجود البشري المباشر في الفضاء مع أول لقاء فضائي لطاقمين من برامج مختلفة لرحلات الفضاء البشرية، وهي مهمة أبولو-سويوز في عام 1975، وفي نهاية السبعينات مع برنامج إنتركوسموس.

تؤوي المحطات الفضائية حتى الآن الوجود البشري المباشر الوحيد طويل الأمد في الفضاء. بعد المحطة الأولى ساليوت- 1 (1971) وطاقمها المأساوي سويوز- 11، تم تشغيل المحطات الفضائية على التوالي بعد سكايلاب (1973)، مما سمح بتطور الوجود البشري المباشر طويل الأمد في الفضاء. انضمت الطواقم الزائرة إلى الوجود البشري المباشر طويل الأمد منذ عام 1977 (ساليوت- 6).

أمكن تحقيق الوجود البشري المباشر المتتالي في الفضاء منذ خليفة ساليوت المحطة الفضائية مير بحلول عام 1987. وقد جرى تحقيق الوجود البشري المباشر دون انقطاع في الفضاء منذ الانتقال التشغيلي من مير إلى محطة الفضاء الدولية، مع اشغالها لأول مرة في عام 2000. وفي بعض الأحيان قد يبلغ عدد الأشخاص الموجودين في الفضاء في الوقت نفسه منذ عام 1995 إلى ما فوق 13 مع رقم قياسي بلغ 17 في عام 2023 على محطتين فضائيتين. استضافت محطة الفضاء الدولية أكبر عدد من الأشخاص في الفضاء في الوقت نفسه، حيث وصلت إلى 13 شخصًا لأول مرة خلال الالتحام الذي استغرق أحد عشر يومًا للمركبة STS-127 في عام 2009.

اجتمع أفراد طاقم STS-131 و Expedition 23 لالتقاط صورة جماعية مكونة من 13 شخصًا في عام 2010، وهو ما سجل الرقم القياسي لأربع نساء في الوقت نفسه في الفضاء.

ما وراء الأرض، كان القمر هو الجرم الفلكي الوحيد الذي شهد حتى الآن وجودًا بشريًا مباشرًا خلال بعثات أبولو التي استمرت بين عامي 1968 و1972، بدءًا من المدار الأول لمركبة أبولو- 8 في عام 1968 ومع أول هبوط لمركبة أبولو- 11 في عام 1969. أطول فترة إقامة بشرية خارج كوكب الأرض كانت ثلاثة أيام بواسطة أبولو- 17.

بينما أن معظم الأشخاص الذين ذهبوا إلى الفضاء هم رواد فضاء، وأعضاء محترفون في برامج رحلات الفضاء البشرية، وخاصة البرامج الحكومية، فقد

جرى تدريب القلة الآخرين، بدءًا من الثمانينات، وذهبوا إلى الفضاء كمشاركين في رحلات الفضاء، مع بقاء أول سائح فضائي في الفضاء في عام 2001.

بحلول نهاية العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، ذهب عدة مئات من الأشخاص من أكثر من 40 دولة إلى الفضاء، ووصل معظمهم إلى المدار. سافر 24 شخصًا إلى ما وراء المدار الأرضي المنخفض، وسار 12 منهم على سطح القمر.

قضى رواد الفضاء بحلول عام 2007 أكثر من 29000 يوم عمل (أو إجمالي تراكمي يزيد عن 77 عامًا)، بما في ذلك أكثر من 100 يوم عمل في الفضاء. الفترات المعتادة للأفراد الذين يسكنون الفضاء في إقامات طويلة هي ستة أشهر، مع أطول إقامة مسجلة تبلغ نحو عام.

الفضاء، وخاصة الجاذبية الصغرى، يجعل الحياة مختلفة عن الحياة على الأرض. فالتحديات تواجه الاحتياجات الأساسية مثل الهواء والضغط ودرجة الحرارة والضوء، وكذلك الحركة والنظافة وتناول الطعام.

تتأثر صحة الإنسان في الغالب بالإقامات الطويلة وخاصة بسبب التعرض للإشعاع السائد والآثار الصحية للجاذبية الصغرى. كانت الوفيات البشرية هي ما حدث بسبب الحوادث أثناء رحلات الفضاء، خاصة عند الإطلاق وإعادة الدخول. ومع آخر حادث طيران أدى إلى مقتل البشر، وهو حادث كولومبيا في عام 2003، ارتفع مجموع الوفيات على متن المركبات إلى 15 رائد فضاء و4 رائدات فضاء، في خمس حوادث منفصلة. وقد توفي أكثر من 100 آخرين في حوادث أثناء الأنشطة المرتبطة مباشرة برحلات الفضاء أو الاختبارات.

يمكن للنشاط الفضائي البشري، ووجوده اللاحق، أن يكون له تأثير على الفضاء وكذلك على القدرة على الوصول إليه. هذا التأثير للنشاط البشري في الفضاء ووجوده، أو إمكاناته، خلق الحاجة إلى معالجة قضاياه المتعلقة بحماية

الكواكب، والحطام الفضائي، والمخاطر النووية، والتلوث الراديوي، والتلوث الضوئي، وإمكانية إعادة استخدام أنظمة الإطلاق، حتى لا يصبح الفضاء منطقةً للتضحية به.

لقد كانت الاستدامة هدفًا لقانون الفضاء وتكنولوجيا الفضاء والبنية التحتية الفضائية، حيث ترى الأمم المتحدة الحاجة إلى تعزيز استدامة أنشطة الفضاء الخارجي على المدى الطويل في علوم الفضاء وتطبيقاتها، وتعتبرها الولايات المتحدة هدفًا حاسمًا لسياساتها.

• سياسة الفضاء المعاصرة وبرنامج الفضاء

لقد انخرط البشر، فرديًا أو كمجتمع، منذ عصور ما قبل التاريخ في تطوير تصورهم للفضاء فوق الأرض، أو للكون ككل، وتطوير مكانتهم فيه.

تدرس العلوم الاجتماعية مثل هذه الأعمال للأشخاص من عصور ما قبل التاريخ إلى المعاصرين في مجالات علم الفلك الأثري وعلم الفلك الثقافي. مع النشاط البشري الفعلي والوجود في الفضاء، تمت إضافة الحاجة إلى مجالات مثل علم الاجتماع الفلكي وعلم الآثار الفضائية.

لقد كان الفضاء والوجود البشري فيه موضوعًا لأجندات مختلفة. كان الوجود البشري في الفضاء في بداياته مدفوعًا بالحرب الباردة وتجاوزها لسباق الفضاء. خلال هذا الوقت، كانت المنافسة التكنولوجية والقومية والأيديولوجية والعسكرية هي العوامل الدافعة المهيمنة لسياسة الفضاء والنشاط الناتج، وخاصة الوجود البشري المباشر في الفضاء.

مع تراجع سباق الفضاء، الذي انتهى بالتعاون في رحلات الفضاء البشرية، تحول التركيز في السبعينات إلى استكشاف الفضاء والروبوتات عن بعد، مع

مجموعة من الإنجازات والتقدم التكنولوجي. كان استكشاف الفضاء يعني في ذلك الوقت أيضًا مشاركة الحكومات في البحث عن حياة خارج كوكب الأرض.

وبما أن النشاط البشري والوجود في الفضاء قد أدى إلى إنتاج فوائد عرضية، بخلاف الأغراض المذكورة أعلاه، مثل مراقبة الأرض وأقمار الاتصالات للاستخدام المدني، فقد نما التعاون الدولي لتعزيز فوائد الوجود البشري في الفضاء بمرور الوقت. ومن أجل استمرار فوائد البنية التحتية الفضائية وعلوم الفضاء، بقيت الأمم المتحدة تضغط من أجل حماية النشاط البشري في الفضاء الخارجي بطريقة مستدامة.

مع ما يسمى بالفضاء الجديد المعاصر، نما هدف تسويق الفضاء جنبًا إلى جنب مع سرد الاستيطان في الفضاء من أجل بقاء بعض البشر بعيدًا عن الأرض وبدونها، والتي بدورها تم تحليلها بشكل نقدي وتسليط الضوء على الأغراض الاستعمارية للنشاط البشري والوجود في الفضاء. وقد أدى ذلك إلى زيادة المشاركة في مجالات بيئة الفضاء وأخلاقيات الفضاء.

• دور الولايات المتحدة في ارتياد الفضاء

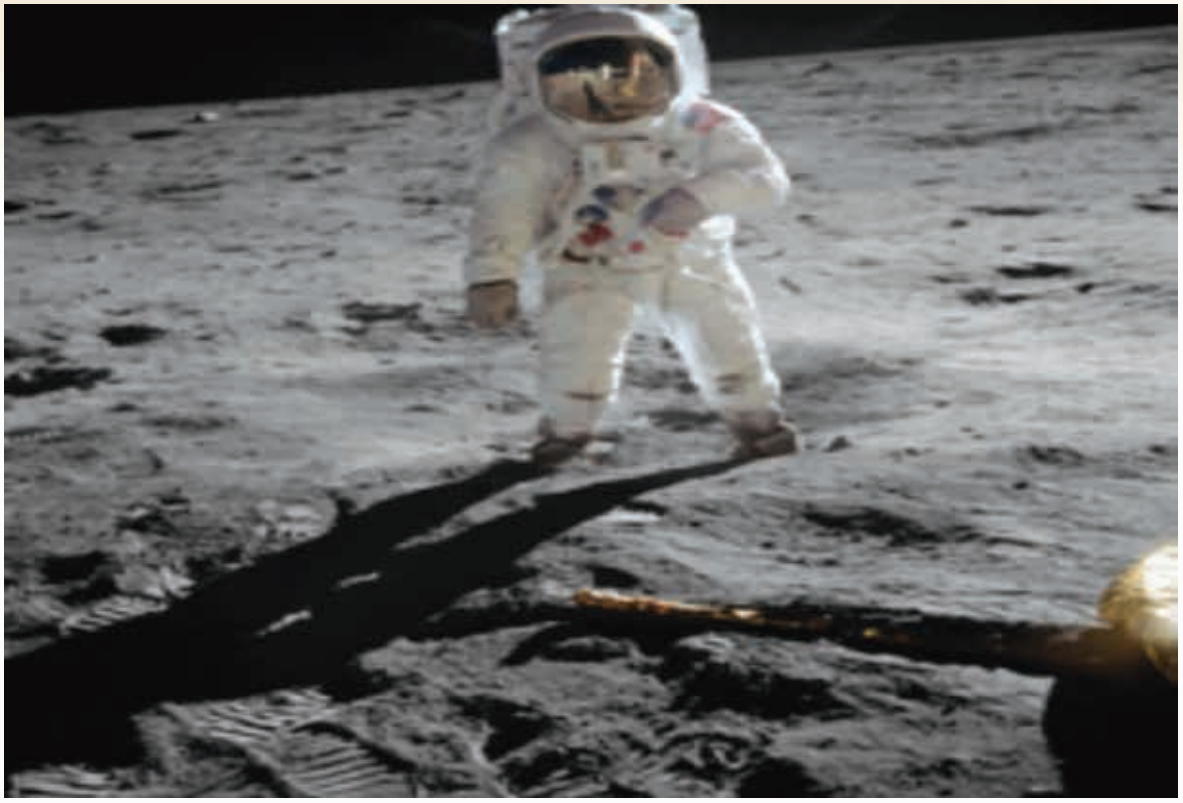
قبل إطلاق سبوتنيك، كانت الولايات المتحدة تعمل على تطوير قدرتها الخاصة على إطلاق قمر صناعي. قامت الولايات المتحدة بمحاولتين فاشلتين لإطلاق قمر صناعي إلى الفضاء قبل أن تنجح في إطلاق صاروخ يحمل قمرًا صناعيًا يسمى إكسبلورر في 31 يناير 1958. وكان الفريق الذي حقق أول إطلاق قمر صناعي أمريكي يتكون إلى حد كبير من مهندسي الصواريخ الألمان الذين طوروا ذات مرة الصواريخ الباليستية (صواريخ لألمانيا النازية).

أثناء العمل لصالح الجيش الأمريكي في ريدستون أرسنال في هانتسفيل، ألاباما، قام مهندسو الصواريخ الألمان بقيادة فيرنر فون براون بتطوير الصاروخ

الألماني V2 إلى صاروخ أكثر قوة، يسمى جوبيتر سي، أو جونو. حمل المستكشف عدة أدوات إلى الفضاء لإجراء تجارب علمية. وكانت إحدى الأدوات هي عداد جايجر للكشف عن الأشعة الكونية. كان ذلك لتجربة أجراها الباحث جيمس فان ألين، والتي أثبتت، إلى جانب قياسات الأقمار الصناعية اللاحقة، وجود ما يسمى حاليًا بأحزمة فان ألين الإشعاعية حول الأرض.

في عام 1958، جرى دمج أنشطة استكشاف الفضاء في الولايات المتحدة في وكالة حكومية جديدة، وهي الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا NASA). عندما بدأت عملياتها في أكتوبر من عام 1958، استوعبت وكالة ناسا ما كان يسمى اللجنة الاستشارية الوطنية للملاحة الجوية (NACA)، والعديد من المرافق البحثية والعسكرية الأخرى، بما في ذلك وكالة الصواريخ الباليستية التابعة للجيش (ترسانة ريدستون) في هانتسفيل.

كان أول إنسان في الفضاء هو رائد الفضاء السوفييتي يوري غاغارين، الذي قام بدورة واحدة حول الأرض في 12 أبريل 1961، في رحلة استغرقت 108 دقيقة. وبعد أكثر من ثلاثة أسابيع بقليل، أطلقت ناسا رائد الفضاء آلان شيبرد إلى الفضاء، ليس في رحلة مدارية، ولكن في مسار شبه مداري - رحلة تذهب إلى الفضاء ولكنها لا تدور حول الأرض بالكامل. استغرقت رحلة شيبرد شبه المدارية ما يزيد قليلًا عن 15 دقيقة. وبعد ثلاثة أسابيع، في 25 مايو، تحدى الرئيس جون ف. كينيدي الولايات المتحدة لتحقيق هدف طموح، معلناً: «أعتقد أن هذه الأمة يجب أن تلزم نفسها بتحقيق الهدف، قبل انتهاء العقد، وهو إنزال رجل على القمر وإعادته سالماً إلى الأرض».



رائد الفضاء أبولو 11 باز ألدرين على سطح القمر (نيل أرمسترونج المنعكس في قناع ألدرين). وخلال السنوات الثلاث والنصف التالية، سار 10 رواد فضاء على خطاهم.

بالإضافة إلى إطلاق أول قمر صناعي، وأول كلب، وأول إنسان في الفضاء، حقق الاتحاد السوفييتي إنجازات فضائية أخرى متقدمًا على الولايات المتحدة. وشملت هذه المعالم لونا- 2، التي أصبحت أول جسم من صنع الإنسان يضرب القمر في عام 1959. وبعد ذلك بوقت قصير، أطلق الاتحاد السوفييتي لونا- 3. وبعد أقل من أربعة أشهر من رحلة غاغارين في عام 1961، دارت بعثة بشرية سوفيتية ثانية حول الأرض لمدة يوم كامل. حقق الاتحاد السوفييتي أيضًا أول سير في الفضاء، وأطلق بعثة فوستوك- 6، مما جعل فالنتينا تيريشكوفا أول امرأة ترتاد الفضاء.

خـلال الستينات، أحـرزت وكالـة ناسـا تقدمًـا نحـو هـدف الرئيـس كينيـدي المتمثـل في هبـوط إنسـان علـى سـطح القمـر مـن خـلال برنامـج يسـمى مشـروع جيميني، حيث اختبر رواد الفضاء التكنولوجيا اللازمة للرحلات المستقبلية إلى القمر، واختبروا قدرتهم على تحمل عدة أيام في رحلات الفضاء. أعقب مشروع جيميني مشروع أبولو، الذي أخذ رواد فضاء إلى مدار حول القمر وإلى سطح القمر بين عامي 1968 و1972.

وفي عام 1969، في رحلة أبولو 11، أرسلت الولايات المتحدة أول رواد فضاء إلى القمر، وأصبح نيل أرمسترونغ أول إنسان يضع قدمه على سطحه. خلال بعثات الهبوط، جمع رواد الفضاء عينات من الصخور والغبار القمري التي لا يزال العلماء يدرسونها للتعرف على القمر. خلال ستينات وسبعينات القرن العشرين، أطلقت وكالة ناسا أيضًا سلسلة من المجسات الفضائية تسمى مارينر، والتي قامت بدراسة كوكب الزهرة والمريخ وعطارد.

تمثل محطات الفضاء المرحلة اللاحقة من استكشاف الفضاء. أول محطة فضائية في مدار الأرض كانت محطة ساليوت 1 السوفيتية والتي جرى إطلاقها في عام 1971. وتبعتها محطة سكايلاب الفضائية التابعة لناسا، وهي أول مختبر مداري قام فيه رواد الفضاء والعلماء بدراسة الأرض وتأثيرات رحلات الفضاء على جسم الإنسان. خلال السبعينات، نفذت وكالة ناسا أيضًا مشروع فايكنغ حيث هبط مسباران على المريخ، والتقطوا العديد من الصور، وفحصوا كيمياء بيئة سطح المريخ، واختبروا بقايا المريخ (التي تسمى الثرى) بحثًا عن الكائنات الحية الدقيقة.

منذ انتهاء برنامج أبولو القمري عام 1972، اقتصر استكشاف الإنسان للفضاء على مدار أرضي منخفض، حيث تشاركت العديد من الدول وأجرت أبحاثًا على محطة الفضاء الدولية. ومع ذلك، فقد سافرت مجسات غير مأهولة إلى جميع أنحاء نظامنا الشمسي.

في عام 1973، مهدت بعثات سكاي لاب الطريق لمحطة الفضاء الدولية. حيث جرى ربط المصفوفات الشمسية الأربعة التي تشبه طاحونة الهواء بحامل تلسكوب أبولو. كانت عمليات رصد الشمس أحد الإنجازات الأساسية لبرنامج مختبر الفضاء هذا.

في السنوات الأخيرة، توصلت المجسات إلى مجموعة من الاكتشافات، بما في ذلك أن قمر المشتري، المسمى أوروبا، وقمر زحل، المسمى إنسيلادوس، لهما محيطات تحت الجليد السطحي يعتقد العلماء أنها قد تؤوي حياة من نوع ما. وفي الوقت نفسه، اكتشفت الأدوات الموجودة في الفضاء، مثل تلسكوب كَيبلر الفضائي، وتلك التي على الأرض آلاف الكواكب الخارجية، والكواكب التي تدور حول نجوم أخرى. بدأت حقبة اكتشاف الكواكب الخارجية في عام 1995، وحيث تسمح التكنولوجيا المتقدمة حالياً للأدوات الموجودة في الفضاء بتوصيف الغلاف الجوي لبعض من هذه الكواكب.

• السياسة الفضائية الأمريكية

تشمل السياسة الفضائية للولايات المتحدة الأمريكية وضع سياسة الفضاء من خلال العملية التشريعية، وتنفيذ تلك السياسة في برامج الفضاء المدنية والعسكرية عبر الهيئات التنظيمية. يرتبط التاريخ المبكر لسياسة الولايات المتحدة الفضائية بسباق الفضاء الأمريكي السوفييتي في الستينات، والذي أفسح المجال لبرنامج المكوك الفضائي. في الوقت الحالي، تهدف سياسة الفضاء الأمريكية إلى استكشاف القمر واستعمار المريخ لاحقًا.

مكوك الفضاء كولومبيا (OV-102) هو مكوك فضائي أمكن تصنيعه بواسطة شركة روكويل إنترناشيونال وتديره وكالة ناسا. سميت على اسم أول سفينة أمريكية تبحر حول الساحل العلوي لأمريكا الشمالية على المحيط الهادئ والتجسيد الأنثوي للولايات المتحدة، وكانت كولومبيا أول مركبة من بين خمس مركبات مدارية للمكوك الفضائي تطير في الفضاء، حيث ظهرت لأول مرة مركبة إطلاق المكوك الفضائي في رحلتها الأولى في أبريل 1981.

تقوم السلطة التنفيذية بصياغة السياسة الفضائية للولايات المتحدة بتوجيه من رئيس الولايات المتحدة، وتقدم للموافقة عليها وإنشاء التمويل للعملية التشريعية لكونغرس الولايات المتحدة.

يمكن لمنظمات الدفاع عن الفضاء تقديم المشورة للحكومة والضغط من أجل تحقيق أهداف الفضاء. وتشمل هذه المجموعات المناصرة مثل معهد علوم الفضاء، ورابطة قوة الفضاء، وجمعية الفضاء الوطنية، والمجلس الاستشاري لجيل الفضاء، وآخرها يدير حدث ليلة يوري Yuri's Night السنوي، من بين أمور أخرى؛ والجمعيات العلمية مثل الجمعية الفلكية الأمريكية والجمعية الأمريكية للملاحة الفضائية؛ والمنظمات السياسية مثل الأكاديميات الوطنية.

عند صياغة سياسة الفضاء، يتشاور الرئيس مع الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا)، المسؤولة عن برامج الفضاء المدنية والعلمية، ومع وزارة الدفاع، المسؤولة عن الأنشطة الفضائية العسكرية، والتي تشمل الاتصالات والاستطلاع والاستخبارات ورسم الخرائط، والدفاع الصاروخي.

لقد أنشأ القانون الوطني للملاحة الجوية والفضاء عام 1958، الذي أنشأ وكالة ناسا، مجلسًا وطنيًا للملاحة الجوية والفضاء يرأسه الرئيس للمساعدة في تقديم المشورة له، والذي ضم وزير الخارجية، ووزير الدفاع، ومدير ناسا، ورئيس لجنة الطاقة الذرية، بالإضافة إلى عضو واحد في الحكومة الفيدرالية، وما يصل إلى ثلاثة أفراد من القطاع الخاص «بارزين في العلوم أو الهندسة أو التكنولوجيا أو التعليم أو الإدارة أو الشؤون العامة» يعينهم الرئيس.

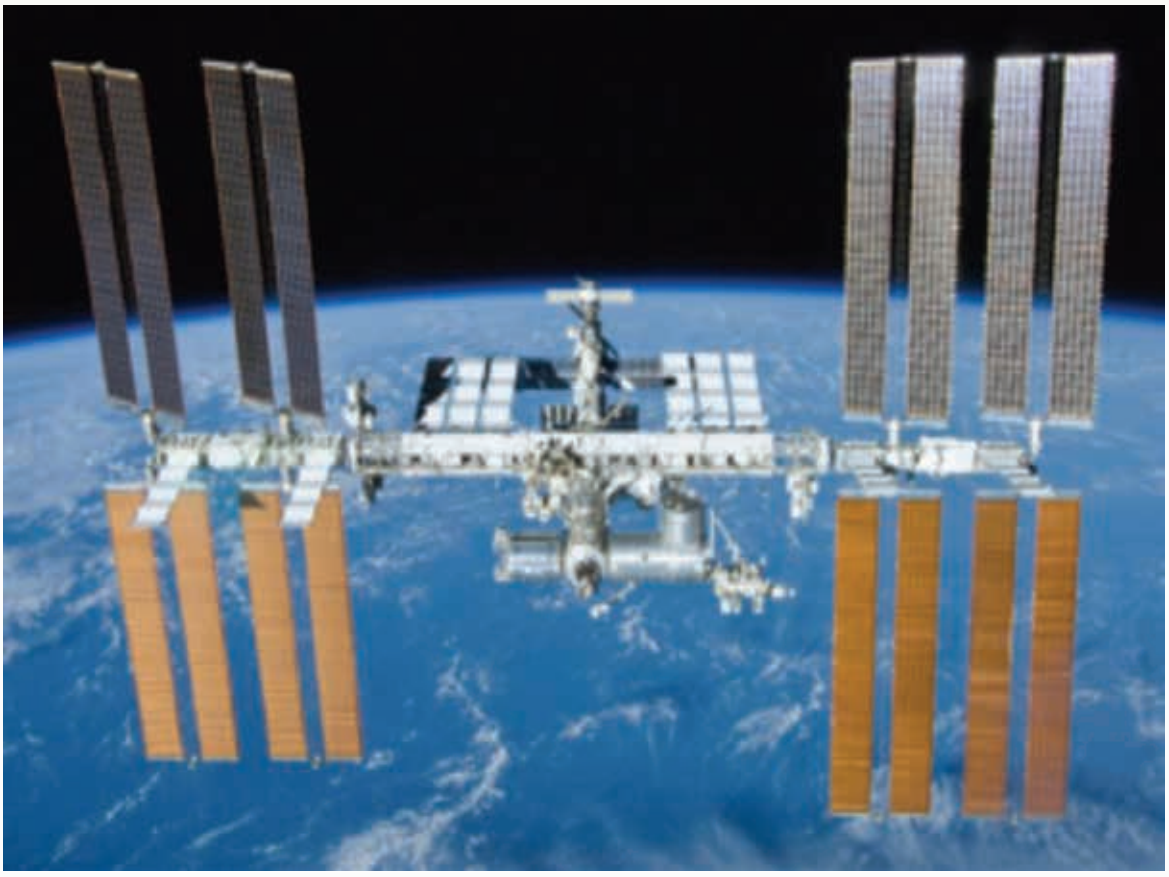
قبل توليه منصب الرئاسة، أقنع جون كينيدي الكونغرس بتعديل القانون للسماح له بإرساء سابقة تفويض رئاسة هذا المجلس إلى نائبه (ليندون جونسون). توقف المجلس في عام 1973 أثناء رئاسة ريتشارد نيكسون. في عام

1989، أعاد الرئيس جورج بوش الأب إنشاء مجلس وطني للفضاء جرى تشكيله بشكل مختلف بموجب أمر تنفيذي، والذي جرى إيقافه في عام 1993 من قبل الرئيس بيل كلينتون. أعاد الرئيس دونالد ترامب تشكيل المجلس بأمر تنفيذي في عام 2017.

قد تتضمن الجوانب الدولية لسياسة الفضاء الأمريكية مفاوضات دبلوماسية مع دول أخرى، مثل معاهدة الفضاء الخارجي لعام 1967. وفي هذه الحالات، يتفاوض الرئيس على المعاهدة ويوقعها نيابة عن الولايات المتحدة وفقاً لسلطته الدستورية، ثم يعرضها على الكونغرس للتصديق عليها.

تنفذ الأنشطة الفضائية المدنية تقليديًا وحصريًا بواسطة وكالة ناسا، لكن الأمة تنتقل إلى نموذج حيث يجري تنفيذ المزيد من الأنشطة من قبل شركات خاصة بموجب مشورة ناسا ودعم موقع الإطلاق. بالإضافة إلى ذلك، تقوم الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي التابعة لوزارة التجارة بتشغيل خدمات مختلفة ذات مكونات فضائية، مثل برنامج لاندسات.

يجري تنفيذ الأنشطة الفضائية العسكرية من قبل قوة الفضاء الأمريكية وقيادة الفضاء الأمريكية.



تعد محطة الفضاء الدولية (ISS) أكبر محطة فضائية جرى بناؤها على الإطلاق. تقع المحطة في مدار أرضي منخفض ولها غرض أساسي هو إجراء تجارب الجاذبية الصغرى وبيئة الفضاء. كما يوحي اسمها، فإن محطة الفضاء الدولية هي عبارة عن تعاون بين خمس وكالات فضاء وطنية ومقاولين آخرين. وهذه الوكالات هي: وكالة ناسا (الولايات المتحدة)، وروسكوزموس (روسيا)، وجاكسا (اليابان)، ووكالة الفضاء الأوروبية (أوروبا)، ووكالة الفضاء الكندية (كندا).

أثـــر الفضـــاء على جســـم الإنســـان

إن تأثيـرات رحـلات الفضـاء علـى جسـم الإنسـان معقـدة وضـارة إلـى حـد كبيـر علـى المـدى القصيـر والطويـل. مـن الآثـار الضـارة الشـديدة لانعـدام الـوزن على المدى الطويل ضمور العضـلات وتدهـور الهيـكل العظمـي (فقـدان العظـام في رحـلات الفضـاء).

ومـن التأثيـرات المهمـة الأخـرى تباطـؤ وظائـف نظـام القلـب والأوعيـة الدمويـة، وانخفـاض إنتـاج خلايـا الـدم الحمـراء (فقـر الـدم الفضائـي)، واضطرابـات التوازن، واضطرابـات البصـر والتغيـرات في جهـاز المناعـة.

تشـمل الأعـراض الإضافيـة إعـادة توزيـع السـوائل (ممـا يـؤدي إلـى ظهـور «وجـه القمـر» النموذجـي في صـور روّاد الفضـاء الذيـن يعانـون مـن انعـدام الـوزن)، وفقـدان كتلـة الجسـم، واحتقـان الأنـف، واضطـراب النـوم، وانتفـاخ البطـن الزائـد.

بشـكل عـام، تشـير وكالـة ناسـا إلـى التأثيـرات الضـارة المختلفـة لرحـلات الفضـاء علـى جسـم الإنسـان مـن خـلال اختصـار RIDGE (أي الإشـعاع الفضائـي، والعزلـة والحبـس، والبعـد عـن الأرض، وحقـول الجاذبيـة، والبيئـات المعاديـة والمغلقـة).

لقـد تم دراسـة المشـكلات الهندسـية المرتبطـة بمغـادرة الأرض وتطويـر أنظمـة الدفـع الفضائيـة لأكثـر مـن قـرن، وجـرى إنفـاق ملايـين السـاعات مـن البحـث عليهـا. في السـنوات الأخيـرة، كانـت هنـاك زيـادة في الأبحـاث حـول مسـألة كيفيـة بقـاء البشـر علـى قيـد الحيـاة والعمـل في الفضـاء لفتـرات طويلـة وربمـا غيـر محـددة مـن الزمـن.

يتطلـب هـذا السـؤال مدخـلات مـن العلـوم الفيزيائيـة والبيولوجيـة، وقـد أصبـح الآن التحـدي الأكبـر (بخـلاف التمويـل) الـذي يواجـه استكشـاف الإنسـان للفضـاء.

تتمثل الخطوة الأساسية للتغلب على هذا التحدي في محاولة فهم تأثيرات السفر طويل المدى إلى الفضاء على جسم الإنسان.

في أكتوبر 2015، أصدر مكتب المفتش العام لناسا تقريرًا عن المخاطر الصحية المتعلقة باستكشاف الفضاء، بما في ذلك إرسال بعثة بشرية إلى المريخ.

في 12 أبريل 2019، أعلنت وكالة ناسا عن نتائج طبية، من دراسة توأم رائد الفضاء، حيث قضى أحد التوأمين عامًا كاملًا في الفضاء على متن محطة الفضاء الدولية، في حين أمضى التوأم الآخر العام نفسه على الأرض، مما أظهر العديد من التغيرات طويلة الأمد، بما في ذلك تلك المتعلقة بالتغيرات في الحمض النووي والإدراك، عندما تمت مقارنة أحد التوأمين مع الآخر.

في نوفمبر 2019، أفاد باحثون أن رواد الفضاء عانوا من مشكلات خطيرة في تدفق الدم والجلطات أثناء وجودهم على متن محطة الفضاء الدولية، بناءً على دراسة استمرت ستة أشهر شملت 11 رائد فضاء يتمتعون بصحة جيدة. وقد تؤثر النتائج على رحلات الفضاء طويلة المدى، بما في ذلك بعثة إلى كوكب المريخ، وفقًا للباحثين.

تختلف العديد من الظروف البيئية التي يعيشها البشر أثناء رحلات الفضاء اختلافًا كبيرًا عن تلك التي تطور فيها البشر؛ ومع ذلك، فإن التكنولوجيا مثل تلك التي تقدمها سفينة الفضاء أو بدلة الفضاء قادرة على حماية الناس من أقسى الظروف. حيث تُلبى الاحتياجات العاجلة للهواء القابل للتنفس والمياه الصالحة للشرب من خلال نظام دعم الحياة، وهو عبارة عن مجموعة من الأجهزة التي تسمح للبشر بالبقاء على قيد الحياة في الفضاء الخارجي.

يوفر نظام دعم الحياة الهواء والماء والغذاء. كما يجب عليه الحفاظ على درجة الحرارة والضغط ضمن الحدود المقبولة والتعامل مع فضلات الجسم.

مـن الضـروري أيضًـا الحمايـة ضـد التأثيـرات الخارجيـة الضـارة مثـل الإشـعاع والنيـازك الدقيقـة.

يصعـب التخفيـف مـن بعـض المخاطـر، مثـل انعـدام الـوزن، الـذي يُعـرف أيضًـا ببيئـة الجاذبيـة الصغـرى. يؤثـر العيـش في هـذا النـوع مـن البيئـة علـى الجسـم بثـلاث طرائـق مهمـة: فقـدان الحـس العميـق، والتغيـرات في توزيـع السـوائل، وتدهور الجهـاز العضلـي الهيكلـي.

في 2 نوفمبـر 2017، أفـاد العلمـاء أنـه عثـر علـى تغييـرات كبيـرة في موضـع وبنيـة الدمـاغ لـدى روّاد الفضـاء الذيـن قامـوا برحـلات في الفضـاء، بنـاءً علـى دراسـات التصويـر بالرنيـن المغناطيسـي. ارتبـط روّاد الفضـاء الذيـن قامـوا برحـلات فضائيـة أطـول بتغيـرات أكبـر في الدمـاغ.

في أكتوبـر 2018، وجـد باحثـون بتمويـل مـن وكالـة ناسـا أن الرحـلات الطويلـة إلـى الفضـاء الخارجـي، بمـا في ذلـك السـفر إلـى كوكـب المريـخ، قـد تؤدي إلـى تلـف كبيـر في أنسـجة الجهـاز الهضمـي لـروّاد الفضـاء. وتدعـم هـذه الدراسـات الأبحـاث السـابقة التـي وجـدت أن مثـل هـذه الرحـلات يمكـن أن تلحـق الضـرر بشـكل كبيـر بأدمغـة روّاد الفضـاء، وتؤدي إلـى تقدمهـم في السـن قبـل الأوان.

في مـارس 2019، ذكـرت وكالـة ناسـا أن الفيروسـات الكامنـة في البشـر قـد يتـم تنشـيطها أثنـاء المهـام الفضائيـة، ممـا قـد يزيـد مـن المخاطـر علـى روّاد الفضـاء في مهـام الفضـاء السـحيق المسـتقبلية.

طـب الفضـاء هـو ممارسـة طبيـة متطـورة تـدرس صحـة روّاد الفضـاء الذيـن يعيشـون في الفضـاء الخارجـي. الغـرض الرئيـس مـن هـذا المسـعى الأكاديمـي هـو اكتشـاف مـدى قـدرة النـاس علـى البقـاء علـى قيـد الحيـاة في الظـروف القاسـية في الفضـاء وإلـى متـى، ومـدى سـرعة إعـادة التكيـف مـع بيئـة الأرض بعـد عودتهـم مـن الفضـاء. ويسـعى طـب الفضـاء أيضًـا إلـى تطويـر تدابيـر وقائيـة وتلطيفيـة لتخفيـف المعانـاة الناجمـة عـن العيـش في بيئـة لا يتكيـف معهـا الإنسـان بشـكل جيـد.

• الجاذبيـــة

أثناء الإقلاع والعودة إلى الفضاء، يمكن للمسافرين تجربة الجاذبية الطبيعية عدة مرات. عادة ما يستطيع الشخص غير المدرب أن يتحمل نحو 3 أضعاف الجاذبية الأرضية، ولكن يمكن أن يفقد الوعي عند 4 إلى 6 أضعاف الجاذبية الأرضية. يصعب تحمل قوة الجاذبية في الاتجاه العمودي مقارنة بالقوة المتعامدة مع العمود الفقري لأن الدم يتدفق بعيدًا عن الدماغ والعينين. في البداية، يعاني الشخص من فقدان مؤقت للرؤية، ثم يفقد وعيه عند ارتفاع قوى الجاذبية. إن التدريب على قوة الجاذبية الأرضية وبدلة الجاذبية الأرضية التي تقيد الجسم للحفاظ على المزيد من الدم في الرأس يمكن أن تخفف من التأثيرات. تم تصميم معظم المركبات الفضائية لإبقاء قوى الجاذبية ضمن حدود مريحة.

إن بيئة الفضاء قاتلة بدون الحماية المناسبة؛ فالتهديد الأكبر في فراغ الفضاء ينبع من نقص الأكسجين والضغط، على الرغم من أن درجة الحرارة والإشعاع تشكل مخاطر أيضًا. آثار التعرض للفضاء يمكن أن تؤدي إلى تسمم الدم، نقص الأكسجة، ونقص ثنائي أكسيد الكربون، ومرض تخفيف الضغط. بالإضافة إلى ذلك، هناك أيضًا الطفرة الخلوية والتدمير بسبب الفوتونات عالية الطاقة والجسيمات دون الذرية الموجودة في المناطق المحيطة.

يعد تخفيف الضغط مصدر قلق خطير أثناء الأنشطة خارج المركبة (EVAs) لرواد الفضاء. تأخذ التصميمات الحالية لوحدة التنقل خارج المركبة (EMU) هذه المشكلة وغيرها في الاعتبار، وقد تطورت مع مرور الوقت.

كان التحدي الرئيس يتمثل في زيادة قدرة رواد الفضاء على الحركة (والتي يتم تقليلها بواسطة وحدات التنقل خارج المركبة ذات الضغط العالي، وهو ما يشبه صعوبة تشويه بالون منتفخ مقارنة بالبالون المفرغ من الهواء) وتقليل

خطر تخفيف الضغط. لقد فكر المحققون في الضغط على وحدة رأس منفصلة إلى ضغط المقصورة العادي البالغ 71 كيلو باسكال بدلًا من ضغط الاتحاد الاقتصادي والنقدي الكامل الحالي البالغ 29.6 كيلو باسكال. في مثل هذا التصميم، يمكن تحقيق ضغط الجذع ميكانيكيًا، مع تجنب تقليل الحركة المرتبطة بالضغط الهوائي.

• الحـــــرارة

لا يوجد في الفراغ وسط لإزالة الحرارة من الجسم بالتوصيل أو الحمل الحراري. يتم فقدان الحرارة عن طريق الإشعاع من درجة حرارة الشخص البالغة 310 كلفن إلى درجة حرارة 3 كلفن في الفضاء الخارجي. هذه عملية بطيئة، خاصة عند الشخص الذي يرتدي ملابسه، لذلك لا يوجد خطر التجمد الفوري. قد يؤدي التبريد التبخيري السريع لرطوبة الجلد في الفراغ إلى حدوث صقيع، خاصة في الفم، لكن هذا لا يشكل خطرًا كبيرًا.

• الإشـــــعاع

إن التعرض للإشعاع المكثف لأشعة الشمس المباشرة غير المرشحة من شأنه أن يؤدي إلى تسخين موضعي، مع أنه من المحتمل أن يتم توزيع ذلك بشكل جيد من خلال موصلية الجسم والدورة الدموية. ومع ذلك، قد تسبب الإشعاعات الشمسية الأخرى، وخاصة الأشعة فوق البنفسجية، حروقًا شديدة للشمس.

في 31 مايو 2013، أفاد علماء ناسا أن مهمة بشرية محتملة إلى المريخ قد تنطوي على خطر إشعاعي كبير يعتمد على كمية إشعاع الجسيمات النشطة

التي اكتشفت في مختبر علوم المريخ أثناء السفر من الأرض إلى المريخ بين 2011-2012.

في سبتمبر 2017، أفادت وكالة ناسا أن مستويات الإشعاع على سطح كوكب المريخ قد تضاعفت مؤقتًا، وارتبطت بشفق قطبي أكثر سطوعًا بمقدار 25 مرة من أي شيء تم رصده سابقًا، وذلك بسبب عاصفة شمسية ضخمة وغير متوقعة في منتصف الشهر.

• انعدام الوزن

بعد ظهور المحطات الفضائية التي يمكن السكن فيها لفترات طويلة من الزمن، ثبت أن التعرض لانعدام الوزن له بعض الآثار الضارة على صحة الإنسان. يتكيف البشر بشكل جيد مع الظروف الفيزيائية على سطح الأرض، وبالتالي استجابتهم لانعدام الوزن، تبدأ الأنظمة الفسيولوجية المختلفة في التغير، وفي بعض الحالات، الضمور. مع أن هذه التغييرات عادة ما تكون مؤقتة، إلا أن بعضها له تأثير طويل المدى على صحة الإنسان.

التعرض على المدى القصير للجاذبية الصغرى يسبب متلازمة التكيف مع الفضاء، والغثيان المحدود الذاتي الناجم عن خلل في الجهاز الدهليزي. التعرض طويل الأمد يسبب مشكلات صحية متعددة، من أهمها فقدان العظام وكتلة العضلات. مع مرور الوقت، يمكن لهذه التأثيرات غير المشروطة أن تضعف أداء رواد الفضاء، وتزيد من خطر الإصابة، وتقلل من قدرتهم الهوائية، وتبطئ نظام القلب والأوعية الدموية لديهم.

بما أن جسم الإنسان يتكون في معظمه من السوائل، فإن الجاذبية تميل إلى دفعها إلى النصف السفلي من الجسم، ولدى أجسامنا العديد من الأنظمة لموازنة هذا الوضع. عندما تتحرر هذه الأنظمة من قوة الجاذبية، فإنها تستمر في العمل، مما يتسبب في إعادة توزيع السوائل بشكل عام في النصف العلوي من الجسم. هذا هو سبب «انتفاخ» الوجه المستدير الذي يظهر عند رواد الفضاء، وقد يساهم في ملاحظة تغير التحكم الحركي بالكلام لدى رواد الفضاء. وإعادة توزيع السوائل حول الجسم نفسه يسبب اضطرابات في التوازن وتشوه الرؤية وفقدان حاستي التذوق والشم.

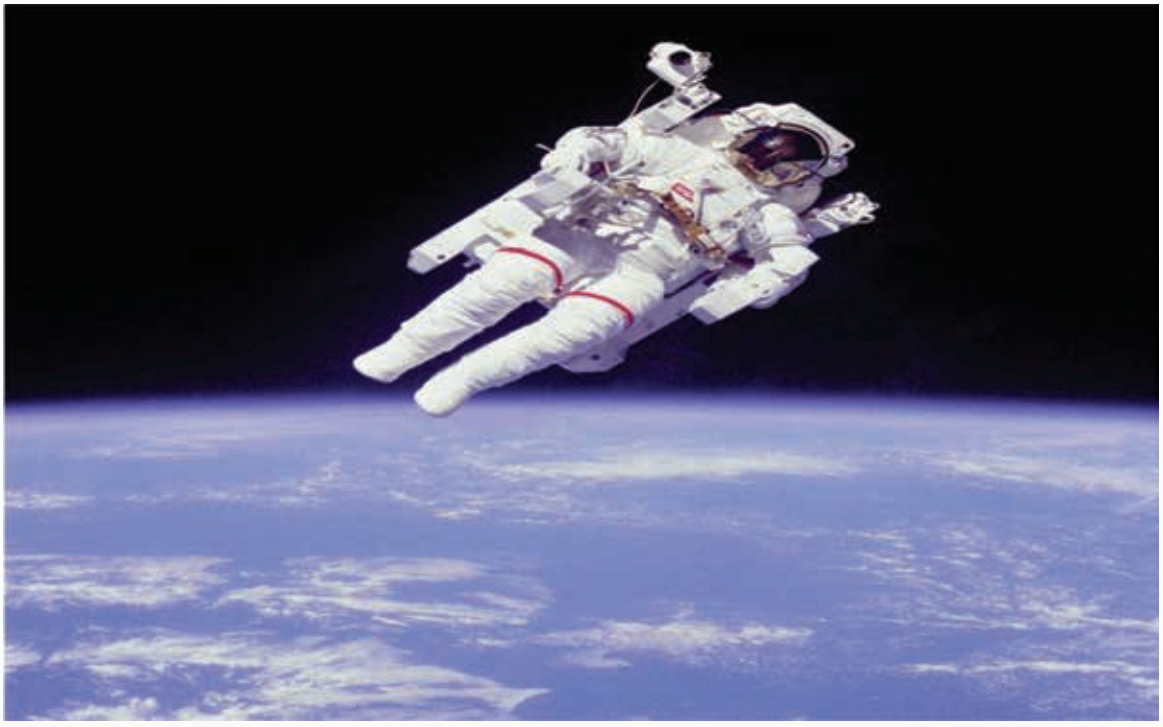
وجدت تجربة مكوك الفضاء عام 2006 أن السالمونيلا تيفيموريوم، وهي بكتيريا يمكن أن تسبب التسمم الغذائي، أصبحت أكثر فتكًا عندما جرى زراعتها في الفضاء.

في 29 أبريل 2013، أفاد علماء في معهد رينسيلار للفنون التطبيقية، بتمويل من وكالة ناسا، أنه أثناء رحلات الفضاء على محطة الفضاء الدولية، يبدو أن الميكروبات تتكيف مع بيئة الفضاء بطرائق «لم يتم ملاحظتها على الأرض» وبطرائق «يمكن أن تؤدي إلى زيادة في النمو والفوعة». وفي الآونة الأخيرة، في عام 2017، وُجد أن البكتيريا أكثر مقاومة للمضادات الحيوية وتزدهر في الفضاء الذي يقترب من انعدام الوزن. وقد لوحظ أن الكائنات الحية الدقيقة تعيش في فراغ الفضاء الخارجي.

• دوار الحركـــــة

تُعرف المشكلة الأكثر شيوعًا التي يواجهها البشر في الساعات الأولى من انعدام الوزن بمتلازمة التكيف مع الفضاء أو SAS، والتي يشار إليها عادةً باسم دوار الفضاء. وهو مرتبط بدوار الحركة، وينشأ عندما يتكيف الجهاز الدهليزي مع انعدام الوزن.

تشمل أعراض متلازمة التكيف مع الفضاء الغثيان والقيء والدوار والصداع والخمول والشعور بالضيق العام. تم الإبلاغ عن أول حالة لمتلازمة التكيف مع الفضاء من قبل رائد الفضاء جيرمان تيتوف في عام 1961. ومنذ ذلك الحين، عانى ما يقرب من 45 % من جميع الأشخاص الذين سافروا إلى الفضاء من هذه الحالة.



رائد الفضاء بروس ماكاندليس الثاني أثناء السير في الفضاء خلال المهمة STS-41-B.

• تدهـور العظـام والعضـــلات

أحد الآثار الرئيسية لانعدام الوزن على المدى الطويل ينطوي على فقدان كتلة العظام والعضلات. وبدون تأثيرات الجاذبية، لم تعد العضلات الهيكلية مطلوبة للحفاظ على وضعيتها، وتختلف مجموعات العضلات المستخدمة في التحرك في بيئة انعدام الوزن عن تلك المطلوبة في الحركة الأرضية.

في بيئة انعدام الوزن، لا يضع رواد الفضاء أي وزن تقريبًا على عضلات الظهر أو عضلات الساق المستخدمة للوقوف. ثم تبدأ تلك العضلات في الضعف وتصبح أصغر حجمًا في النهاية. وبالتالي، فإن بعض العضلات تضمر بسرعة، وبدون ممارسة التمارين الرياضية بانتظام يمكن أن يفقد رواد الفضاء ما يصل إلى 20 % من كتلة عضلاتهم خلال 5 إلى 11 يومًا فقط.

تتغير أيضًا أنواع الألياف العضلية البارزة في العضلات. يتم استبدال ألياف التحمل البطيئة الانقباض المستخدمة للحفاظ على الوضعية بألياف سريعة الانقباض بسرعة غير كافية لأي عمل شاق. قد يساعد التقدم في الأبحاث المتعلقة بالتمارين الرياضية والمكملات الهرمونية والأدوية في الحفاظ على كتلة العضلات والجسم.

يتغير أيضًا استقلاب العظام. عادة، يتم وضع العظام في اتجاه الإجهاد الميكانيكي. ومع ذلك، في بيئة الجاذبية الصغرى، هناك القليل جدًا من الضغط الميكانيكي. وينتج عن ذلك فقدان الأنسجة العظمية بنسبة 1.5 % تقريبًا شهريًا خاصة من الفقرات السفلية والورك وعظم الفخذ.

بسبب الجاذبية الصغرى وانخفاض الحمل على العظام، هناك زيادة سريعة في فقدان العظام، من 3 % فقدان العظام القشرية كل عقد إلى نحو 1 % كل شهر يتعرض الجسم للجاذبية الصغرى، بالنسبة لشخص بالغ يتمتع بصحة جيدة.

رائد فضاء وكالة الفضاء الأوروبية فرانك دي وين، قائد البعثة 21، يتدرب على جهاز الجري المقاوم للحمل التشغيلي المشترك (كولبيرت) في عقدة هارموني بمحطة الفضاء الدولية.

يعد التغير السريع في كثافة العظام أمرًا مثيرًا، مما يجعل العظام ضعيفة وينتج عنه أعراض تشبه أعراض هشاشة العظام. على الأرض، يتم التخلص من العظام وتجديدها باستمرار من خلال نظام متوازن يتضمن إرسال الإشارات إلى الخلايا العظمية.

وتقترن هذه الأنظمة، بحيث إنه عندما يتم تكسير العظام، تحل الطبقات المشكلة حديثًا مكانها، ولا ينبغي أن يحدث أي منهما دون الآخر، في شخص بالغ سليم. ومع ذلك، في الفضاء، هناك زيادة في نشاط ناقضات العظم بسبب الجاذبية الصغرى. هذه مشكلة لأن الخلايا الآكلة للعظم تقوم بتكسير العظام إلى معادن يمتصها الجسم.

لا تنشط الخلايا العظمية بشكل متتابع مع الخلايا الآكلة للعظم، مما يتسبب في تقلص العظم باستمرار دون أي تعاف. وقد لوحظت هذه الزيادة في نشاط الخلايا العظمية بشكل خاص في منطقة الحوض لأن هذه هي المنطقة التي تحمل العبء الأكبر مع وجود الجاذبية. أظهرت إحدى الدراسات أنه في الفئران السليمة، زاد ظهور الخلايا العظمية بنسبة 197 %، مصحوبًا بانخفاض تنظيم الخلايا العظمية وعوامل النمو المعروفة بأنها تساعد في تكوين عظام جديدة، بعد ستة عشر يومًا فقط من التعرض للجاذبية الصغرى.

يؤدي ارتفاع مستويات الكالسيوم في الدم من العظام المفقودة إلى تكلس خطير في الأنسجة الرخوة واحتمال تكوين حصوات الكلى. لا يزال من غير المعروف ما إذا كان العظم يتعافى تمامًا. وعلى عكس الأشخاص المصابين بهشاشة العظام، يستعيد رواد الفضاء في النهاية كثافة عظامهم. بعد رحلة إلى الفضاء مدتها 3–4 أشهر، يستغرق الأمر نحو 2–3 سنوات لاستعادة كثافة العظام المفقودة.

ويجري تطوير تقنيات جديدة لمساعدة رواد الفضاء على التعافي بشكل أسرع. قد يكون للبحث في النظام الغذائي وممارسة الرياضة والأدوية القدرة على المساعدة في عملية نمو عظام جديدة.

ولمنع بعض هذه التأثيرات الفسيولوجية الضارة، تم تجهيز محطة الفضاء الدولية بجهازين للمشي (بما في ذلك جهاز كولبيرت COLBERT)، وجهاز aRED (جهاز التمرين المقاوم المتقدم)، الذي يتيح تمارين رفع الأثقال المختلفة التي تضيف العضلات ولكنها لا تفعل شيئًا لكثافة العظام، ودراجة ثابتة يقضي كل رائد فضاء ساعتين على الأقل يوميًا في ممارسة التمارين على المعدات.

يستخدم رواد الفضاء حبال البنجي لربط أنفسهم بجهاز المشي. يرتدي رواد الفضاء الذين يخضعون لفترات طويلة من انعدام الوزن سراويل ذات أشرطة مرنة متصلة بين حزام الخصر والأصفاد للضغط على عظام الساق وتقليل هشاشة العظام.

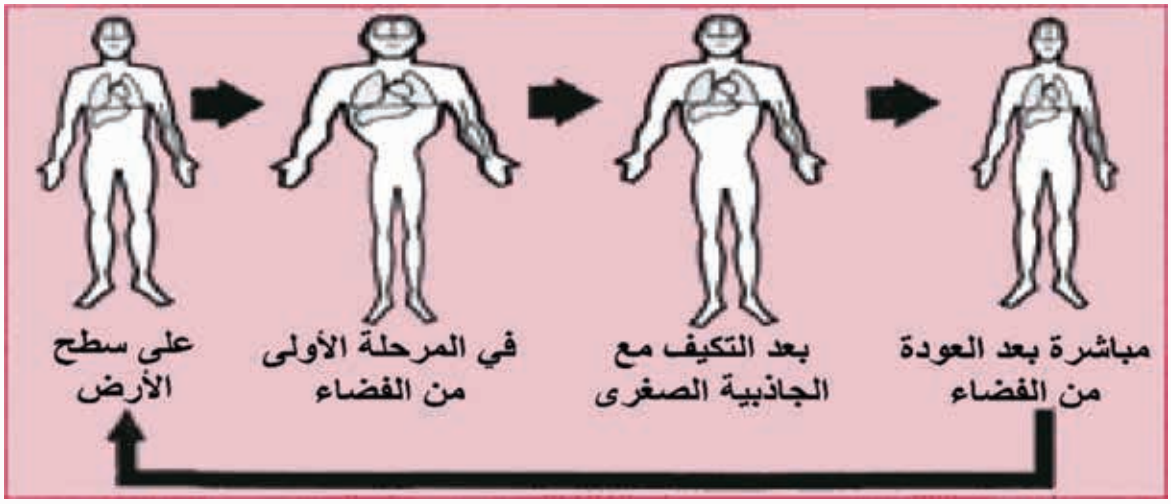
حاليًا، تستخدم ناسا أدوات حسابية متقدمة لفهم أفضل طريقة لمواجهة ضمور العظام والعضلات الذي يعاني منه رواد الفضاء في بيئات الجاذبية الصغرى لفترات طويلة من الزمن. حيث قام عنصر التدابير المضادة للصحة البشرية التابع لبرنامج البحوث البشرية بتفويض مشروع رائد الفضاء الرقمي للتحقيق في الأسئلة المستهدفة حول أنظمة التدابير المضادة للتمارين الرياضية. تركز ناسا على دمج نموذج من جهاز التمارين المقاومة المتقدم (ARED) الموجود حاليًا على متن محطة الفضاء الدولية مع نماذج OpenSim للعضلات الهيكلية لبشر يمارسون الرياضة مع الجهاز.

الهدف من هذا العمل هو استخدام الديناميكيات العكسية لتقدير عزم الدوران المشترك وقوى العضلات الناتجة عن استخدام ARED، وبالتالي وصف أنظمة التمرين لرواد الفضاء بشكل أكثر دقة. يمكن استخدام عزم الدوران المشترك وقوى العضلات جنبًا إلى جنب مع عمليات المحاكاة الحسابية الأساسية لإعادة تشكيل العظام وتكيف العضلات من أجل وضع نموذج أكثر اكتمالاً للتأثيرات النهائية لهذه التدابير المضادة، وتحديد ما إذا كان نظام التمرين المقترح سيكون كافيًا للحفاظ على صحة العضلات والعظام لرواد الفضاء.

• إعـــادة توزيـــع الســـوائل

في الفضاء، يفقد رواد الفضاء مقدارًا من السوائل، بما في ذلك ما يصل إلى 22 % من حجم دمهم. نظرًا لأن الدم الذي يجب ضخه أقل، فإن القلب سوف يضمر. يؤدي ضعف القلب إلى انخفاض ضغط الدم ويمكن أن يسبب مشكلة في «التسامح الانتصابي»، أو قدرة الجسم على إرسال كمية كافية من الأكسجين إلى الدماغ دون إغماء رائد الفضاء أو إصابته بالدوار.

تحت تأثير الجاذبية الأرضية، يتم سحب الدم وسوائل الجسم الأخرى نحو الجزء السفلي من الجسم. وعندما يتم إبعاد الجاذبية أو تقليلها أثناء استكشاف الفضاء، يميل الدم إلى التجمع في الجزء العلوي من الجسم بدلاً من ذلك، مما يؤدي إلى وذمة الوجه وغيرها من الأمور غير المرغوب فيها. عند العودة إلى الأرض، يبدأ الدم بالتجمع في الأطراف السفلية مرة أخرى، مما يؤدي إلى انخفاض ضغط الدم الانتصابي.



تأثيرات الجاذبية الصغرى على توزيع السوائل حول الجسم (الصورة مبالغ فيها إلى حد كبير).

• اضطـــراب الحـــواس

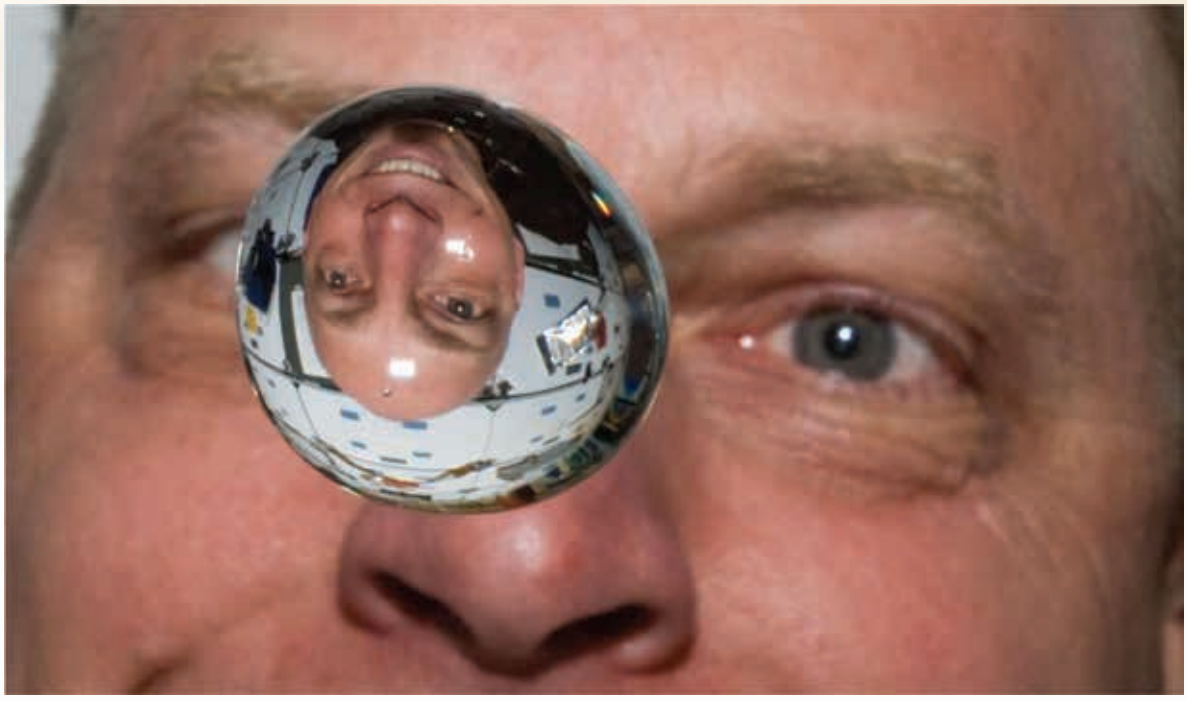
تعاني الحواس من عددٍ من الاضطرابات في ظروف الجاذبية الصغرى.

1. الرؤيـــــة

في عام 2013، نشرت وكالة ناسا دراسة وجدت تغيرات في عيون وبصر القرود خلال الرحلات الفضائية التي تزيد مدتها عن 6 أشهر. وشملت التغييرات الملحوظة تسطيح مقلة العين وتغييرات في شبكية العين. يمكن أن تصبح رؤية مسافر الفضاء ضبابية بعد قضاء وقت طويل في الفضاء. يُعرف تأثير آخر باسم الظواهر المرئية للأشعة الكونية.

نظرًا لأن الغبار لا يمكن أن يستقر في حالة انعدام الجاذبية، يمكن أن تدخل قطع صغيرة من الجلد الميت أو المعدن إلى العين، مما يسبب تهيجًا ويزيد من خطر الإصابة بالعدوى.

يمكن لرحلات الفضاء الطويلة أيضًا أن تغير حركات عين مسافر الفضاء (خاصة المنعكس الدهليزي العيني).



رائد الفضاء كلايتون أندرسون يراقب فقاعة ماء تطفو في منتصف سطح مكوك الفضاء ديسكفري خلال مهمة STS-131. لاحظ أن صورته في الفقاعة مقلوبة رأسًا على عقب لأن الفقاعة تكسر أشعة الضوء.

2. الضغـــط داخـــل الجمجمـــة

نظرًا لأن انعدام الوزن يزيد من كمية السوائل في الجزء العلوي من الجسم، فإنّ رواد الفضاء يعانون من زيادة الضغط داخل الجمجمة. ويبدو أن هذا يؤدي إلى زيادة الضغط على الجزء الخلفي من مقل العيون، مما يؤثر على شكلها ويضغط على العصب البصري قليلًا.

وقد لوحظ هذا التأثير في عام 2012 في دراسة باستخدام فحوصات التصوير بالرنين المغناطيسي لرواد الفضاء الذين عادوا إلى الأرض بعد شهر واحد على الأقل في الفضاء. يمكن أن تكون مشكلات البصر هذه مصدر قلق

كبير لمهمات رحلات الفضاء السحيق المستقبلية، بما في ذلك البعثة المأهولة إلى كوكب المريخ.

إذا كان الضغط المرتفع داخل الجمجمة هو السبب بالفعل، فإن الجاذبية الاصطناعية قد تقدم حلاً واحدًا، كما هو الحال بالنسبة للعديد من المخاطر الصحية البشرية في الفضاء. ومع ذلك، لم يتم إثبات أنظمة الجاذبية الاصطناعية هذه بعد. علاوة على ذلك، فحتى في ظل الجاذبية الاصطناعية المتطورة، قد تبقى حالة من الجاذبية الصغرى النسبية قائمة، ولا تزال مخاطرها مجهولة.

3. التـــــذوق

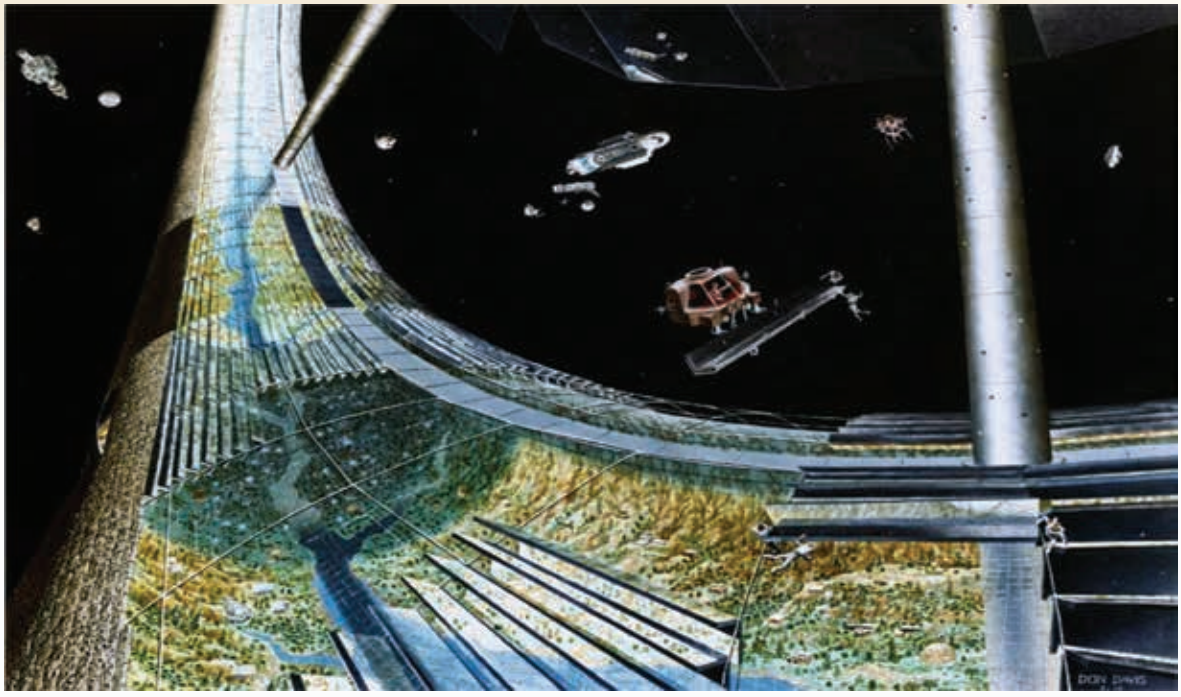
أحد تأثيرات انعدام الوزن على البشر هو أن بعض رواد الفضاء أبلغوا عن تغير في حاسة التذوق لديهم عندما كانوا في الفضاء. يجد بعض رواد الفضاء أن طعامهم لطيف، بينما يجد آخرون أن طعامهم المفضل لم يعد مذاقه جيدًا (الشخص الذي استمتع بالقهوة كره مذاقها كثيرًا في البعثة لدرجة أنه توقف عن شربها بعد عودته إلى الأرض)؛ يستمتع بعض رواد الفضاء بتناول أطعمة معينة لا يتناولونها عادة، والبعض الآخر لا يواجه أي تغيير على الإطلاق. لم تحدد اختبارات متعددة السبب، وتم اقتراح العديد من النظريات، بما في ذلك تدهور الغذاء، والتغيرات النفسية مثل الملل. غالبًا ما يختار رواد الفضاء الأطعمة ذات المذاق القوي لمحاربة فقدان التذوق.

4. تأثيـــرات فسـيولوجيـــة إضافيـــة

في غضـون شـهر واحـد، يتمـدد الهيـكل العظمـي البشـري بالكامـل في حالـة انعـدام الـوزن، ممـا يـؤدي إلـى زيـادة الطـول بمقـدار بوصـة واحـدة (2.54 سـم). بعـد شـهرين، تـذوب مسـامير القـدم الموجـودة في أسـفل القدمـين وتسـقط بسـبب قلـة الاسـتخدام، تاركـة جلـدًا جديـدًا ناعمًـا. علـى النقيـض مـن ذلـك، تصبـح قمـم القدمـين خشـنة وحساسـة بشـكل مؤلـم، لأنهـا تحتـك بالدرابزيـن الـذي يتـم ربـط القـدم بـه لتحقيـق الاسـتقرار.

لا يمكـن ذرف الدمـوع أثنـاء البـكاء، لأنهـا تلتصـق ببعضهـا البعـض علـى شـكل كـرة. في الجاذبيـة الصغـرى، تتخلـل الروائـح البيئـة بسـرعة، وقـد وجـدت ناسـا في اختبـار أن رائحـة كريـم شـيري تثيـر منعكـس القـيء. تعـد العديـد مـن المضايقـات الجسـدية الأخـرى مثـل آلام الظهـر والبطـن شـائعة بسـبب إعـادة التكيـف مـع الجاذبيـة، حيـث لا توجـد جاذبيـة في الفضـاء ويمكـن لهـذه العضـلات أن تتمـدد بحريـة.

قـد تكـون هـذه جـزءًا مـن متلازمـة الوهـن التـي أبلـغ عنهـا رواد الفضـاء الذيـن عاشـوا في الفضـاء لفتـرة طويلـة مـن الزمـن، ولكنهـا تعتبـر قصصيـة مـن قبـل رواد الفضـاء. يعـد التعـب والخمـول والمخـاوف النفسـية الجسـدية أيضًـا جـزءًا مـن المتلازمـة، لكـنّ البيانـات غيـر حاسـمة. ومـع ذلـك، يبـدو أن المتلازمـة موجـودة كمظهـر مـن مظاهـر الضغـوط الداخليـة والخارجيـة التـي يجـب أن تواجههـا أطقـم العمـل في الفضـاء.



يجب أن تأخذ جهود استعمار الفضاء في الاعتبار تأثيرات الفضاء على جسم الإنسان. وقد تكون الجاذبية الصناعية أحد الحلول.

لقد أدى مجموع الخبرة البشرية إلى تراكم 58 سنة شمسية في الفضاء وفهم أفضل لكيفية تكيف الجسم البشري. في المستقبل، سوف يتطلب تصنيع الفضاء واستكشاف الكواكب الداخلية والخارجية من البشر أن يتحملوا فترات أطول وأطول في الفضاء.

تأتي غالبية البيانات الحالية من بعثات قصيرة المدة، وبالتالي فإن بعض التأثيرات الفسيولوجية طويلة الأمد للعيش في الفضاء لا تزال غير معروفة. من المقدر أن تستغرق الرحلة ذهابًا وإيابًا إلى المريخ باستخدام التكنولوجيا الحالية ما لا يقل عن 18 شهرًا من العبور وحده.

إن معرفة كيفية تفاعل جسم الإنسان مع مثل هذه الفترات الزمنية في الفضاء هو جزء حيوي من التحضير لمثل هذه الرحلات. يجب أن تكون المرافق الطبية على متن السفينة كافية للتعامل مع أي نوع من الصدمات أو حالات الطوارئ، فضلًا عن احتوائها على مجموعة كبيرة ومتنوعة من الأدوات التشخيصية والطبية من أجل الحفاظ على صحة الطاقم على مدى فترة طويلة من الزمن، حيث ستكون هي المرافق التسهيلات الوحيدة والمتاحة على متن المركبة الفضائية للتعامل ليس فقط مع الصدمات، ولكن أيضًا مع الاستجابات التكيفية للجسم البشري في الفضاء.

في الوقت الحالي، لم يجرب ظروف الفضاء سوى البشر الذين تم اختبارهم بدقة. إذا بدأ الاستعمار خارج العالم يومًا ما، فسوف يتعرض العديد من الأشخاص لهذه المخاطر، وتأثيراتها على الصغار غير معروفة تمامًا.

في 29 أكتوبر 1998، عاد جون غلين، أحد رواد ميركوري 7 الأصليين، إلى الفضاء عن عمر يناهز 77 عامًا. وقد زودت رحلته الفضائية، التي استمرت 9 أيام، وكالة ناسا بمعلومات مهمة حول تأثيرات رحلات الفضاء على كبار السن. ستصبح عوامل مثل المتطلبات الغذائية والبيئات المادية التي لم يتم فحصها حتى الآن مهمة.

بشكل عام، هناك القليل من البيانات حول التأثيرات المتعددة للعيش في الفضاء، وهذا يجعل محاولات تخفيف المخاطر أثناء الإقامة الطويلة في الفضاء صعبة. يتم حاليًا استخدام منصات الاختبار مثل محطة الفضاء الدولية للبحث في بعض هذه المخاطر.

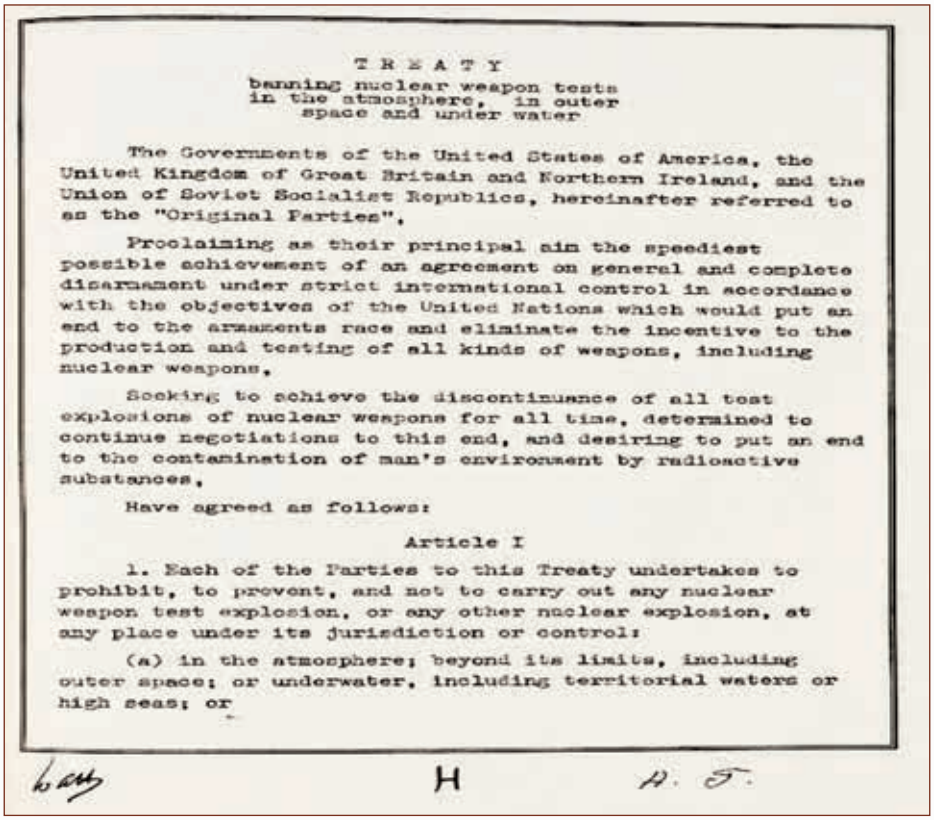
لا تزال بيئة الفضاء مجهولة إلى حد كبير، ومن المحتمل أن تكون هناك مخاطر غير معروفة حتى الآن. ومن ناحية أخرى، فإن التكنولوجيات المستقبلية مثل الجاذبية الاصطناعية وأنظمة دعم الحياة الحيوية الأكثر تعقيدا قد تكون قادرة في يوم من الأيام على تخفيف بعض المخاطر.

محطة الفضاء الروسية مير والقمر، أصبحا قمرين للأرض: أثناء دورانهم حول الكوكب خلال مهمتهم في يونيو 1998، قام طاقم المكوك الفضائي ديسكفري بتصوير هذا المنظر لقمرين للأرض. توفر الدراسات التي أجريت على رواد الفضاء الروس، مثل تلك التي أجريت على مير، بيانات عن التأثيرات طويلة المدى للفضاء على جسم الإنسان.

• قانـــون الفضـــاء

قانون الفضاء هو مجموعة القوانين التي تحكم الأنشطة المتعلقة بالفضاء، ويشمل الاتفاقيات والقواعد والمبادئ الدولية والمحلية. تشمل معايير قانون الفضاء استكشاف الفضاء، والمسؤولية عن الأضرار، واستخدام الأسلحة، وجهود الإنقاذ، والحفاظ على البيئة، وتبادل المعلومات، والتقنيات الجديدة، والأخلاق.

تم أيضًا دمج مجالات القانون الأخرى، مثل؛ القانون الإداري، وقانون الملكية الفكرية، وقانون الحد من الأسلحة، وقانون التأمين، وقانون البيئة، والقانون الجنائي، والقانون التجاري، في قانون الفضاء.



TREATY
banning nuclear weapon tests
in the atmosphere, in outer
space and under water

The Governments of the United States of America, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, and the Union of Soviet Socialist Republics, hereinafter referred to as the "Original Parties",

Proclaiming as their principal aim the speediest possible achievement of an agreement on general and complete disarmament under strict international control in accordance with the objectives of the United Nations which would put an end to the armaments race and eliminate the incentive to the production and testing of all kinds of weapons, including nuclear weapons,

Seeking to achieve the discontinuance of all test explosions of nuclear weapons for all time, determined to continue negotiations to this end, and desiring to put an end to the contamination of man's environment by radioactive substances,

Have agreed as follows:

Article I

1. Each of the Parties to this Treaty undertakes to prohibit, to prevent, and not to carry out any nuclear weapon test explosion, or any other nuclear explosion, at any place under its jurisdiction or control:

(a) in the atmosphere; beyond its limits, including outer space; or underwater, including territorial waters or high seas; or

H

الصفحة الأولى من معاهدة 1963 التي حظرت التجارب النووية في الجو والفضاء الخارجي وتحت الماء.

تعود أصول قانون الفضاء إلى عام 1919، حيث يعترف القانون الدولي بسيادة كل دولة على المجال الجوي الواقع فوق أراضيها مباشرة، وهو القانون الذي تم تعزيزه لاحقًا في اتفاقية شيكاغو في عام 1944.

أدى ظهور برامج الفضاء المحلية خلال الحرب الباردة إلى الإنشاء الرسمي لسياسة الفضاء الدولية (أي السنة الجيوفيزيائية الدولية) التي بدأها المجلس الدولي للاتحادات العلمية. كان إطلاق الاتحاد السوفييتي في عام 1957 لأول قمر صناعي في العالم، سبوتنيك- 1، الدافع المباشر لكونغرس الولايات المتحدة لإقرار قانون الفضاء، وبالتالي إنشاء الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا). نظرًا لأن استكشاف الفضاء يتطلب عبور الحدود العابرة للحدود الوطنية، فقد أصبح قانون الفضاء خلال هذه الحقبة مجالًا مستقلًا عن قانون الفضاء الجوي التقليدي.

منذ الحرب الباردة، أصبحت معاهدة المبادئ المنظمة لأنشطة الدول في مجال استكشاف واستخدام الفضاء الخارجي، بما في ذلك القمر والأجرام السماوية الأخرى (معاهدة الفضاء الخارجي)، والاتحاد الدولي للاتصالات السلكية واللاسلكية الإطار القانوني الدستوري ومجموعة المبادئ والإجراءات التي تشكل قانون الفضاء.

علاوة على ذلك، فإن لجنة الأمم المتحدة لاستخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية (كوبوس)، إلى جانب لجانها الفرعية القانونية والعلمية والتقنية، مسؤولة عن مناقشة قضايا قانون وسياسات الفضاء الدولية. ويقوم مكتب الأمم المتحدة لشؤون الفضاء الخارجي (UNOOSA) مقام أمانة اللجنة ويعمل على تعزيز الوصول إلى الفضاء للجميع من خلال مجموعة واسعة من المؤتمرات وبرامج بناء القدرات.

إن التحديات التي سيستمر قانون الفضاء في مواجهتها في المستقبل هي أربعة أضعاف - تمتد عبر أبعاد الامتثال المحلي، والتعاون الدولي، والأخلاق، وظهور الابتكارات العلمية. علاوة على ذلك، لم يتم بعد تحديد مبادئ توجيهية محددة بشأن تعريف المجال الجوي على المستوى العالمي.

• اتفاقيـــة محطـــة الفضـــاء الدوليـــة لعـــام 1998

بالإضافة إلى المعاهدات الدولية التي تم التفاوض عليها في الأمم المتحدة، دخلت الدول المشاركة في محطة الفضاء الدولية في اتفاقية عام 1998 بين حكومات كندا والدول الأعضاء في وكالة الفضاء الأوروبية واليابان والاتحاد الروسي والولايات المتحدة بشأن التعاون في محطة الفضاء الدولية المدنية.

تنص هذه الاتفاقية، من بين أمور أخرى، على أن ناسا هي الوكالة الرائدة في تنسيق مساهمات الدول الأعضاء وأنشطتها في المحطة الفضائية، وأن كل دولة لها ولاية قضائية على (الوحدات) الخاصة بها. كما تنص الاتفاقية على حماية الملكية الفكرية وإجراءات الملاحقة الجنائية. قد تكون هذه الاتفاقية نموذجًا للاتفاقيات المستقبلية المتعلقة بالتعاون الدولي في المنشآت الموجودة على القمر والمريخ، حيث من المحتمل إنشاء أول مستعمرات وقواعد علمية/صناعية خارج العالم.

• المبـــادئ والإعلانـــات الدوليـــة

اعتمدت الجمعية العامة للأمم المتحدة خمسة إعلانات ومبادئ قانونية تشجع على ممارسة القوانين الدولية والتواصل الموحد بين الدول.

هذه تغطي المعاهدات والاتفاقيات الخمس لقانون الفضاء الدولي، عدم استيلاء أي دولة على الفضاء الخارجي، والحد من الأسلحة، وحرية الاستكشاف، والمسؤولية عن الأضرار التي تسببها الأجرام الفضائية، وسلامة وإنقاذ المركبات الفضائية ورواد الفضاء، ومنع التدخل الضار في الأنشطة الفضائية والبيئة، والإبلاغ عن الأنشطة الفضائية وتسجيلها، والبحث العلمي واستغلال الموارد الطبيعية في الفضاء الخارجي وتسوية المنازعات.

الإعلانات والمبادئ الخمسة هي:

• إعلان المبادئ القانونية المنظمة لأنشطة الدول في مجال استكشاف واستخدام الفضاء الخارجي (1963)

إن جميع عمليات استكشاف الفضاء ستتم بنوايا حسنة وستكون مفتوحة على قدم المساواة لجميع الدول التي تمتثل للقانون الدولي. ولا يجوز لأي دولة أن تطالب بملكية الفضاء الخارجي أو أي جرم سماوي. يجب أن تلتزم الأنشطة التي يتم تنفيذها في الفضاء بالقانون الدولي ويجب على الدول التي تجري هذه الأنشطة المذكورة أن تقبل مسؤولية الوكالة الحكومية أو غير الحكومية المعنية. تخضع الأجسام التي يتم إطلاقها في الفضاء إلى الأمة التي تنتمي إليها، بما في ذلك الأشخاص. سيتم إرجاع الأشياء والأجزاء والمكونات المكتشفة خارج نطاق الولاية القضائية للدولة عند تحديد هويتها. إذا أطلقت دولة ما جسمًا ما إلى الفضاء، فهي مسؤولة عن أي أضرار تحدث على المستوى الدولي.

• الاتفـاق المنظـم لأنشـطة الـدول علـى القمـر والأجـرام السـماوية الأخـرى (1979)

تهدف الاتفاقية إلى تشجيع استكشاف الفضاء الخارجي، مع الحفاظ على القمر والأجرام السماوية الأخرى في ظروف نقية من أجل التراث المشترك للبشرية، مما يعني أنه لا يجوز لأي دولة أن تطالب بالسيادة على أي جزء من الفضاء. ينبغي أن تتمتع جميع البلدان بحقوق متساوية في إجراء البحوث على القمر أو الأجرام السماوية الأخرى. إن أسلحة الدمار الشامل من أي نوع، بما في ذلك الأسلحة النووية والقواعد المبنية لأغراض عسكرية، محظورة على وجه التحديد بموجب المعاهدة. وينص قرار الأمم المتحدة أيضًا على أنه يجوز لجميع الدول الأطراف إجراء مشروعاتها تحت سطح القمر أو أي جرم سماوي طالما بذلت الجهود لحمايته من التلوث. يجب أن تكون جميع الأنشطة في الفضاء مرتبطة بدولة ما، وأي أضرار تلحق بمعدات أو منشآت دولة أخرى بسبب طرف آخر يجب أن يتم سدادها بالكامل لتلك الدولة. إن أي اكتشاف لخطر محدق، مثل منطقة مشعة، يجب أن يخطر الأمين العام للأمم المتحدة والمجتمع العلمي الدولي على الفور. يجب على جميع البعثات في الفضاء التي تستمر لأكثر من 60 يومًا إخطار الأمين العام للأمم المتحدة والمجتمع العلمي الأكبر كل 30 يومًا بالتقدم المحرز. وأي عينات يتم جمعها من الفضاء يجب أن تكون متاحة للمجتمع العلمي في أقرب وقت ممكن.

إن نشر علم الولايات المتحدة أثناء أول هبوط مأهول على سطح القمر (أبولو 11) على سطح القمر لا يشكل مطالبة إقليمية، على عكس الممارسات التاريخية على الأرض، حيث عززت الولايات المتحدة معاهدة الفضاء الخارجي من خلال الالتزام بها وعدم القيام بالمطالبة الإقليمية.

ولا تشمل الاتفاقية النيازك التي تسقط على الأرض بالوسائل الطبيعية. وفي الوقت الحالي، لم تصدق أي دولة تقوم بمهامها الخاصة في الفضاء على الاتفاقية. يشير هذا على الأرجح إلى أن «معاهدة القمر» من المحتمل أن تكون معاهدة فاشلة لأن أيًا من الدول التي ذهبت بالفعل إلى الفضاء لم توقع أو تصدق على الاتفاقية.

- **المبادئ التي تحكم استخدام الدول للأقمار الصناعية الأرضية للبث التلفزيوني المباشر الدولي (1982)**

يجب أن تتم الأنشطة من هذا النوع وفقًا للحقوق السيادية للدول. وينبغي للأنشطة المذكورة أن «تعزز النشر الحر والتبادل المتبادل للمعلومات والمعارف في المجالات الثقافية والعلمية، والمساعدة في التنمية التعليمية والاجتماعية والاقتصادية، ولا سيما في البلدان النامية، وتعزيز نوعية حياة جميع الشعوب وتوفير الترفيه مع الاحترام الواجب للسلامة السياسية والثقافية للدول». تتمتع جميع الدول بحقوق متساوية في متابعة هذه الأنشطة ويجب أن تتحمل المسؤولية عن أي شيء يتم تنفيذه ضمن حدود سلطتها. تحتاج أنشطة التخطيط في الدولة إلى الاتصال بالأمين العام للأمم المتحدة لإبلاغه بتفاصيل الأنشطة الجارية.

- **المبادئ المتعلقة باستشعار الأرض عن بعد من الفضاء الخارجي (1986)**

تم ذكر خمسة عشر مبدأً تحت هذا البند. الفهم الأساسي يأتي من هذه الأوصاف التي قدمها مكتب الأمم المتحدة لشؤون الفضاء الخارجي:

أ. يعني مصطلح «الاستشعار عن بعد» استشعار سطح الأرض من الفضاء بالاستفادة من خصائص الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة أو المنعكسة أو المنحرفة عن الأجرام المحسوسة، بغرض تحسين إدارة الموارد الطبيعية واستخدام الأراضي وحماية البيئة.

ب. يعني مصطلح «البيانات الأولية» تلك البيانات التي تحصل عليها أجهزة الاستشعار عن بعد التي يحملها جسم فضائي والتي يتم إرسالها أو تسليمها إلى الأرض من الفضاء عن طريق القياس عن بعد في شكل إشارات كهرومغناطيسية، أو عن طريق أفلام فوتوغرافية، أو أشرطة مغناطيسية أو أي وسيلة أخرى.

ج. يعني مصطلح «البيانات المعالجة» المنتجات الناتجة عن معالجة البيانات الأولية اللازمة لجعل هذه البيانات قابلة للاستخدام.

د. يعني مصطلح «المعلومات التي تم تحليلها» المعلومات الناتجة عن تفسير البيانات المعالجة ومدخلات البيانات والمعرفة من مصادر أخرى.

هـ. يعني مصطلح «أنشطة الاستشعار عن بعد» تشغيل أنظمة الاستشعار عن بعد الفضائية، ومحطات جمع وتخزين البيانات الأولية، وأنشطة معالجة وتفسير ونشر البيانات المعالجة.

- **المبادئ المتعلقة باستخدام مصادر الطاقة النووية في الفضاء الخارجي (1992)**

«على الدول التي تطلق أجسامًا فضائية تحمل على متنها مصادر قدرة نووية أن تسعى إلى حماية الأفراد والسكان والمحيط الحيوي من المخاطر الإشعاعية. ويجب أن يضمن تصميم واستخدام الأجسام الفضائية التي تحمل على متنها مصادر قدرة نووية، بدرجة عالية من الثقة، أن المخاطر، في الظروف التشغيلية أو العرضية المتوقعة، تظل أقل من المستويات المقبولة. ...».

- **إعـلان التعـاون الدولـي في استكشـاف واسـتخدام الفضـاء الخارجـي لفائـدة جميـع الـدول ومصلحتهـا، مـع إيـلاء الاعتبـار الخـاص لاحتياجـات البلـدان الناميـة (1996)**

«للـدول الحريـة في تحديـد جميـع جوانـب مشـاركتها في التعـاون الدولـي في مجـال استكشـاف واسـتخدام الفضـاء الخارجـي على أسـاس منصـف ومقبـول من الطرفـين. وينبغـي لجميـع الـدول، ولا سـيما الـدول التـي لديهـا قـدرات فضائيـة ذات صلـة ولديهـا برامـج لاستكشـاف الفضـاء الخارجـي واسـتخدامه، أن تسـاهم في تعزيـز التعـاون الدولـي على أسـاس منصـف ومقبـول مـن الطرفـين. وفي هـذا السـياق، ينبغـي إيـلاء اهتمـام خـاص لفائـدة ومصالـح البلـدان الناميـة والبلـدان التـي لديهـا برامـج فضائيـة ناشـئة عـن هـذا التعـاون الدولـي الجـاري مـع البلـدان التـي تتمتـع بقـدرات فضائيـة أكثـر تقدمًـا. وينبغـي أن يتـم التعـاون الدولـي بالطرائـق التـي تعتبرهـا البلـدان المعنيـة أكثـر فعاليـة وملاءمـة، بمـا في ذلـك، في جملـة أمـور، البلـدان الحكوميـة وغيـر الحكوميـة؛ تجاريـة وغيـر تجاريـة؛ عالميـة أو متعـددة الأطـراف أو إقليميـة أو ثنائيـة؛ والتعـاون الدولـي بـين الـدول في جميـع مسـتويات التنميـة».

• الإجمـــــاع

تعمـل لجنـة الأمم المتحـدة لاسـتخدام الفضـاء الخارجـي في الأغـراض السـلمية ولجانهـا الفرعيـة العلميـة والتقنيـة والقانونيـة على أسـاس توافـق الآراء، أي أنـه يجـب على جميـع وفـود الـدول الأعضـاء الاتفـاق على أي مسـألة، سـواء كانـت لغـة معاهـدة قبـل أن يتـم إدراجهـا في الصيغـة النهائيـة مـن معاهـدة أو بنـود جديـدة في جـداول أعمـال اللجنـة/اللجنـة الفرعيـة.

أحد أسباب افتقار معاهدات الأمم المتحدة للفضاء إلى تعريفات وعدم وضوحها في جوانب أخرى، هو أنه من الأسهل التوصل إلى توافق في الآراء عندما تكون اللغة والمصطلحات غامضة. وفي السنوات الأخيرة، لم تتمكن اللجنة الفرعية القانونية من التوصل إلى توافق في الآراء بشأن مناقشة اتفاق شامل جديد بشأن الفضاء (ومع ذلك، لم تقترح فكرة هذا الاتفاق سوى عدد قليل من الدول الأعضاء).

ومن غير المرجح أيضًا أن تتمكن اللجنة الفرعية من الاتفاق على تعديل معاهدة الفضاء الخارجي في المستقبل المنظور. يبدو أن العديد من الدول التي ترتاد الفضاء تعتقد أن مناقشة اتفاقية جديدة للفضاء أو تعديل معاهدة الفضاء الخارجي ستكون عديمة الجدوى وتستغرق وقتًا طويلًا، لأن الخلافات الراسخة بشأن تخصيص الموارد، وحقوق الملكية، وغيرها من القضايا المتعلقة بالنشاط التجاري، تجعل التوصل إلى اتفاق أمرًا غير مرجح.

• القانـــون الوطنـــي

يشمل قانون الفضاء أيضًا القوانين الوطنية، وقد أصدرت العديد من البلدان تشريعات وطنية للفضاء في السنوات الأخيرة. تمنح معاهدة الفضاء الخارجي مسؤولية تنظيم الأنشطة الفضائية، بما في ذلك القطاعين الحكومي والخاص، إلى البلدان الفردية التي تجري فيها الأنشطة. إذا أطلق مواطن أو منظمة مؤسسة في بلد ما مركبة فضائية في بلد مختلف، تختلف التفسيرات حول ما إذا كان البلد الأصلي أو البلد المطلق يتمتع بالولاية القضائية.

تتضمن معاهدة الفضاء الخارجي أيضًا ميثاق الأمم المتحدة بالإشارة إليها، وتتطلب من الأطراف ضمان إجراء الأنشطة وفقًا لأشكال أخرى من القانون الدولي مثل القانون الدولي العرفي (أي أعراف الدول وممارساتها).

إن ظهـور الأنشـطة التجاريـة مثـل التعديـن الفضائـي، والسـياحة الفضائيـة، والاستكشـاف الخـاص، وتطويـر العديـد مـن الموانـئ الفضائيـة التجاريـة، يدفـع العديـد مـن البلـدان إلـى التفكيـر في كيفيـة تنظيـم الأنشـطة الفضائيـة الخاصـة. ويتمثـل التحـدي في تنظيـم هـذه الأنشـطة بطريقـة لا تعيـق الاسـتثمار أو تمنعـه، مـع ضمـان امتثـال الأنشـطة التجاريـة للقانـون الدولـي.

تشـعر الـدول الناميـة بالقلـق مـن أن الـدول التـي ترتـاد الفضـاء سـوف تحتكـر المـوارد الفضائيـة. إن الرشـاوي المدفوعـة للـدول الناميـة هـي أحـد الأسـباب وراء عـدم تصديـق الولايـات المتحـدة علـى اتفاقيـة الأمم المتحـدة لقانـون البحـار، ووراء معارضـة البعـض تطبيـق المبـادئ نفسـها علـى الفضـاء الخارجـي.

قامـت العديـد مـن الـدول بسـن أو تحديـث قانونهـا الوطنـي للفضـاء مؤخـرًا، علـى سـبيل المثـال، لوكسـمبورغ في عـام 2017، والولايـات المتحـدة في عـام 2015، واليابـان في عـام 2008. ونظـرًا لتوسـع مجـال أبحـاث الفضـاء والأنشـطة المرتبطـة بهـا في الهنـد، تم إنشـاء مشـروع الأنشـطة الفضائيـة وجـرى تقديـم مشـروع القانـون في عـام 2017.

• تعريف «الفضـــاء»

تطـرح أسـئلة كثيـرة حـول صعوبـة تعريـف مصطلـح «الفضـاء». لا يناقـش العلمـاء فقـط تعريفهـا الجغـرافي (أي الحـدود العليـا والدنيـا)، ولكـن أيضًـا مـا إذا كانـت تشـمل أيضًـا كائنـات مختلفـة داخلهـا أم لا (مثـل الأجـرام السـماوية والبشـر والأجهـزة التـي مـن صنـع الإنسـان). وتقـدر الحـدود الدنيـا عمومًـا بنحـو 50 كيلومتـرًا. تنشـأ المزيـد مـن الصعوبـات في محاولـة تحديـد الحـدود العليـا لـ «الفضـاء»، حيـث يتطلـب الأمـر مزيـدًا مـن البحـث في طبيعـة الكـون ودور الأرض كوكبًـا.

• أخلاقيـــات الفضـــاء

في قانـون الفضـاء، تمتـد الأخلاقيـات إلـى موضوعـات تتعلـق باستكشـاف الفضـاء، والسـياحة الفضائيـة، وملكيـة الفضـاء، وعسـكرة الفضـاء، وحمايـة البيئـة، وتمييـز حـدود الفضـاء نفسـه. في مـارس 2023، أعلنـت منظمـة For All Moonkind عـن تشـكيل معهـد قانـون وأخلاقيـات الفضـاء، وهـو «منظمـة جديـدة غيـر ربحيـة سـتذهب إلـى مـا هـو أبعـد مـن الدعـوة إلـى حمايـة مواقـع التـراث خـارج العالـم والتفكيـر في الأخلاقيـات المتعلقـة ببعـض الأنشـطة في الفضـاء التـي لـم يتـم تغطيتهـا بالكامـل في القانـون الدولـي الحالـي».

وقـد اقْتُـرِحَ أن حقـوق الإنسـان يجـب أن تكـون مصحوبـة في الفضـاء بمجموعـة من الحقـوق الأساسـية. وقـد اقتـرح مشـروع Jus Ad Astra الحقـوق الثلاثـة الأساسـية الجديـدة التاليـة: الحـق في المـاء، والحـق في جـو صالـح للتنفـس، والحـق في بيئـة صالحـة للسـكن.

لقـد كانـت مسـألة التمثيـل البشـري والمشـاركة في الفضـاء محـور اهتمـام قانـون الفضـاء الدولـي منـذ بدايـة استكشـاف الفضـاء. ومـع ذلـك، يـرى البعـض أن قانـون الفضـاء يحتـاج إلـى إعـادة تقييـم لضمـان أخـذ مسـاهمات وأهميـة البلـدان التـي ليـس لديهـا قـدرات كبيـرة في مجـال الطيـران الفضائـي في الاعتبـار، لا سـيما في ضـوء الاسـتعمار.

علـى الرغـم مـن إعـلان استكشـاف واسـتخدام الفضـاء الخارجـي باعتبـاره «إقليمًـا للبشـرية جمعـاء»، يـرى النقـاد أن تقاسـم الفضـاء للبشـرية جمعـاء لا يـزال يُنظـر إليـه علـى أنـه إمبريالـي وغيـر موجـود. عـلاوة علـى ذلـك، هنـاك مخـاوف مـن أن الأنظمـة السياسـية والقانونيـة الحاليـة وأسسـها الفلسـفية قـد تفضـل التطويـر الإمبريالـي للفضـاء.

تم انتقـاد اسـتعمار الفضـاء باعتبـاره اسـتمرارًا للإمبرياليـة والاسـتعمار في الأرض، ممـا أدى إلـى انتقـادات مـا بعـد الاسـتعمار لعمليـة صنـع القرار الاسـتعماري وأسـباب اسـتغلال العمالة والأراضي. هناك اعتراف متزايد بالحاجة إلى المشـاركة الشـاملة والديمقراطيـة في أي اسـتكشـاف للفضـاء، أو البنيـة التحتيـة، أو السـكن.

مـع أن معاهـدة الفضـاء الخارجـي تضمـن الوصـول إلـى الفضـاء، إلا أن قانـون الفضـاء واجـه انتقـادات لعـدم تأمـين الشـمولية الدوليـة والاجتماعيـة، وخاصـة فيمـا يتعلـق بالرحـلات الفضائيـة الخاصـة.

في المراحـل الأولـى مـن قانـون الفضـاء الدولـي، تم تأطيـر الفضـاء الخارجـي باعتبـاره «حقًـا مشـتركًا»، وليـس بوضـوح «أرضًـا مباحـة»، في ميثـاق الفضـاء الـذي قدمـه ويليـام أ. هايمـان في عـام 1966. وقـد أثـر هـذا المفهـوم منـذ ذلـك الحـين على عمـل لجنـة الأمم المتحـدة بشـأن الاسـتخدامات السـلمية للفضـاء الخارجـي.

دارت المناقشـات المبكـرة بشـأن أخلاقيـات الفضـاء حـول مـا إذا كان ينبغـي أن تكـون حـدود الفضـاء متاحـة للاسـتخدام أم لا، واكتسـبت أهميـة كبيـرة في وقـت سـباق الفضـاء في الاتحـاد السـوفيتي والولايـات المتحـدة. في عـام 1967، نصـت «معاهـدة الفضـاء الخارجـي» علـى السـماح لجميـع الـدول الملتزمـة باللوائـح الدوليـة باسـتغلال الفضـاء.

ونتيجـة لذلـك، فـإن الاسـتخدام التجـاري للفضـاء مفتـوح للاسـتغلال مـن قبـل الكيانـات العامـة والخاصـة، وخاصـة فيمـا يتعلـق بالتعديـن والسـياحة الفضائيـة. لقـد كان هـذا المبـدأ موضـع جـدل، خاصـة مـن قبـل أولئـك الذيـن يؤيـدون حمايـة البيئـة، والاسـتدامة، والمحافظـة عليهـا.

• استغلال الفضاء

وفي حين أن هذا المجال من القانون لا يزال في بداياته، فهو في عصر التغير والتطور السريع. يمكن القول إنَّ موارد الفضاء لا حصر لها. وإذا أصبح النقل الفضائي التجاري متاحا على نطاق واسع، مع انخفاض تكاليف الإطلاق بشكل كبير، فسوف تتمكن جميع البلدان من جني فوائد الموارد الفضائية بشكل مباشر.

وفي هذه الحالة، يبدو من المرجح أن التوصل إلى توافق في الآراء سيكون أسهل بكثير فيما يتعلق بالتنمية التجارية والاستيطان البشري في الفضاء الخارجي. التكاليف المرتفعة ليست العامل الوحيد الذي يحول دون الاستغلال الاقتصادي للفضاء: إذ يقال إنه ينبغي اعتبار الفضاء بيئة نقية تستحق الحماية والحفظ، وأن النظام القانوني للفضاء ينبغي أن يوفر المزيد من الحماية له من استخدامه كمورد للأغراض السلمية.

ويركز النقاش أيضًا على ما إذا كان ينبغي الاستمرار في تعريف الفضاء قانونيًا كجزء من «التراث المشترك للبشرية»، وبالتالي غير متاح للمطالبات الوطنية، أو ما إذا كان ينبغي تغيير تعريفه القانوني للسماح بالملكية الخاصة في الفضاء.

اعتبارًا من عام 2013، أثارت خطط ناسا لالتقاط كويكب بحلول عام 2021 تساؤلات حول كيفية تطبيق قانون الفضاء عمليًا.

في عام 2016، وضعت دولة لوكسمبورغ إطارًا قانونيًا رسميًا يضمن أن الشركات الخاصة العاملة في مجال التعدين في الفضاء لها حقوق في تلك الموارد.

• آلات الرحلات الفضائية واستعمار الفضاء

يمكن أن تكون هناك مخاطر معاناة في آلات الرحلات الفضائية واستعمار الكائنات الفضائية أو إمكانات الظواهر الاصطناعية (مثل الحياة الاصطناعية).

يؤدي التقدم في مجال الروبوتات والذكاء الاصطناعي إلى تآكل حاجة البشر إلى الفضاء، حيث غالبًا ما تكون المساعي البشرية أقل فعالية من حيث التكلفة من المهام الروبوتية، مع ما يترتب على ذلك من آثار أخلاقية على المجتمع.

علاوة على ذلك، فإن «سباق البليونيرات إلى الفضاء» أو الإعلان عن أن مصير البشرية يكمن في استعمار المجموعة الشمسية، تاركين وراءهم العديد من المشاكل الأرضية، قد تم انتقاده باعتباره «غطرسة تكنولوجية طوباوية [...]»، مما يشير إلى «اتفاق متعدد الأطراف للتحكم والحد من التوسع في الفضاء». قد تختلف القوانين ومتطلبات التكيف للبشر في الفضاء، وهو ما قد يكون أحد الأسباب المنطقية للبعثات الفضائية المأهولة – وليس الروبوتية.

علاوة على ذلك، فإن نشر النفوذ البشري إلى ما هو أبعد من الأرض يثير تساؤلات حول الذكاءات الأخرى المحتملة التي انتشرت عبر الفضاء الذي يمكن الوصول إليه. يمكن لأخلاقيات الفلك النظر في وجود أخلاق خارج كوكب الأرض، والتي قد تنعكس غالبًا في القوانين وفهم الإنسانية وأخلاقياتها المتعددة (والتي قد تنعكس غالبًا في القوانين والسياسات) كجزء من منظر الكون في عالم أكثر شمولية، وربما حتى «كونية».

• نظـــام الاتصـــــال

كانـت هنـاك بعـض المقترحـات كمـا هـو الحـال مـع ميثـاق الفضـاء العظيـم الـذي قدمـه ويليـام أ. هايمـان في عـام 1966 أو مـن خـلال مفهـوم ميتـالاو لإدخـال الأساسـيات القانونيـة في حالـة اكتشـاف أو اتصـال بالـذكاء الأصلـي خـارج كوكـب الأرض. اعتبـارًا مـن عـام 2018، لا توجـد مبـادئ أساسـية للتعامـل مـع اكتشـاف SETI المؤكـد الناجـح.

• حـــل النزاعـــات

يحـاول قانـون الفضـاء أيضًـا توفيـر إطـار لحـل النزاعـات في المسـائل التـي تنشـأ في الفضـاء. الآليـات التاليـة متاحـة لأنـواع مختلفـة مـن الأطـراف المتضـررة.

يمكـن للجهـات الفاعلـة التابعـة للدولـة أن تختـار رفـع قضيـة أمـام محكمـة العـدل الدوليـة بسـبب الانتهـاكات بموجـب اتفاقيـة المسـؤولية أو معاهـدة الفضـاء الخارجـي. ويمكـن أيضًـا تقـديم حجـج قويـة لانتهـاكات القانـون الدولـي العـرفي.

وبـدلاً مـن ذلـك، يمكـن للجهـات الفاعلـة الحكوميـة أيضًـا أن تحـاول حـل النزاعـات فيمـا بينهـا والتوصـل إلـى تسـوية عـن طريـق التفـاوض. كان هـذا هـو الحـال في حادثـة كوزمـوس 954 بـين الولايـات المتحـدة وكنـدا والاتحـاد السـوفييتي.

يتـم توجيـه الجهـات الفاعلـة مـن غيـر الـدول أولاً إلـى التواصـل مـع الدولـة الطـرف المناسـبة حيثمـا تكـون متورطـة وفقًـا لاتفاقيـة المسـؤولية. عندمـا يكـون النـزاع خاصًـا وتجاريًـا بطبيعتـه، تختـار العديـد مـن الشـركات الخاصـة اللجـوء إلـى التحكيـم.

حتى الآن، تم إجراء التحكيم في المقام الأول في إطار محكمة التحكيم الدائمة بموجب قواعد الأونسيترال للتحكيم لعام 1976 ولكن وجود محاكم أكثر تخصصًا «القواعد الاختيارية للتحكيم في المنازعات المتعلقة بأنشطة الفضاء الخارجي» قد تشهد تحولا في القانون الإجرائي الذي تختاره الأطراف في المستقبل.

• الفريق العامل المفتوح العضوية المعني بالتهديدات الفضائية

مع عدم إحراز تقدم في المفاوضات بشأن منع سباق التسلح في الفضاء الخارجي في عام 2020، تم التوقيع على قرار الأمم المتحدة «الحد من التهديدات الفضائية من خلال معايير وقواعد ومبادئ السلوك المسؤول». وفي وقت لاحق، تم إنشاء «الفريق العامل المفتوح العضوية المعني بالحد من التهديدات الفضائية باستخدام معايير وقواعد ومبادئ السلوك المسؤول، وقد وجد بعض الزخم خاصة منذ بدء الحرب في أوكرانيا في عام 2022.

يتم تسهيل التنسيق والتعاون الدوليين من خلال مجموعة التنسيق الدولية لاستكشاف الفضاء المشتركة بين الوكالات، والمخطط لها في المحطة الفضائية Lunar Gateway، لمحاكاة التعاون مع محطة الفضاء الدولية.

• فوائـــد استـكشـــاف الفضـــاء

مع اقتراب سباق الفضاء من نهايته، ظهر مبرر جديد للاستثمار في استكشاف الفضاء، مع التركيز على الاستخدام العملي له لتحسين الحياة على الأرض. ومع تحول مبرر لبرامج الفضاء التي تمولها الحكومة إلى «المصلحة العامة»، بدأت وكالات الفضاء في توضيح وقياس الفوائد الاجتماعية والاقتصادية الأوسع التي قد تجنيها من أنشطتها، بما في ذلك الفوائد المباشرة وغير المباشرة (أو الأقل وضوحًا) لاستكشاف الفضاء. ومع ذلك، فقد تم انتقاد مثل هذه البرامج أيضًا مع الإشارة إلى العديد من العيوب.

قامت وكالات الفضاء والحكومات والباحثون والمعلقون بعزل عدد كبير من الفوائد المباشرة وغير المباشرة لبرامج استكشاف الفضاء بما في ذلك:

- التقنيات الجديدة التي يمكن الاستفادة منها في الصناعات والمجتمعات الأخرى (مثل تطوير أقمار الاتصالات).
- تحسين المعرفة بالفضاء وأصل الكون.
- فوائد ثقافية.

في محاولة لقياس الفوائد المستمدة من استكشاف الفضاء، حسبت وكالة ناسا أنه تم إنقاذ حياة 444000 شخص، وتم إنشاء 14000 وظيفة، وتم توليد إيرادات بقيمة 5 بليونات دولار، وكان هناك تخفيضات في التكاليف بقيمة 6.2 بليون دولار بسبب البرامج العرضية من أبحاث ناسا.

تذكر ناسا أنه من بين العديد من التقنيات العرضية التي خرجت من برنامج استكشاف الفضاء، كانت هناك تطورات ملحوظة في مجالات الصحة والطب والنقل والسلامة العامة والسلع الاستهلاكية والطاقة والبيئة وتكنولوجيا

المعلومـات والصناعـة. إن الألـواح الشمسـية، وأنظمـة تنقيـة الميـاه، والتركيبـات الغذائيـة والمكمـلات الغذائيـة، والابتـكار في علـوم المـواد، وأنظمـة البحـث والإنقـاذ العالميـة، هـي بعـض الطرائـق التـي انتشـرت بهـا هـذه التقنيـات في الحيـاة اليوميـة.

تحمي تقنية أوريون غواصي أعماق البحار. لقد نجحت مركبة أوريون Orion Spacecraft الفضائية الجديدة التابعة لوكالة ناسا في إخراجها من منصة الإطلاق لرحلة تجريبية، ولكنها أطلقت بالفعل عددًا من التقنيات المنبثقة. قامت الشركة التي تقف وراء جهاز دعم الحياة أوريون Orion's Life Support بتكييف الأنظمة نفسها للاستخدام من قبل الغواصين الذين يعملون في بيئات شديدة الخطورة، مثل الانسكابات السامة.

بحلول عام 2012، فُهِرس فعليًا ما يقرب من 1800 منتج ثانوي مختلف تابع لوكالة ناسا، وهذا مجرد غيض من فيض. لقد ألهمت وكالة ناسا العلماء والمهندسين والمفكرين والمخترعين ورجال الأعمال، وتسهم ابتكاراتها وتطوراتها العلمية في قاعدة متنامية من المعرفة البشرية التي ستشكل منصة للتقدم الذي لا يمكننا حتى أن نحلم به اليوم. قد تكون وكالة ناسا مكلفة جدًا، ولكن في عام 1974، أوضح العالم وكاتب الخيال العلمي، إسحاق أسيموف، الجوهر الأساسي للحجة «إذا رفضنا اتخاذ هذه الخطوات لأننا لا نرى ما يخبئه المستقبل، فنحن نؤكد عدم وجوده».

يعدّ استكشاف الفضاء أمرًا مكلفًا. بدأ الاتحاد السوفيتي سباق الفضاء في عام 1957 عندما وضع أول قمر صناعي على الإطلاق في المدار: وفقًا لمؤرخي ناسا، تسبب سبوتنيك – 1 وهو بحجم كرة الشاطئ في «أزمة واسعة النطاق». وقد أخافت فكرة التخلف عن التكنولوجيا في منتصف الحرب الباردة الرأي العام الأمريكي، واستجابت الحكومة الأمريكية باستثمارات ضخمة. بحلول نهاية عام 1958، تشكّلت وكالة ناسا. وعلى مدى العقد التالي، ضخت الحكومة أكثر من 25 بليون دولار في برنامج الفضاء لضمان أن يكون أول رجل على سطح القمر أمريكيًا، وفي العقود اللاحقة، أُنفقت مئات البلايين من الدولارات لدفع حدود العلم والتكنولوجيا.

وقد فاز هذا الاستثمار الهائل لأمريكا بسباق الفضاء Space Race، وغيّر فهمنا عن الكون تمامًا، ولكن مع تشغيل وكالة ناسا حاليًا بميزانية تبلغ نحو 18 بليون دولار سنويًا، يُقدر أنها أنفقت ما لا يقل عن 500 بليون دولار في الستين سنة الماضية، ماذا يعني ذلك للناس العوام؟ ماذا فعلت ناسا لنا؟

ستشمل الإجابات الواضحة كلاً من: الأقمار الصناعية ومراقبة الطقس والاتصالات والملاحة والسفر بالطائرة، ولكن حتى بعثات أبولو وبرنامج مكوك

الفضاء واستكشاف المريخ أفاد عامة الناس. عندما تشكلت وكالة ناسا، تضمن جزء من شروط تمويلها مطلبًا لمشاركة التطورات الجديدة مع الصناعة، وخلف عمليات الإطلاق الدراماتيكية والصور المذهلة، كانت منتجات ناسا المنبثقة تستخدم تكنولوجيا الفضاء وتكييفها لحل المشكلات اليومية. من أبرزها رغوة الذاكرة، التي طُوّرت في مركز أبحاث أميس عام 1966 لحماية طياري الطائرات والركاب في حالة وقوع حادث. وهو حاليًا عنصر منزلي، يستخدم في الخوذ الرياضية والملابس الواقية والمراتب الراقية والأطراف الصناعية. لكن كان هناك آلاف الاختراعات الأخرى.

وقدمت بعثات ميركوري Mercury Missions، التي أخذت رواد فضاء أمريكيين إلى مدار حول الأرض لأول مرة، ابتكارات في التخلص من النفايات. أما بعثات جميني Gemini Missions، التي طورت التكنولوجيا اللازمة لإرسال بعثات للقمر Moonshot، فقد ألهمت صنع طلاء مضاد للوهج لشاشات التلفزيون وشاشات الحاسوب وألهمت صنع، ومعدات لقياس مستويات الأكسجين وثاني أكسيد الكربون لدى المريض، والتقدم في تقنيات استخراج النفط. وقد ولّد برنامج أبولو نفسه عشرات الأفكار الجديدة. كُيّفت تقنية التدريع الحراري المستخدمة لحماية مركبة الفضاء أبولو لتطوير طلاءات ورغوة لحماية الطائرات، واستخدمت لاحقًا لإنشاء طبقات من العزل داخل المباني العامة.

تعمل المواد على إبطاء معدل أضرار الحرائق، مما يتيح للناس مزيدًا من الوقت للخروج قبل انهيار المباني.

اسْتخدم برنامج معالجة الصور الرقمية الذي طُوِّرَ للسماح لرواد فضاء أبولو بالهبوط بأمان على القمر لاحقًا كأساس للأقمار الصناعية الأولى لاندسات. تلتقط هذه السلسلة من الأقمار الصناعية معًا صورًا للأرض لأكثر من 30

عامًا، وتتبع التغييرات في المناظر الطبيعية والبيئة والغلاف الجوي. وفي الآونة الأخيرة، سهّل الوصول إلى الصور عبر برنامج غوغل إيرث Google Earth.

اشتهرت أيضًا تقنية معالجة الصور الرقمية أبولو في ماسحات التصوير بالرنين المغناطيسي، مع أنّ وكالة ناسا لا علاقة لها باختراع المعدات الطبية نفسها. كما انتقلت تقنيات التجفيف بالتجميد المستخدمة للحفاظ على طعام الفضاء إلى الصناعة، وكذلك تكنولوجيا تنقية المياه. والمواد التي طُوِّرَت لحماية رواد فضاء أبولو في الفضاء وعلى سطح القمر وجدت طريقها أيضًا إلى الحياة اليومية.

صُنعت الأحذية الرياضية باستخدام التقنيات المستخدمة في أحذية الفضاء، واستخدمت الألياف الزجاجية خفيفة الوزن والمقاومة للرطوبة المصممة للاستخدام في بدلات الفضاء لبناء أول غطاء قابل للسحب في ملعب كرة القدم الوطني (NFL). وعلى الرغم من قوة الغطاء، إلا أنه يسمح بمرور ضوء كافٍ للوصول إلى العشب في الأسفل. كما كُيّفَت أنظمة دعم الحياة في أبولو لتكون الأساس في صنع أجهزة التنفس الخاصة بحماية رجال الإطفاء من استنشاق الدخان، وكُيّفَت أنظمة تبريد البدلة، المصممة لجعل رواد الفضاء أكثر راحة، لخدمة أقسام الطوارئ الطبية، وجهات طبية أخرى.

حتى برنامج الحاسوب المصمم لتوفير الطاقة لأداة حفر القمر المحمولة وجد طريقه إلى الأرض، واستخدم لاحقًا لإنشاء المكنسة الكهربائية اللاسلكية الشهيرة في الثمانينات، مكنسة شفط الغبار بلاك اند ديكر Black and Decker Dustbuster. بعد موجة الابتكار هذه، أنشأت وكالة ناسا سكايلاب Skylab في السبعينات، كانت سكايلاب أول محطة فضائية أمريكية. مما سمح بإجراء تجارب كثيرة وهي في مدار حول الأرض.

تضمنت الابتكارات التي أطلقتها سكايلاب تقنيات جديدة لمساعدة الأطفال حديثي الولادة على التنفس، وسخانات المياه بالطاقة الشمسية المحوسبة، وعلامات التشغيل الذاتي التي تتوهج دون الحاجة إلى الكهرباء. تُستخدم هذه العلامات ذاتية التشغيل حاليًا لإضاءة الطرق في حالات الطوارئ.

انتهى سباق الفضاء في عام 1975 عندما تعاونت الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي لربط وحدة قيادة ناسا أبولو بمركبة سوفيتية هي Soyuz 7K-TM. تباطأ الاستثمار، لكنه كان يمثل حقبة جديدة في استكشاف الفضاء الدولي، واستمرت الابتكارات في التدفق. ومنذ عام 1976، تتابع وكالة ناسا نشر أفضل الابتكارات في مجلة تُعرف باسم سبيناوف Spinoff.

بدأت بعثات المكوك الفضائي في عام 1981، وتطلبت استثمارًا ماليًا ضخمًا آخر. كلف إطلاق مكوك فضائي واحد في المتوسط 450 مليون دولار، وكل رحلة من 130 رحلة أو نحو ذلك كانت وكالة الفضاء تعيد نحو 1.5 بليون دولار.

مع كل هذا الإنفاق، جاءت موجة أخرى من الابتكار، ووفقًا لوكالة ناسا، أكثر من 100 فرع تكنولوجي. إذ طُوِّرَت أقنعة لرواد الفضاء في برنامج مكوك الفضاء مستوحاة من نظارات القراءة المقاومة للخدش، وكُيّف نظام التنقية القائم على اليود المصمم لإعادة تدوير المياه لاستخدامه في جهود الإغاثة في حالات الكوارث. وكُيّفت لوحات الثنائي الضوئي LED المصممة لزراعة النباتات على متن المكوكات للاستخدامات الطبية، وحاليًا استخدمت تقنية امتصاص صدمات المكوك الفضائي لحماية المباني من الزلازل، ويمكن لتقنية التصوير المطورة لقياس الأضرار السطحية على المكوكات التقاط صور الجريمة وتحليلها أو ما يسمى بدليل المشهد.

في الوقت نفسه، كانت مشروعات ناسا الأخرى تحدث فرقًا في العالم الأوسع. في عام 1985، كُيّفت الأسطح المحززة التي طورتها وكالة ناسا لتقليل الانزلاق على المدارج للاستخدام على الدرجات وفي مواقف السيارات لحماية المشاة في الأماكن الرطبة. وفي وقت لاحق من العقد نفسه، أعيد استخدام التكنولوجيا التي استخدمتها أقمار ناسا لدراسة طبقة الأوزون لإنتاج ليزر قادر على تكسير الانسدادات في الشرايين البشرية.

في عام 1990، أطلقت ناسا مهمة رئيسة أخرى: تلسكوب هابل الفضائي بتكلفة 2.5 بليون دولار. كان فيه خطأ غير ملحوظ في أدواته البصرية وتطلب إصلاحًا بطوليًا (ومكلفًا) للعمل بشكل صحيح، ولكن منذ ذلك الحين عوض أكثر من تكلفته.

لم يقتصر الأمر على توفير هابل نافذة رائعة على المجرة، فقد ألهمت تقنياته البصرية والتصوير المتقدمة صناعات أخرى، كما في تقنيات الجراحة المجهرية المحسنة وخزعات الورم، والتقدم في تصنيع أشباه الموصلات.

أُلحقَ تلسكوب هابل الفضائي في عام 1993 بأحد أكبر المساهمين في التقدم العلمي والتكنولوجي في الفضاء، إنها محطة الفضاء الدولية. لقد شُغّلَ هذا المختبر الذي يدور بشكل دائم من قبل فرق من رواد الفضاء الروس والأمريكان منذ عام 2000، وعلى مدار حياتها، كلف فاتورة تزيد عن 100 بليون دولار، مع أن ناسا مسؤولة جزئيًا فقط.

تسمح بيئة الجاذبية الصغرى في محطة الفضاء بإجراء تجارب فريدة، وقد جمعت البيانات في عدد كبير من المجالات، من علم المواد إلى علم الأحياء إلى الروبوتات. اختبرت الموصلات الفائقة والمواد النانوية في المحطة، ودرست النباتات والحيوانات، كما رُقِبَ جسم الإنسان. بفضل محطة الفضاء الدولية، يتوفر حاليًا ذراع آلية يمكنها إجراء عملية جراحية داخل ماسح التصوير

بالرنين المغناطيسي، وطريقة جديدة لتوصيل الأدوية المضادة للسرطان، وحتى بعض مضارب الغولف.

التكنولوجيا المستخدمة لبناء المحطة نفسها، والمعدات الموجودة على متنها، كان لها فوائدها على الأرض. من ذلك استخدام برنامج التصوير المصمم لمساعدة الروبوتات في تجميع محطة الفضاء لتحليل الأضرار التي لحقت بدمى اختبار التصادم، في تحسين السلامة في السيارات، واستخدام أنظمة تحذير محمولة مصممة لاكتشاف الضغط المنخفض في أجزاء من المحطة لمراقبة ضغط المقصورة على الطائرات.

مرة أخرى على الأرض، واصلت ناسا ريادتها البحثية في مجالات أخرى. كان التركيز الرئيسي على مدار تاريخها هو فهم التلوث وتطوير غرف نظيفة لتجميع المركبات الفضائية. منذ ذلك الحين وجدت هذه الابتكارات طريقها إلى الطب والتصنيع والصناعة.

تُستخدم حاليًا تقنية ناسا التي طُوّرت لقياس تدفق الهواء في أنفاق الرياح لمراقبة الانبعاثات الملوثة من المداخن الصناعية، وتستخدم حاليًا الألياف الضوئية المتغيرة الألوان والمصممة لاكتشاف المواد الكيميائية الخطرة على الطائرات والمركبات الفضائية، كنظام تحذير للحوادث الصناعية أو الحرب الكيميائية.

لقد استخدمَ نظام GPS الدقيق المصمم لاختبار نظرية النسبية لأينشتاين لقيادة الجرارات التي يُتحكّم فيها عن بُعد، واستخدمت أجهزة الحاسوب العملاقة المستخدمة عادةً لتحليل تدفق الوقود في محركات الصواريخ لتصميم جهاز يمكنه الحفاظ على تدفق الدم عبر الجسم أثناء انتظار المريض لعملية الزرع. حتى وقود الصواريخ الزائد وجد فائدة، مما وفر الأساس لـ «جهاز مشعل إزالة الألغام»، الذي يدمر الألغام الأرضية عن طريق حرق المتفجرات بداخلها.

المركبات المستوحاة من المريخ تستكشف مناطق الحرب. لقد طُوّرَ PackBot Tactical Mobile Robot بواسطة مهندسي شركة iRobot Inc واستوحي من النموذج الأولي لمركبة المريخ. وهي ترافق القوات الأمريكية في العراق وأفغانستان، باستخدام مسارات لتسلق التضاريس الوعرة. لديها زوج من الزعانف التي تسمح لها بصعود السلالم وقلب نفسها إذا طُرقت في ساحة المعركة.

حققت وكالة ناسا تطورات تكنولوجية كبيرة كان لها تأثير حقيقي على الحياة اليومية للناس في جميع أنحاء العالم. إنها تواصل دفع حدود الإنجازات البشرية، بما في ذلك البعثات الرائدة الطموحة والمكلفة لاستكشاف جارنا المريخ الذي يحتمل أن يكون صالحًا للسكن.

كلفت بعثة مارس باثفايندر Mars Pathfinder عام 1997 جنبًا إلى جنب مع المركبة كوريوستي Curiosity 2011 وكالة الفضاء الأمريكية بلايين الدولارات، لكن التقدم العلمي والتكنولوجي الذي أُحرِز على طول الطريق كان ضخمًا، ولم يتوقف هنا.

إنّ التكنولوجيا المستخدمة في نسج مظلات باثفايندر القوية استخدمت لصنع سترات مقاومة للطعن والصدمات، وكيّفت مركبات المريخ الجوالة نفسها لإنشاء روبوتات استطلاع للبحث عن الأجهزة المتفجرة في مناطق الحرب. يمكن لهذه المركبات العسكرية أن تتسلق منحدرات شديدة الانحدار، وتعمل تحت الماء، بل وتتنقل عبر السلالم.

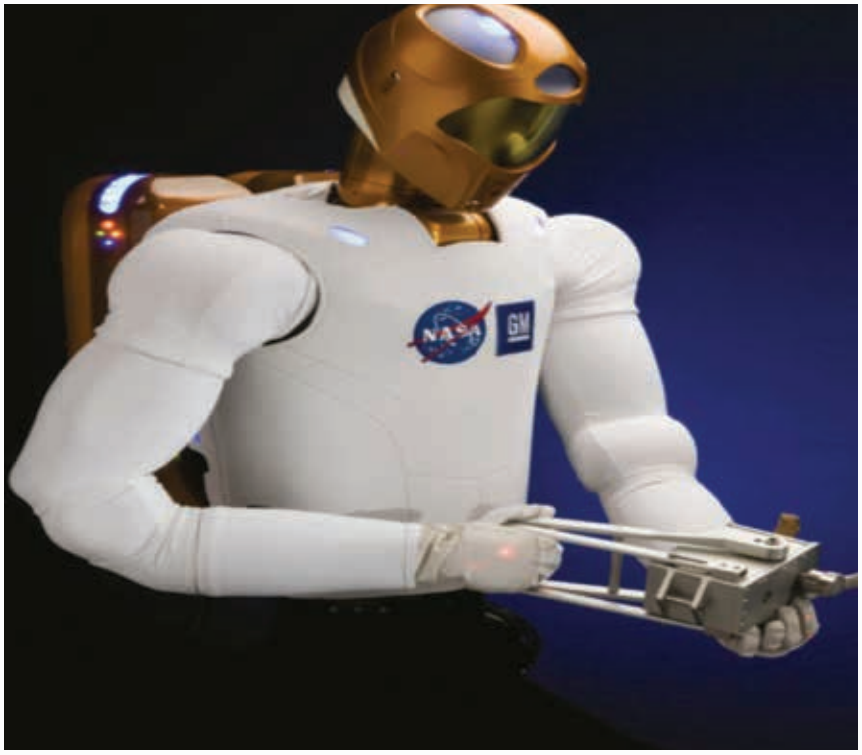
كذلك فقد كُيّفت التكنولوجيا المصممة للبحث عن الماء على المريخ للاستخدام على متن الطائرات، مما يسمح لها باكتشاف الماء في الهواء للتنبؤ بالطقس، وتُستخدم التكنولوجيا المطوّرة للبحث عن الحياة على المريخ لرصد التهديدات البيولوجية.

تُستخدم محللات المعادن في المستحضرات الصيدلانية والطب الشرعي، وتُكّيف التقنيات المستخدمة لتطوير طرق جديدة لزراعة النباتات في الفضاء وعلى كوكب المريخ لاستخدامها في تجارب بيولوجية أخرى، مثل تطوير الأدوية. كشفت مركبات المريخ الجوالة عن كوكب يمكن أن يكون صالحًا للسكنى من قبل البشر، ويمكن أن يكون موطنًا للحياة خارج كوكب الأرض. والتقنية التي تُحضّر للمراحل التالية من الاستكشافات التي يجري تحضيرها بالفعل سيكون لها استخدامات مهمة على الأرض.

بشكل عام يمكننا تلمس فوائد استكشاف الفضاء فيما يأتي:

❖ الروبوتـــات المتقدمة والذكـــاء الاصطناعـــي

الفضـاء وكل شـيء خـارج الغـلاف الجـوي لـلأرض بيئـة قاسـية. الروبوتـات والـذكاء الاصطناعـي هـي آليـات الاستكشـاف لدينـا، وأفضـل العقـول تعمـل دائمًـا علـى تطويـر التكنولوجيـا التـي تسـمح لنـا بالتجـول علـى سـطح المريـخ ومـا وراءه. وتنتشـر هـذه التقنيـات نفسـها لاسـتخدامها علـى الكوكـب الثالـث أيضًـا، بـدءًا مـن دعـم تنقـل الأشـخاص ذوي الإعاقـة إلـى المسـاعدة في جهـود البحـث والإنقـاذ.



يمكـن لروبوتـات محطـة الفضـاء أن تصنـع السـيارات. تعمـل ناسـا مـع جنـرال موتـورز علـى تطويـر Robonaut 2 (R2): أحـد أفـراد طاقـم محطـة الفضـاء الدوليـة الروبوتيـة. لقـد صُمّـم ليكـون قادرًا علـى العمـل بأمـان جنبًـا إلـى جنـب مـع النـاس في الفضـاء وعلـى الأرض. لا يقتصـر الأمـر علـى اسـتخدامات التكنولوجيـا علـى الأرض في تصنيـع أكثـر أمانًـا، ولكـن يمكـن أن يكـون للمنتجـات المرتبطـة بهـا، مثـل الهيـاكل الخارجيـة والقفـازات، اسـتخدامات طبيـة.

❖ طعـام أكثر أمانـًا

كان التحـدي المتمثـل في توفيـر طعـام آمـن وخـالٍ مـن الملوثـات لـرواد الفضـاء بمثابـة مهمـة ضخمـة أدت إلـى بعـض الأسـاليب غيـر التقليديـة إلـى حـد مـا (الآيس كريم الفضائـي لا يحقـق الشـيء نفسـه تمامًـا). إن مفهـوم تحليـل المخاطـر ونقطـة التحكـم الحرجـة الـذي طورتـه شـركة بيلسـبري لوكالـة ناسـا للقضـاء علـى التلـوث بالكائنـات الحيـة الدقيقـة علـى متـن المركبـات الفضائيـة يسـتخدم الآن مـن قبـل إدارة الغـذاء والـدواء الأمريكيـة لضمـان سـلامة الأطعمـة التـي يتـم شـراؤها مـن المتاجـر.

❖ ميـــاه أنظـــف

واحـدة مـن أهـم المسـاهمات التي قدمها استكشـاف الفضـاء لكوكب الأرض تأتي في شـكل سـائل. إن الحاجـة إلـى تصفيـة الميـاه بشـكل صحيـح لـرواد الفضـاء دفعـت وكالـة ناسـا إلـى تطويـر طريقـة لتصفيـة الميـاه بطريقـة بسـيطة ومحمولـة بكفـاءة. ونتيجـة لذلـك، تم تصميـم أنظمـة تنقيـة الميـاه غيـر المكلفـة وسـهلة الاسـتخدام حـول العالـم لتوفيـر ميـاه الشـرب النظيفـة أو زراعـة المحاصيـل في التربـة القاحلـة.

❖ التخلـــص من الكويكبـــات

الكويكبـات المرتبطـة بـالأرض ليسـت شـيئًا يسـتهان بـه؛ كحـال انقـراض كثيـر مـن مخلوقـات مـا قبـل التاريـخ. والحقيقـة هـي أن اصطـدام الأرض بـأي نيـزك يزيـد قطـره عـن 100 متـر مـن شـأنه أن يسـبب كارثـة مروعـة. قـد يكـون النشـاط الفضائـي اليقـظ والتكنولوجيـا الحاليـة لمراقبـة التفجيـرات النوويـة التـي تقودهـا المركبـات الفضائيـة كافيـين لمنـع البشـرية مـن مواجهـة المصيـر نفسـه الـذي واجهتـه المخلوقـات العملاقـة المنقرضـة.

❖ الابتكـــار الطبـــي

على متن محطة الفضاء الدولية، تمكن رواد الفضاء من تجربة وصقل الابتكارات الطبية التي أحدثت تحولًا في الرعاية الصحية على الأرض. من علاجات السرطان المنقذة للحياة إلى الجراحة الروبوتية الدقيقة التي يتم إجراؤها داخل جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي، فإن مستقبل الطب المتقدم يحدث بالتزامن مع استكشاف الفضاء.

❖ مصـــادر المـــواد الخـــام المهمـــة

نحن نعلم بالفعل أن النيازك تنقل معادن وعناصر نادرة وغير مسبوقة إلى الأرض أو تترك غبارًا من الذهب عبر مساراتها. ولكن يمكن العثور على عناصر أرضية نادرة أخرى بالقرب من القمر. على سبيل المثال، يُستخدم الهيليوم3- في بعض أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي المحددة، وهو وقود محتمل لمحطات الطاقة النووية. مثل اليوروبيوم والتنتالوم، يتم استخدام عناصر أخرى في الإلكترونيات المتقدمة والألواح الشمسية.

❖ مكافحـــة تغـــير المنـــاخ

أحد التحديات الأساسية للسفر إلى الفضاء هو التخلص من ثاني أكسيد في المركبات والمحطات الفضائية والبؤر الاستيطانية الكوكبية. بينما تعمل العقول القوية على تنقية الهواء على متن المركبات الفضائية، فإننا نتعلم المزيد حول كيفية تقليل وجود المركب الضار نفسه في بيئتنا. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للأقمار الصناعية التي تدور حول كوكبنا أن توفر بيانات دقيقة تساعدنا على فهم تغير المناخ والتخفيف من آثاره.

❖ الســـلام العـــالمي

استضافت محطة الفضاء الدولية رواد فضاء ومركبات فضائية من ثماني عشرة دولة خلال فترة وجودها في المدار. قد يكون استكشاف الفضاء هو المفتاح للتعاون الدولي، وإقامة قدر أكبر من الثقة وعلاقات دبلوماسية أقوى بين البلدان البعيدة. وفي الآونة الأخيرة، تعرض هذا التعاون الدولي للتوتر بسبب الصراع في أوكرانيا، ولكن حتى الآن بقيت هذه العلاقات متوترة ولم تنقطع، وهناك أسباب تدعو إلى الأمل في أن تستمر الشراكة الدولية في الصمود والإلهام.

❖ إشـــباع الفضـــول البشـــري

البشر مخلوقات فضولية بطبيعتها، ورغبتنا في الاستكشاف والتعلم تميزنا عن الأنواع الحية الأخرى على الأرض. يرسم استكشاف الفضاء صورة ثاقبة لمكاننا الصغير في الكون ويعطينا لمحة من السحر الذي لا يمكن تفسيره. مع كل مجرة جديدة يتم اكتشافها وكل ثقب أسود يتم اكتشافه، يُشبع فضولنا البشري ويدفعنا إلى التساؤل، هل هناك حياة أخرى في الكون؟

❖ إلهـــام أجيـــال المســـتقبل

مع انضمام أصغر شخص يطير إلى الفضاء على الإطلاق إلى مهمة SpaceX، رأى الأطفال في جميع أنحاء العالم فجأة حلمًا مستحيلًا يتحول إلى حقيقة. لم يعد السفر إلى الفضاء مجرد خيال علمي أو يقتصر على القلة المحظوظة فقط. ولأول مرة في تاريخ البشرية، يمكن للأطفال رؤية إمكانية تجربة الفضاء، وتشجيع تعليم العلوم والمهن التي من شأنها بناء قدرة عالمية على الابتكار المذهل.

❖ خلق وظائف في العلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات

توظف ناسا أكثر من 18000 شخص. وتوظف شركة SpaceX أكثر من 12000. وهذا لا يشمل المقاولين الخارجيين الذين تتضاعف هذه الأرقام معهم على الأقل. الكثير من هذه الوظائف مخصصة للمهندسين، ومحللي البيانات، وعلماء الرياضيات، والفيزيائيين، وعلماء الفلك، والأطباء، وعلماء الأحياء، والجيولوجيين، وما إلى ذلك.

يعد استكشاف الفضاء أحد الصناعات التي تتطلب أكبر نسبة من وظائف العلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات. تتطلب هذه الوظائف أشخاصًا مؤهلين تأهيلًا عاليًا لشغلها، ولكنها أيضًا من الوظائف الأعلى أجرًا في السوق. متوسط أجر وظيفة STEM للمبتدئين يبلغ نحو 26 % أعلى من المجالات غير المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات لخريجي الجامعات.

❖ التعديـــن في الفضـــاء

يوجد في الفضاء العديد من الموارد القيمة بكميات كبيرة وهي نادرة على الأرض. على سبيل المثال، تشير التقديرات إلى أن الكويكب Pysche 16 يحوي على ما يزيد عن 700 كوينتيليون دولار من الذهب. يكفي لإعطاء كل إنسان على وجه الأرض أكثر من 100 بليون دولار. وهذا ليس حتى قريبًا من كونه الشيء الأكثر قيمة. يتوقع الاقتصاديون أن صناعة التعدين الفضائية ستخلق أول تريليونير. لكن الفائدة الحقيقية لتقدم البشرية قد تأتي من مادة غير محتملة إلى حد كبير إنها الماء.

إن تعلم كيفية التقاط الكويكبات المليئة بالجليد وتحطيمها بأمان، يمكن أن يساعدنا في حل أحد أكبر تحديات سكن الكواكب ألا وهو نقص الماء السائل.

❖ صناعـــة الســـياحة الفضائيـــة

أكبـر حلـم لـدى البعـض منـا هـو أن يتمكـن مـن القيـام برحلـة إلـى الفضـاء الخارجـي. إنهـا الوجهـة النهائيـة. لسـوء الحـظ، لا يسـتطيع الكثيـر مـن النـاس أن يصبحـوا رواد فضـاء، ممـا يتعـين علـى البقيـة منـا الانتظـار حتـى تتطـور صناعـة السـياحة الفضائيـة أكثـر قليـلاً. فـلا يـزال الذهـاب إلـى الفضـاء مكلفًـا جـدًا.

في عـام 2021، تم بيـع رحلـة في إحـدى الرحـلات الأولـى التـي تقدمهـا شـركة Blue Origin، شـركة الفضـاء التـي أنشـأها جيـف بيـزوس، بالمـزاد العلنـي. دفـع الفائـز 28 مليـون دولار مقابـل امتيـاز أن يكـون مـن أوائـل سـائحي الفضـاء.

ومـع تحسـن الصواريـخ القابلـة لإعـادة الاسـتخدام، سـتصبح تكاليـف هـذه الرحـلات أقـل بكثيـر. نأمـل يومًـا مـا أن تكـون في متنـاول أيدينـا جميعًـا.

سـتخلق صناعـة السـياحة الفضائيـة بـلا شـك عشـرات الآلاف مـن فـرص العمـل. مـن وكلاء السـفر إلـى الطيارين، إلـى وظائـف التصنيـع في المصانـع التـي تصنـع الصواريـخ.

❖ تعلـــم المزيـــد عن جســـم الإنســـان

لقـد سـاعدتنا دراسـة تأثيـرات السـفر إلـى الفضـاء علـى فهـم جسـم الإنسـان بشـكل أفضـل. علـى سـبيل المثـال، أدى تحليـل تأثيـرات الجاذبيـة الصفريـة علـى الـدورة الدمويـة إلـى العديـد مـن الاكتشـافات حـول كيفيـة شـيخوخة الشـرايين وكيفيـة الوقايـة مـن بعـض أنـواع قصـور القلـب.

سـاعدت تجـارب وقياسـات قـوة العظـام وفقـدان العظـام لـدى رواد الفضـاء الأطبـاء علـى فهـم هشاشـة العظـام وأمـراض العظـام الأخـرى بشـكل أفضـل.

تمتـد الفوائـد الطبيـة لاستكشـاف الفضـاء إلـى كل منطقـة مـن جسـم الإنسـان تقريبًـا. مـن فسـيولوجيا العضـلات إلـى الصحـة العقليـة.

❖ تحسين المساعدة الطبية في المناطق النائية

أحد أكبر تحديات السفر إلى الفضاء هو حل المشكلات عندما لا تتمكن من إرسال أي معدات جديدة أو خبراء أو أي مساعدة أخرى. يجب عليك إصلاح الأمور بكل ما هو متاح على السفينة.

إذن ماذا يحدث عندما تكون هناك حالة طبية طارئة على متن سفينة فضائية؟

دفع هذا السؤال الأطباء والمهندسين إلى تطوير الأدوات والآلات التي يمكنها تنفيذ الإجراءات الطبية والتشخيص عن بعد.

ولهذه التقنية نفسها العديد من التطبيقات على الأرض أيضًا. فهو يسمح للأطباء بمساعدة المرضى الموجودين في المناطق الريفية النائية أو القرى التي يصعب الوصول إليها.

كل هذه المعرفة التي تم جمعها أسفرت عن العديد من التطورات في الإجراءات الطبية. بعض الأمثلة على التطورات الطبية التي تم إنشاؤها بفضل استكشاف الفضاء هي:

- مضخات القلب.
- أجهزة تنظيم ضربات القلب القابلة للبرمجة.
- قسطرة من الألياف الضوئية لإجراء رأب الأوعية الدموية بالليزر.
- خزعة الثدي بالتصوير الرقمي للكشف عن سرطان الثدي.
- أجهزة إرسال مراقبة الجنين.
- بدلات تبريد لخفض درجة حرارة الشخص.

يتتبع موقع ناسا الفرعي بعض التطورات في مجال الصحة والطب التي أصبحت ممكنة بفضل استكشاف الفضاء.

❖ تطويـــر تقنيات جديـــدة

يعد سباق الفضاء أحد العصور التي ولدت معظم التطورات التكنولوجية في أقصر فترة زمنية. وربما تكون في المرتبة الثالثة بعد الحربين العالميتين. على مر السنين، وجدت الشركات استخدامات استهلاكية للعديد من هذه التطورات. وحتى يومنا هذا ما نزال نستخدمها في حياتنا اليومية دون أن نعرف حتى أن بعض مهندسي ناسا قاموا بتطويرها في الأصل لبرنامج أبولو الذي أخذ البشرية إلى القمر.

قد يكون من المستحيل إدراج جميع التقنيات المستمدة من استكشاف الفضاء، ولكن فيما يلي بعض الأمثلة البارزة.

- طعام محكم الغلق بالفراغ.
- نعل حذاء رياضي ماص للصدمات. هذا صحيح، نعال الجري المريحة تم تطويرها في الأصل لبدلات رواد الفضاء.
- المواد المقاومة للحريق المستخدمة في لباس رجال الإطفاء.
- تكنولوجيا مقاومة الزلازل المستخدمة في الجسور والمباني لمقاومة الزلازل.
- بطانيات طاردة للحرارة. هناك سبب لتعريفها أيضًا باسم «بطانيات الفضاء». حقيقة ماتعة، يمكن أيضًا مضاعفة استخدامها أغطية للتلسكوب.
- المعينات السمعية القابلة لإعادة الشحن.
- الملاحة بدون طيار ذاتية القيادة.
- المكانس الكهربائية الحديثة.
- العدسات المستخدمة في «كاميرات الحركة».
- تكنولوجيا تنقية المياه.

كما نرى، من المهم بالنسبة لنا أن نستمر في دفع حدود استكشاف الفضاء. من يدري أي نوع من التقنيات الجديدة يمكن تطويرها والتي ستجعل حياتنا أسهل في المستقبل.

تعمل ماصات صدمات المكوك الفضائي على حماية المباني من الزلازل. لقد شكلت ماصات الصدمات المصممة للاستخدام أثناء إطلاق مهمات المكوك الفضائي التابعة لوكالة ناسا الأساس للتقنية التي تحمي حاليًا أكثر من 500 مبنى في المناطق المعرضة للزلازل في جميع أنحاء العالم. تحوي ممتصات الصدمات، المعروفة باسم 'المخمدات السائلة fluidic dampers'، على زيت لامتصاص الصدمات.

❖ حمايـــة الأرض

ليس لدينا سوى كوكب واحد يمكننا أن نعيش فيه دون مساعدة من البدلات الفضائية. سيكون من الجيد أن نبقيه في حالة جيدة حتى نتمكن من اكتشاف طريقة للعثور على كواكب أخرى صالحة للسكن أو إعادة تهيئة الكواكب الأخرى.

وللقيام بذلك، علينا أن نتعلم المزيد عن مخاطر الفضاء. نحن نعلم عن أحداث الانقراض مثل الكويكبات، لكن هذا ليس التهديد الوحيد المحتمل لبقائنا. إن التوهجات الشمسية والإشعاع وتغيرات القطب المغناطيسي وتأثيرات الاحتباس الحراري ليست سوى بعض التحديات التي قد تواجهها الأرض في مرحلة ما.

إن استكشاف الفضاء هو الطريقة الوحيدة التي سنتعلم بها المزيد عنها حتى نتمكن من تطوير الاستراتيجيات والتكنولوجيا التي يمكن أن تساعد في إنقاذنا من مثل هذه الأحداث.

❖ زيـادة احتمـالات بقـاء البشـرية

هناك شيء واحد نحن متأكدون منه عندما يتعلق الأمر بالفضاء. إذا لم نصبح – نحن البشرية – حضارة ترتاد الفضاء. سوف ننقرض عاجلاً أم آجلاً.

ستصبح الأرض في نهاية المطاف غير صالحة للسكن ومن المحتمل أن تلتهمها الشمس أثناء توسعها خلال السنوات الأخيرة من دورة حياتها. وهذا على أمل ألا يحدث أي شيء آخر من قبل، مثل اصطدام كويكب، أو حلول عصر جليدي، أو فقدان الغلاف الجوي، أو تغير المناخ، أو أي تهديدات محتملة أخرى يمكن أن تقضي على البشرية.

إن استكشاف الفضاء ليس ترفا بالنسبة لأغنى الدول. ويجب أن تكون هذه أولوية عالمية ويجب على كل دولة أن تتضافر في هذا الجهد. إنها ببساطة الطريقة الوحيدة التي تمكننا من الأمل في البقاء نوعا.

لا نعرف ما إذا كان أمامنا ملايين السنين أو مئات السنين قبل حدوث أي من هذه الأحداث. لذلك من الأفضل أن تبدأ اليوم.

❖ ابتكار عقاقير جديدة لاضطرابات وراثية

أجريت دراسة لمحطة الفضاء الدولية حول التركيب البلوري لبروتين مرتبط بضمور «دوشين» العضلي، وهو اضطراب وراثي غير قابل للشفاء، ونتج عنها دواء يقدر فريق البحث أنه قد يبطئ من تطور المرض بمقدار النصف، مما قد يشكل أملا جديدا للمرضى.

❖ إنتاج دم اصطناعي للحيوانات

استخدم الباحثون في المحطة تبلور الألبومين لفهم هياكل هذه البروتينات بشكل أفضل، ويواجه الأطباء البيطريون مشكلة في توفير علاجات نقل الدم، وهي مشكلة يمكن أن تتأثر إيجابا من خلال التطبيق المحتمل لهذا العمل في الطب البيطري.

❖ أبحاث الطلاب

أرسل العديد من الطلاب من جميع أنحاء العالم أبحاثهم إلى المحطة، ومنها إجراء التحكم في الروبوتات، أو تصميم أقمار اصطناعية صغيرة، وإطلاقها إلى مدار أرضي منخفض.

❖ خفــض الحــرارة وتتبــع الميـــاه

يقيس نظام «إيكوستريس» التابع لناسا التغيرات الطفيفة في درجة الحرارة لتحديد الحرارة الناتجة عن الحرائق أو تدفقات الحمم البركانية، ودراسة حركة تيارات المياه الدافئة وموجات الحرارة في المدن.

حماية أبولو من الحرارة تحمي المباني من الحريق. لقد صُمِّم درع أبولو الحراري خصيصًا للحرق أثناء دخوله إلى الغلاف الجوي مرة أخرى، مكونًا طبقة واقية حول المركبة. وهو بحث تموله وكالة ناسا لتطبيق هذه التكنولوجيا في مكان آخر. وقد استخدمت نسخة معدلة لطلاء الهياكل الفولاذية الداعمة للمباني الكبيرة.

وقد استخدمت هذه البيانات في الجهود المبذولة لتقليل التغيرات المرتبطة بالحرارة، وتقليل مخاطر حرائق الغابات، وقياس الإجهاد النباتي، وتتبع البعوض، ومساعدة المزارعين في ري حقولهم بكفاءة.

❖ تطوير نظم الرعاية الصحية

دُرب أفراد الطاقم على استخدام وحدة صغيرة للموجات فوق الصوتية لفحص زملائهم من أعضاء الطاقم. وتم تكييف التقنيات التي تم تطويرها لرواد الفضاء لاستخدامها في المناطق النائية على الأرض، مما قد يجعل نظام الرعاية الصحية أكثر كفاءة بالسماح بالتشخيص والعلاج المبكر.

❖ مكافحة فيروس كورونا

نجحت أطقم المحطات التابعة لوكالة ناسا في تنمية جيلين من النباتات باستخدام نظام تحكم دقيق في المعايير البيئية لنمو النبات، وتستخدم العديد من الشركات الآن هذه التقنية في أجهزة تنقية الهواء التي ثبت أنها فعالة في القضاء على فيروس «سارس-كوف2-» المسبب لجائحة كورونا.

❖ منتجات منزلية متطورة

تعتبر دراسة الغرويات أمرا معقدا، لأن الجاذبية تتسبب في طفو بعض الجسيمات وغوص البعض الآخر. وتزيل الجاذبية الصغرى هذا التعقيد وتجعل البحث ممكنا؛ مثل التجارب المتقدمة التي أجرتها وكالة ناسا والمختبر الوطني لمحطة الفضاء الدولية وشركة بروكتر آند جامبل.

❖ تطويـــر شـــبكية عين اصطناعيـــة

أجـرت شـركة طبيـة أميركيـة تجـارب علـى المحطـة الفضائيـة لإنتـاج شـبكية عـين اصطناعيـة، ونجحـت التجـارب في تصنيـع شـبكية عـين اصطناعيـة في خطـوة حاسـمة نحـو اسـتخدام بيئـة الجاذبيـة الصغـرى للتصنيـع الطبـي الـذي يغيـر حيـاة ملايـين الأشـخاص علـى وجـه الأرض.

❖ تســـهيل علاجـــات الســـرطان

أنتجـت مختبـرات أبحـاث ميـرك معلقـات بلوريـة عاليـة الجـودة يمكـن أن تجعـل العـلاج أكثـر ملاءمـة للمرضـى ومقدمـي الرعايـة، مـع تقليـل التكلفـة بشـكل كبيـر بعـد تطويـر شـكل بلـوري أكثـر اتسـاقا مـن الجسـم المضـاد أحـادي النسـيلة، والـذي يسـتخدم لعـلاج عـدة أنـواع مـن السـرطانات.

❖ أبحـــاث البيولوجيـــا الجزيئيـــة

يستخدم العلماء محطة الفضاء الدولية لدراسة كيفية الحفاظ على سلامة وصحة رواد الفضاء في مهمات طويلة الأمد، مما فتح الباب أمام أبحاث البيولوجيا الجزيئية، ويمكن لهذه التكنولوجيا أن تمكن العلماء من التعرف بسرعة على مسببات الأمراض، ومن المحتمل أن تحدد الحياة على كواكب أخرى.

❖ مراقبـــة الحـــرارة الآمنـــة على الأرض

بـدأت التكنولوجيـا التـي تقيـس درجـة حـرارة الجسـم في إحـداث فـرق علـى الأرض. وتشـمل التطبيقـات الأخـرى للجهـاز مراقبـة علامـات التعـب لـدى الأشـخاص الذيـن يعملـون في ظـروف قاسـية، بمـن فيهـم رجـال الإطفـاء والطيـارون المقاتلـون.

❖ تقديـــم حلول لألغـــاز علمية قديمـــة

تكشف العديد من التجارب على المحطة عن معلومات جديدة وتوفر أدلة لحل الألغاز العلمية القديمة، وتساعد هذه المعلومات في تحسين كل شيء، من كفاءة الوقود إلى تبريد الإلكترونيات.

❖ طعـــام مُجفّف بالتجميـــد

على الرغم من أنّ وكالة ناسا لم تبتكر عملية تجفيف الأطعمة بالتجميد، فإنها أحد الأسباب الرئيسة لانطلاق التكنولوجيا. في الستينات، بدأت ناسا في تطوير طعام فضائي لروادها. ومن الضروري أن يكون الطعام مغذياً، خفيف الوزن، وقابلاً للتخزين، ويسهل تناوله في الفضاء؛ مما يعني خلوه من فتات يمكن أن تتطاير في أي مكان تنعدم فيه الجاذبية ويسد المعدات الدقيقة.

بدئ الأمر بأطعمة معبأة أساسا في أنابيب معجون أسنان، وانتهت باللجوء إلى مختبرات Natick التابعة للجيش، والتي كانت تعمل على تطوير وجبات مجففة بالتجميد.

وتوصل المعمل إلى منتج يتطلب الماء المغلي والانتظار لمدة 20 دقيقة حتى يصبح الطعام صالحاً للأكل. لكن احتياج وكالة ناسا إلى منتج يمكن إعادة تكوينه في غضون 10 دقائق بماء بدرجة حرارة الغرفة. وبتمويل وتوجيه من وكالة ناسا، أصبح ذلك حقيقة.

وبينما واصل مختبر الطعام إجراء تجارب على العناصر المختلفة المجففة بالتجميد لرواد الفضاء، منحت وكالة ناسا ترخيص استخدام هذه التكنولوجيا لوكالات حكومية أخرى. وفي منتصف السبعينات من القرن الماضي، أطلقت مؤسسات في ولاية تكساس برنامجاً لتوفير وجبات مغذية مجففة بالتجميد

استناداً إلى تقنية ناسا للمقيمين المسنين. وفي نيويورك، طورت شركة تدعى Sky-Lab Foods، وجبات مجففة على غرار ناسا من أجل كبار السن والأفراد الملازمين لمنازلهم.

❖ أقمشـــة مناســبة للرياضيــين

بعض ابتكارات ناسا منتشرة في كل مكان ولا ندرك حتى أننا نرتديها. فقد شقّت الأقمشة التي طُورِت لحماية رواد الفضاء من بيئة الفضاء القاسية طريقها إلى صناعة الملابس الرياضية والملابس الخارجية. أطلق مهندس حيوي في معهد أبحاث Johnson Space Center التابع لـ«ناسا»، علامة تجارية تسمى Techni-Clothes التي تستخدم تقنية نظام تبريد بدلة الفضاء. واستهدف خط ملابس العدائين الرياضية، وطرح عصابات رأس وسراويل قصيرة بجيوب صغيرة حيث يمكن إدخال عبوات هلام التبريد لنقل الحرارة بعيداً عن الجلد.

ومن المنتجات الأخرى المعتمدة على مواد ناسا حمالة الصدر Support-Her، وهي حمالة صدر رياضية قابلة للتمدد مصممة لمنع الاحتكاك و«ارتداد الثدي».

في الآونة الأخيرة، استُخدِمَت تقنية ناسا في أقمشة التبريد التي تحجب الأشعة فوق البنفسجية في ملابس السباحة والملابس غير الرسمية، واختبر رواد الفضاء في محطة الفضاء الدولية الأقمشة عالية الأداء ضمن دراسة SpaceTex؛ من أجل تقييم قدرة النسيج على امتصاص العرق، ومقاومة نمو البكتيريا، والتحكم في الرائحة، وجميعها اعتبارات مهمة لأي شخص يحتمل أن يستعمر المريخ.

❖ إطـــارات مقاومـــة للبـــرد

بالنسبة لمهمة أبولو 14 في عام 1971، هبط الطاقم على القمر لاستكشاف المواقع المهمة. ولتسهيل عملهم، صممت ناسا طاولة عمل محمولة على عجلات أطلقت عليها اسم «حامل معدات قياسي». وصممت إطارات الطاولة شركة Goodyear Tire and Rubber لصالح مركز جونسون للفضاء لتحمّل بيئة القمر القاسية. واحتفظت العجلات بمطاطيتها حتى درجة حرارة سالب 195 درجة فهرنهايت (سالب 126 درجة مئوية).

وهنا على كوكب الأرض، في ذلك الوقت، كانت الإطارات تتيبس في الصيف وتفقد قوتها في الشتاء. وبمجرد تطوير إطارات خاصة للقمر، بدأت شركة Goodyear ومُصنّعون آخرون في تقديم إطارات مناسبة لموسم الشتاء والتي صُنِّعَت لتظل مرنة في درجات الحرارة الباردة. وتضمنت إطارات Goodyear ابتكاراً آخر لوكالة ناسا؛ وهي الحبال التي توفر ثباتاً لشكل الإطار، والمصنوعة من المادة نفسها فائقة القوة كما في حبال المظلات في المسبار الفضائي فايكينغ التابع لـ«ناسا»، الذي هبط على سطح المريخ عام 1976.

حبال مظلات الفايكنغ تجعل الإطارات شديدة التحمل. أُرْسِلت الهابطتين فايكنغ Viking إلى سطح المريخ في السبعينات، وكانت مظلاتهما بحاجة إلى الحماية أثناء الرحلة. دُمِجَت الألياف الأقوى من الفولاذ المصممة لحماية معدات نزول الفايكنغ لاحقًا في إطارات السيارات بوساطة شركة غوديير Goodyear، مما أدى إلى إطالة عمرها الافتراضي بآلاف الأميال.

❖ مايلـــر مغطـــى بالألمنيـــوم

ومن الاختراعات الأخرى المرتبطة بوكالة ناسا، والتي نراها بانتظام، المايلر المغطى بالألمنيوم. وهي ورقة فضية خفيفة الوزن جدًا ولامعة من جانب واحد لتعكس الحرارة، وتحافظ على الحرارة من الجانب الآخر.

وغُلِفَت الأقمار الصناعية بالمايلر لتعكس الإشعاع الشمسي؛ واستُخدِم هذا المنتج أيضاً في عزل بدلات الفضاء. وفي النهاية، حصل تجار الملابس الرياضية

على رخصة استخدامه في صنع «بطانيات فضائية» خفيفة الوزن وتحافظ على الحرارة، وسترات، ومعاطف تزلج، ومعدات طوارئ. وغالباً ما يلتف المتسابقون في الماراثون بأوراق مايلر بعد أن يكملوا السباق، للحفاظ على أجسادهم دافئة. وقد ترى أيضاً المادة الموجودة في بالونات مايلر، التي تظل منتفخة لفترة أطول بكثير من البالونات المصنوعة من مادة اللاتكس؛ لأنّ المايلر أقل مسامية من اللاتكس.

أداة بصريات هابل تساعد المتزلجين على الجليد في الأولمبياد. لقد كُيّفت التكنولوجيا المستخدمة لإنشاء البصريات لتلسكوب هابل الفضائي، بالتعاون مع اللجنة الأولمبية الأمريكية، لتطوير أداة شحذ لشفرات التزلج على الجليد. تفوقت أحذية التزلج الحادة على الإصدارات التقليدية، واستخدمها كريس ويتي Chris Witty عندما فازت بالميدالية الذهبية وسجلت رقمًا قياسيًا عالميًا في دورة الألعاب الأولمبية الشتوية 2002.

❖ العــزل ببوليمــرات الألومنيــوم

كانت صفائح بوليمرات الألومنيوم أيضاً جزءاً مهماً من مهام أبولو. فقد عزلت وحدات القيادة -ورواد الفضاء بداخلها- عن الإشعاع الشمسي ودرجات حرارة الفضاء التي يمكن أن تتراوح بين 400 درجة و- 400 درجة فهرنهايت (240 و - 240 درجة مئوية) .

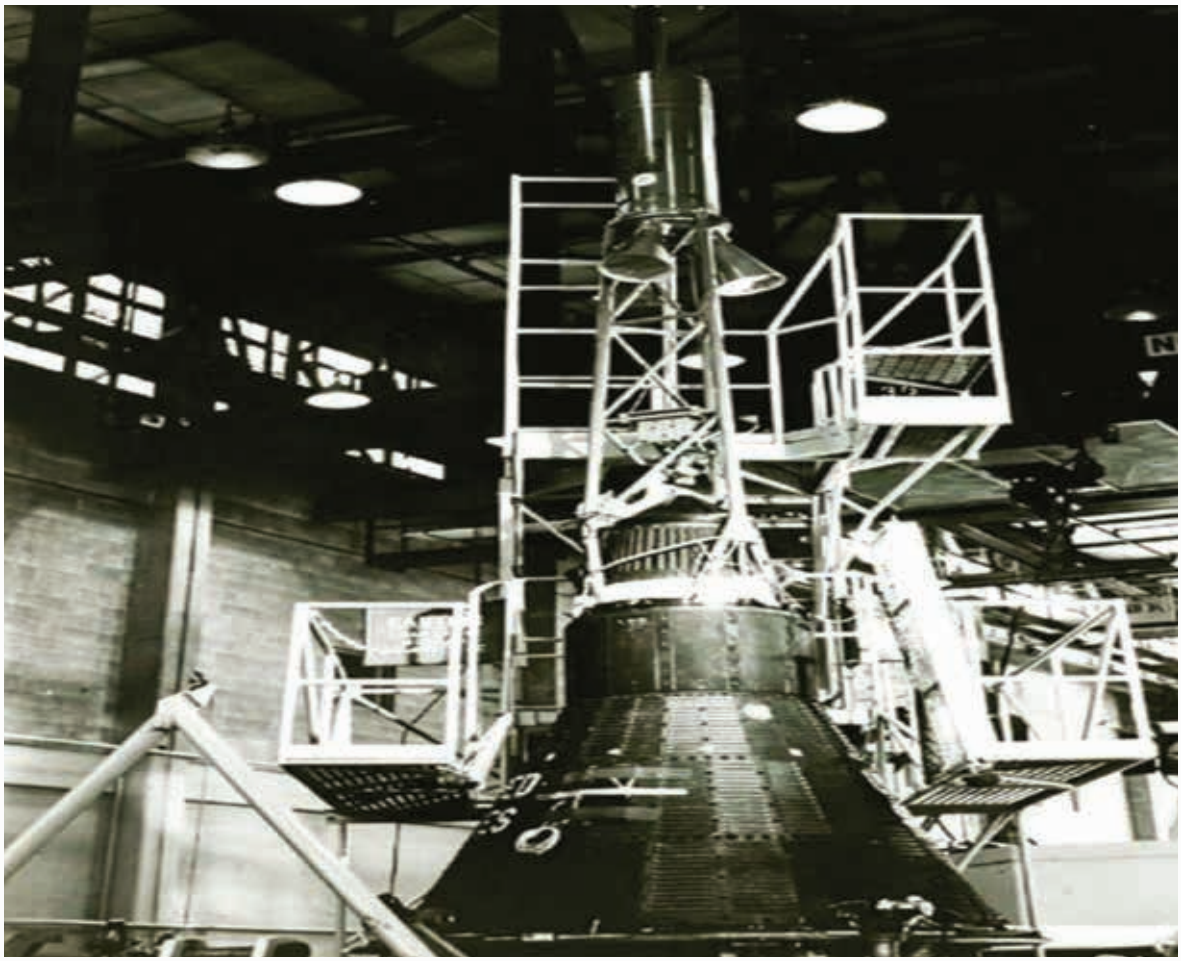
كانت الصفائح اللامعة فعالة جدًا في عكس الإشعاع لدرجة أنّ الشركات بدأت في استخدامها للعزل في المنازل والمباني التجارية. وطورت شركة Quantum International Corporation الأمريكية لابتكارات الروبوتات منتجاتها لعزل الإشعاعات باستخدام صفائح مايلر التابعة لوكالة ناسا، لتعكس الإشعاع الشمسي والحفاظ على درجات الحرارة الداخلية إما دافئة أو باردة؛ لتعمل نوعاً ما مثلما يحافظ الترموس (حافظ الحرارة) على القهوة ساخنة أو باردة لساعات. ثم طُبِقَت تقنية عازل الإشعاع في شاحنات التبريد التجارية وسيارات الركاب أيضاً.

❖ عناصــر من الحواســيب المحمولــة الاستهلاكيــة

في مهمة مكوك فضائي في عام 1983، استخدم رواد فضاء ناسا لأول مرة حاسوبًا محمولًا على متن مركبة فضائية. واستُلهِم هذا الحاسوب الصغير المستخدم لمراقبة الملاحة من آلة تجارية تسمى GriD Compass، التي تتميز بشاشة مسطحة ولوحة مفاتيح كاملة الحجم وبناء مِفصَلي على شكل الصدفة.

وعدّلت وكالة ناسا التصميم بدمج المكونات التي وصلت في نهاية المطاف إلى الحواسيب المحمولة الاستهلاكية؛ مثل التبريد القائم على المروحة. وأدخلوا

أيضًا بعض الإضافات التي لم تكن لها فائدة كبيرة على أجهزة الحاسوب هنا على الأرض؛ مثل أشرطة الفيلكرو في الأسفل لمنعها من الطفو بعيدًا. وبناءً على شراكتها مع وكالة ناسا، صارت حواسيب GRiD Compass المحمولة شائعة لدى الوكالات الحكومية الأخرى والجيش، فضلاً عن شركات الطاقة والاتصالات.



تُستخدم برامج تصميم المركبات الفضائية في صنع نموذج أولي لقطار الملاهي. كُتِب برنامج الحاسوب لعام 1968، NASTRAN، في الأصل لمساعدة مهندسي وكالة ناسا على تصميم المركبات الفضائية، ولكنه أصدر للجمهور في عام 1971 ومنذ ذلك الحين اسْتخدمَ لعددٍ من التطبيقات المختلفة. لقد جعلته قدرته على اختبار الخصائص المرنة للهياكل مثاليًا لنمذجة تعليق السيارة والجسور وحتى قطار الملاهي.

❖ الكاميـــرا في الهاتـــف الذكـــي

لقد بدأت المنتجات مع مستشعر الصور المكمل المعدني لأشباه الموصلات، الذي طورته ناسا لالتقاط صور عالية الجودة على المركبات الفضائية. ومنح إيريك فوسم، المهندس في مختبر الدفع النفاث التابع لوكالة ناسا، والذي عمل لسنوات في صقل قدرات المستشعر، ترخيص الاختراع وبدأ في عقد شراكة مع شركات مثل Kodak وIntel لإنشاء أجهزة استشعار مخصصة، وفقاً لما ورد في مجلة Mental Floss الأمريكية.

واستقرت المستشعرات في الكاميرات ذات العدسة الأحادية العاكسة (DSLR) وفي GoPro - حيث يمكن لكاميرا فيديو عالية الدقة وخفيفة الوزن تقديم أداء متألق- لكن الأمر تطلب الهواتف المحمولة لجعل التكنولوجيا موجودة في كل مكان. وجعل حجمها الصغير ومتطلبات الطاقة المنخفضة من هذه المستشعرات مناسبة تماماً للهواتف المحمولة. وبحلول عام 2013، وصل إنتاج مستشعرات الصور لأكثر من بليون وحدة، وانتهى الأمر بالعديد منها داخل الهواتف الذكية. وربما لا يكون من المبالغة القول إنّ ابتكار ناسا هذا ساعد في إطلاق الحياة المهنية لآلاف من المؤثرين على إنستغرام.

❖ معـــدات رجـــال الإطفـــاء

عند إعادة الدخول للغلاف الجوي للأرض، يواجه رواد الفضاء درجات حرارة قصوى. لتوفير العزل والحماية المناسبين، طورت ناسا مجموعة من الأقمشة النسيجية المقاومة للحرارة واللهب المصنوعة من بوليمير بولي البنزيميدازول Polybenzimidazole، لاستخدامها في بدلات الفضاء والمركبات الفضائية.

بعد ذلك، تم تقديم هذه المواد في أواخر السبعينيات لاستخدامها في معدات مكافحة الحرائق، لأنه إذا كانت جيدة بما يكفي للناس الذين يسافرون عبر الفضاء، فحتماً يمكن استخدامها على الأرض.

مواد بدلة الفضاء تحمي رجال الإطفاء. أدت كارثة حريق منصة الإطلاق التي أودت بحياة أفراد طاقم أبولو- 1 Apollo-1 الثلاثة إلى فترة مكثفة من التحقيق في المواد الجديدة المثبطة للهب في البدلات والمركبات الفضائية لحماية رواد فضاء أبولو في المستقبل. شقت هذه التكنولوجيا الجديدة طريقها بسرعة إلى الصناعة وفي ملابس رجال الإطفاء والجنود وسائقي سيارات السباق.

❖ زراعة القوقعة الصناعية

في السبعينات من القرن الماضي، أصيب آدم كيسياه جونيور، وهو مهندس ضعيف السمع في مركز كينيدي للفضاء الشهير التابع لناسا، بالإحباط من حالة أجهزة السمع. يمكن للأجهزة فقط تضخيم الصوت، وليس جعله أكثر وضوحاً.

استغل كيسياه التقدم التكنولوجي في أنظمة الاستشعار الإلكترونية، والقياس عن بُعد، ومستشعرات الصوت والاهتزاز لتطوير زراعة قوقعة الأذن لتنتج نبضات رقمية لتحفيز النهايات العصبية السمعية وإرسال إشارات سمعية أكثر وضوحاً ونهائية إلى الدماغ.

استغرق استكمال بحثه وتطويره نحو 3 سنوات، وفي عام 1977 حصل على براءة اختراع لزراعة قوقعة الأذن.

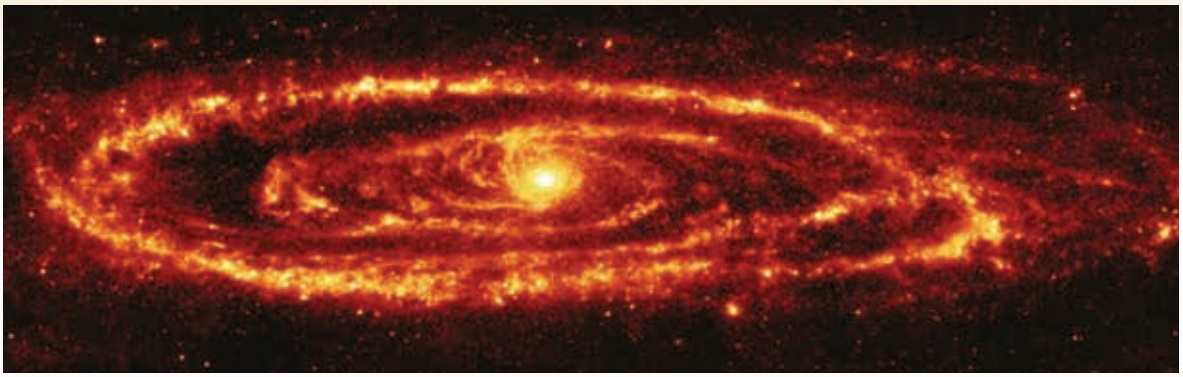
❖ ميزان الحرارة بالأشعة تحت الحمراء

تتيح موازين الحرارة بالأشعة تحت الحمراء فحص درجة حرارة شخص ما من مسافة بعيدة. تعاونت ناسا مع شركة Diatek لتطوير ميزان الحرارة الأذني، ليقيس هذا الجهاز الإشعاع الحراري المنبعث من طبلة أذن المريض بالطريقة نفسها التي يتم بها قياس درجة حرارة النجوم والكواكب.

يقوم بذلك عن طريق استنتاج درجة الحرارة على أساس الإشعاع الحراري المنبعث من كائن يتم قياسه. يتكون كل جهاز من عدسة لتركيز الطاقة الحرارية بالأشعة تحت الحمراء على كاشف يحول الطاقة إلى إشارة كهربائية.

ثم يتم تحويل هذه الإشارة إلى درجة الحرارة، بعد أن يتم تعويض درجة الحرارة المحيطة، وعرضها على الجهاز.

تم تطوير الجهاز بدعم من ناسا من خلال برنامج الشركات التابعة للتكنولوجيا. الفائدة المباشرة لهذا الجهاز تكمن في تجنب الاتصال بالأغشية المخاطية، ويمكن استخدامه بسهولة لقياس درجات حرارة المرضى حديثي الولادة.



لقد طُوِّرَت تقنية التصوير بالأقمار الاصطناعية بالأشعة تحت الحمراء، التي طُوِّرَت في مختبر الدفع النفاث في كاليفورنيا للقمر الاصطناعي الفلكي بالأشعة تحت الحمراء، في الأصل لقياس درجة حرارة النجوم البعيدة. في عام 1991، تحول إلى مقياس حرارة يمكنه قياس درجة حرارة الجسم باستخدام ضوء الأشعة تحت الحمراء.

❖ الأحذية الرياضية

في أواخر الثمانينات، كانت شركة تصنيع الأحذية AVIA في مهمة لإنشاء حذاء رياضي عمر افتراضي أطول. بالشراكة مع مهندس الفضاء التابع لأبوللو ألفرد جاي غراس، أصدروا الحذاء ذا النعل الأوسط المضغوط في عام 1990، والذي يستخدم التكنولوجيا نفسها الموجودة في بدلات الفضاء للحفاظ على خصائص امتصاص الصدمات والثبات والمرونة.

❖ نظام التموضع العالمي الدقيق GPS

ابتداءً من منتصف تسعينات القرن الماضي، بفضل وكالة ناسا، طور خبراء استكشاف الفضاء برنامجاً قادراً على إصلاح بيانات GPS غير المصححة. كان مصدرها في الأصل من قبل وكالة ناسا للقوات الجوية الأمريكية، ولكن منذ ذلك الحين تم تقاسمها مع الطيارين التجاريين والخاصين، كما أصبحت تستخدم في الهواتف النقالة والسيارات.

يمكن العثور على قدر كبير من الابتكارات المستفادة من الفضاء في مدينتك وحتى في المنزل.

مستقبل استكشاف الفضاء

يتضمن مستقبل استكشاف الفضاء كلًا من الاستكشاف التلسكوبي والاستكشاف المادي للفضاء بواسطة المركبات الفضائية الآلية ورحلات الفضاء البشرية.

يتوقع التخطيط والإعلان عن بعثات الاستكشاف المادي على المدى القريب، والتي تركز على الحصول على معلومات جديدة حول المجموعة الشمسية، من قبل المنظمات الوطنية والخاصة. هناك خطط مبدئية لمهمات مدارية مأهولة تهبط على القمر والمريخ لإنشاء مواقع علمية ستمكن لاحقًا من إقامة مستوطنات دائمة ومكتفية ذاتيًا.

من المحتمل أن تشمل عمليات الاستكشاف الإضافية رحلة استكشافية وكواكب أخرى ومستوطنات على القمر، بالإضافة إلى إنشاء مواقع للتعدين وتزويد الوقود، خاصة في حزام الكويكبات. سيكون الاستكشاف المادي خارج المجموعة الشمسية آليًا في المستقبل المنظور.

تاريخ الفضاء في المملكة العربية السعودية

بدأت المملكة مؤخرا تضطلع بمزيد من الأنشطة المرتبطة بمجال الفضاء، على الرغم من مشاركتها النشطة في القطاع على مدى العقود الأربعة المنصرمة. وكانت قد خطت خطوات كبيرة في مجال الفضاء والملاحة الجوية منذ عام 1976م، وذلك عند تأسيس (عرب سات). وبدأت إمكانات المملكة المحلية في مجال الفضاء تتبلور تزامنا مع تأسيسها لإدارة الاستشعار عن بعد في الثمانينيات كجزء من مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، كما حققت المملكة إنجازا مهما آخر في 8 فبراير 1985م؛ والذي تمثل بإطلاق قمر عربسات A-1، وهو أول قمر صناعي سعودي على الإطلاق، وبعد مرور أربعة أشهر على إطلاق قمر عربسات A-1، انطلق صاحب السمو الملكي الأمير سلطان بن سلمان بن عبدالعزيز آل سعود، في 17 يونيو 1985م، في رحلة إلى الفضاء؛ محققا بذلك لقب أول رائد فضاء عربي ومسلم. وانطلق فريق المهمة التي استغرقت سبعة أيام، على متن مكوك «ديسكفري» من مركز كينيدي للفضاء لنشر ثلاثة أقمار صناعية للاتصالات، بما فيها (عربسات B -1).

وبحلول عام 2019م، كانت المملكة قد أطلقت 29 قمرا صناعيا من خلال مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية ومؤسسة (عرب سات)، إلى جانب تحقيقها لنجاحات كبيرة إثر مشاركتها في بعثات ومهام علمية دولية عدة، مثل إطلاق الصين المسبار القمري (تشانغ A-4) بمشاركة سعودية، وغيرها الكثير من الإنجازات. ولتسريع المساعي الرامية إلى الارتقاء بمستوى قطاع الفضاء السعودي، جرى إنشاء الهيئة السعودية للفضاء نهاية عام 2018م وفقا لقرار مجلس الوزراء رقم (209) بتاريخ 1440/4/25هـ، والتي تضطلع بمهمة رئيسة متمثلة في إعداد الاستراتيجية الوطنية للفضاء.

• الهيئة السعودية للفضاء

أسس الأمير سلطان بن سلمان الهيئة السعودية للفضاء في شهر ديسمبر 2018م، وهي خطوة شجاعة نحو مستقبل أكثر ابتكارًا وتطلعًا لأحدث التقنيات والفرص في قطاع الفضاء السعودي. وفي مايو 2020م اعتمد مكتب الأمم المتحدة لشؤون الفضاء الخارجي للأغراض السلمية الهيئة السعودية للفضاء ممثلا رسميًا للسعودية في المنظمة، وأدرج شعارها في موقعه الإلكتروني الرسمي.

أعدت الهيئة السعودية للفضاء الاستراتيجية الوطنية للفضاء التي تضع خارطة طريق لتطوير قطاع الفضاء السعودي، وتوضح سياساته وأهدافه ومجالاته، ومسئولياته ومتطلباته على مدى السنوات الخمس عشرة المقبلة. وتتميز هذه الاستراتيجية وجدولها الزمني بالطموح، حيث يهدفان إلى المساهمة في إبراز المملكة كقوة فضائية تمكنها من وضع برامج تتماشى مع مكانتها الدولية كواحدة من دول مجموعة العشرين. وتشمل هذه الاستراتيجية عدداً من المبادئ التوجيهية والأهداف ومجالات التركيز والمسؤوليات والمتطلبات.

تتوافق أهداف الهيئة السعودية للفضاء مع تطلعات المملكة نحو حياة أكثر جودة وتقدم، حيث تتوافق مع رؤيتها لخلق بيئات أفضل وأكثر أمانًا لمواطنيها، مع خلق فرص جديدة لمزيد من الابتكارات المربحة الداعمة للاقتصاد السعودي. تقتضي استراتيجية الهيئة السعودية للفضاء وضع مجموعة من الأهداف الأولية التي تخدم مصالح الأمن القومي وتحميه من الأخطار المتعلقة بالفضاء وتشجع النمو والتقدم التراكمي.

أ. مهام الهيئة

- تنفيذ الاستراتيجية الوطنية للفضاء
- تنظيم كل ما يتصل بأنظمة الأقمار الصناعية والأقمار الصناعية الخاصة بخدمات الاتصالات الفضائية
- تطوير تقنيات إطلاق المركبات الفضائية
- وضع المتطلبات اللازمة لتطوير وتنفيذ البنية التحتية لقطاع الفضاء والمحطات الأرضية ومركبات النقل إلى الفضاء، والرحلات شبه المدارية
- تنمية الكوادر الوطنية في مجال علوم الفضاء ودعمها
- تنظيم ما يتصل بالأنظمة العالمية للملاحة عبر الأقمار الخاصة بتحديد المواقع والتحركات والوقت وتطويرها.
- العمل على تعزيز الأمن الفضائي من خلال رصد الفضاء وتتبعه، ورصد الحطام الفضائي، والإنذار المبكر، وغيرها من الأنشطة ذات الصلة
- التعاون مع الجهات الحكومية والهيئات المماثلة في الدول الأخرى، والمنظمات الدولية فيما يتعلق باختصاصاتها، وفقاً للإجراءات النظامية
- تمثيل المملكة في المحافل الدولية ذات الصلة باختصاصاتها.

ب. برامج ومبادرات الهيئة

❖ برنامج أجيال

هو برنامج معني بتنمية رأس المال البشري، عبر خلق البيئة التعليمية المحفزة لقطاع الفضاء، من خلال مسارات اقتصادية وعلمية تعمل على تنمية وتثقيف وتدريب كوادر سعودية متخصصة في علوم الفضاء وتطبيقاته إلى جانب الهندسة والرياضيات، والتقنية.

❖ اتفاقية موهبة

هي تعاون مشترك بين الهيئة السعودية للفضاء ومؤسسة موهبة، يهدف إلى تشجيع المواهب الشابة والطلاب ودفعهم للاهتمام بمجال الفضاء والعلوم المرتبطة فيه، وذلك عبر نشر المعرفة بعلوم الفضاء في أوساط الطلاب، وتنمية القدرات التي تخولهم ارتياد هذا المسار.

❖ ابتعاث الفضاء

يهدف برنامج ابتعاث الفضاء إلى توفير فرص الدراسة الجامعية والعمل في مجالات العلوم التطبيقية كالفيزياء والفلك والهندسة والرياضيات، عبر الابتعاث الخارجي المنتهي بالتوظيف في قطاع الفضاء لبناء كوادر سعودية متمكنة والمشاركة في المناسبات العالمية المتعلقة.

❖ مقدمة في تطبيقات الفضاء

في فبراير 2022م أطلقت الهيئة البرنامج التدريبي «مقدمة في تطبيقات الفضاء»، وذلك بالتعاون مع شركة إيرباص للدفاع والفضاء «Airbus». ويهدف البرنامج إلى تزويد أبناء الوطن بالمهارات والمعارف اللازمة؛ لتحقيق ريادة الفضاء، ودعمًا لتأهيل وتطوير الكوادر الوطنية المتخصصة في مجالات الفضاء وتقنياته.

❖ برنامج رواد الفضاء

أطلقت الهيئة السعودية للفضاء في 22 سبتمبر 2022م برنامجها الوطني لرواد الفضاء ويهدف لتأهيل كوادر سعودية متمرسة لخوض رحلات فضائية طويلة وقصيرة المدى والذي يشمل إرسال أول امرأة سعودية للفضاء والمشاركة في التجارب العلمية والأبحاث الدولية والمهام المستقبلية المتعلقة بالفضاء.

❖ اتفاقية «أرتميس»

في 16 يوليو 2022م، وقّعت وكالة الفضاء السعودية اتفاقية «أرتميس» مع وكالة الفضاء الأمريكية «ناسا»، للانضمام للتحالف الدولي في مجال الاستكشاف المدني واستخدام القمر والمريخ والمذنبات والكويكبات للأغراض السلمية، التي تتضمن أيضاً الانضمام إلى التحالف العالمي لعودة الإنسان مجدداً إلى القمر.

• وكالة الفضاء السعودية

في 14 يونيو 2023م تم تحويل (الهيئة السعودية للفضاء) إلى وكالة باسم (وكالة الفضاء السعودية). تهدف الوكالة لتنظيم كل ما له صلة بقطاع الفضاء، وتعمل لتعزيز الأمن والحماية للقطاع من أي مخاطر محتملة، كما تضمن رعاية مصالح المملكة ومكتسباتها في هذا المجال، وتشجع الأنشطة البحثية والصناعية المتصلة بالفضاء، وتنمي الكوادر الوطنية المتخصصة في المجال. كما تعنى وكالة الفضاء السعودية (SSA)، بكل ما يتعلق بالنشاط الفضائي.

جرى اعتماد تنظيم وكالة الفضاء السعودية لأهمية التركيز على الصناعة والابتكار في قطاع الفضاء. وقد صدر قرار مجلس الوزراء باعتماد تنظيم وكالة الفضاء السعودية لتكون خطوة نحو مستقبل أكثر ابتكارًا وتطلعًا لأحدث التقنيات والفرص في قطاع الفضاء السعودي. تتوافق أهداف وكالة الفضاء السعودية مع تطلعات المملكة نحو حياة أكثر جودة وتقدمًا، حيث تتوافق مع رؤيتها لخلق بيئات أفضل وأكثر أمانًا لمواطنيها، مع خلق فرص جديدة لمزيد من الابتكارات المربحة الداعمة للاقتصاد السعودي. تقتضي استراتيجية وكالة الفضاء السعودية وضع مجموعة من الأهداف الأولية التي تركز على علوم الفضاء والبعثات الاستكشافية وخلق فرص جديدة في القطاع وتمكين الكوادر الوطنية لتحقيق النمو والتقدم بما يخدم الوطن والإنسانية.

أطلقت وكالة الفضاء السعودية برنامج المملكة لرواد الفضاء، والذي يهدف لتأهيل كوادر سعودية متمرسة لخوض رحلات فضائية طويلة وقصيرة المدى والمشاركة في التجارب العلمية والأبحاث الدولية والمهام المستقبلية المتعلقة بالفضاء، والاستفادة من الفرص الواعدة التي يقدمها قطاع الفضاء وصناعاته عالميًا والمساهمة في الأبحاث التي تصب في صالح خدمة البشرية في عدد من المجالات ذات الأولوية مثل الصحة والاستدامة وتكنولوجيا الفضاء.

تجارب المملكة العربية السعودية في ارتياد الفضاء

بذلت المملكة العربية السعودية جهودًا جبارة في مجال الفضاء خلال العقود الأربعة الماضية، فقد صنعت التاريخ عام 1985م بانطلاق أول رائد فضاء عربي، الأمير سلطان بن سلمان الذي مكث في الفضاء 7 أيام وساعة واحدة و38 دقيقة. وفي 22 سبتمبر 2022م أطلقت الهيئة السعودية للفضاء برنامجها الوطني لرواد الفضاء ويهدف لتأهيل كوادر سعودية متمرسة لخوض رحلات فضائية طويلة وقصيرة المدى، تماشيًا مع رؤية المملكة 2030، حيث أطلقت أول الرحلات الفضائية عام 2023 م، وضمت البعثة أول رائد فضاء علي القرني ورائدة فضاء ريانة برناوي، لتسجل المملكة بذلك حدثًا تاريخيًا مهمًا من خلال إرسال أول امرأة سعودية إلى الفضاء. لقد نجحت المملكة بمدة وجيزة في تأكيد حضورها عبر الفضاء، وتحويل طموحاتها الكبيرة لخدمة البشرية برؤية ابتكارية لاستكشاف الفضاء، وتنفيذ العديد من التجارب العلمية في محطة الفضاء الدولية (ISS).

• رائد الفضاء سلطان بن سلمان بن عبد العزيز

في عام 1985م قامت المنظمة العربية للاتصالات الفضائية بترشيح الأمير سلطان بن سلمان بن عبد العزيز بعد خضوعه للعديد من الاختبارات التقنية والبدنية المكثفة. وهو طيار مدني أصلًا وله خبرة في قيادة بعض الطائرات ويحمل رخصة طيران تجاري. ويبلغ من العمر وقتها 28 عامًا، من مواليد مدينة الرياض، وحاصل على البكالوريوس في الآداب - في وسائل الإعلام من جامعة دنفر بولاية كولورادو الأمريكية وماجستير في العلاقات الدولية من جامعة سيراكيوز الأمريكية. خدم سلطان بن سلمان في القوات الجوية الملكية

السعودية ابتداءً من عام 1985م وحصل على رتبة مقدم وتقاعد من القوات الجوية عام 1996م برتبة عقيد.

في وقت رحلته الفضائية، كان لدى سلطان أكثر من 1000 ساعة طيران تراكمية؛ واعتبارًا من فبراير 2020م، كان لديه أكثر من 8000 ساعة طيران كطيار عسكري ومدني. وفي ديسمبر 2018م، كان رئيسًا لمجلس إدارة هيئة الفضاء السعودية. منذ عام 2009م وحتى انضمامه إلى لجنة الفضاء، شغل سلطان بن سلمان منصب رئيس ورئيس الهيئة السعودية للسياحة والتراث الوطني (SCTH). شغل منصب الأمين العام للهيئة منذ إنشائها عام 2000م. بصفته أمينًا عامًا، ساهم بشكل كبير في تحسين استراتيجية السياحة والتراث الوطني في المملكة العربية السعودية، والبناء التنظيمي والابتكار في الحكومة السعودية. في 3 مايو 2021م، تم تعيين سلطان بن سلمان مستشارًا خاصًا للملك بدرجة وزير، ورئيسًا لمجلس أمناء مؤسسة الملك سلمان، وهي منظمة غير ربحية أنشئت حديثًا. حصل الأمير سلطان على عدد كبير من الجوائز وشهادات التقدير تقديرًا لجهوده.

لقد خضع الأمير سلطان بن سلمان قبل رحلته لمراحل تدريبية عالية المستوى منها: كيفية نشر القمر الصناعي العربي على بعد 320 كم من سطح الأرض، وكذلك كيفية التصوير باستخدام آلة تصوير من طراز (هاسلبلاد – 500) لالتقاط صور التضاريس الجيولوجية لشبه الجزيرة العربية. اختير كأخصائي حمولة على متن الطائرة STS-51-G Discovery. وباعتباره واحدًا من طاقم دولي مكون من سبعة أفراد، والذي ضم أيضًا رواد فضاء أمريكيين وفرنسيين، فقد مثل المؤسسة العربية للاتصالات الفضائية (عربسات) في نشر قمرها الصناعي، عربسات B-1.

وفي يوم 17 يونيو 1985م جاءت الوفود من جميع أنحاء المعمورة لتأخذ أماكنها المخصصة في المدرجات المطلة على المنصة الحاملة للمكوك الفضائي ديسكفري، وتمت الانطلاقة التاريخية في موعدها المحدد، وفي هذه اللحظات أخذ العالم - ولا سيما العربي والإسلامي - يتابع تفاصيل انطلاقة أول رائد فضاء عربي مُسلم في التاريخ، لينتقل بالعرب من مرحلة مراقبة التقدم التقني الحديث في مجال الفضاء إلى المواكبة والمشاركة في هذا المجال. وفي اليوم الأول للرحلة بدأ البث التليفزيوني لنشر الأقمار الصناعية، وفي اليوم الثاني تم إطلاق القمر الصناعي العربي، وفي اليوم الثالث انصرف رائد الفضاء العربي الأمير سلطان وزميله الفرنسي باتريك بودري إلى إجراء مجموعة من التجارب الخاصة بتجربتهم الطبية المشتركة لرصد سلوك أعضاء الجسم البشري في حالة انعدام الوزن.

وهكذا تواصلت الرحلة الفضائية بنجاح وكانت العودة والاستقبال الشعبي الكبير في العاصمة الرياض يوم الخميس 11 يوليو عام 1985م.

• التجارب التي قام بها الأمير سلطان في الفضاء

لقد أمكن اختيار البرنامج العلمي لرحلة الفضاء التي قام بها الأمير سلطان بعناية ليشمل المجالات الرئيسة في علوم الفضاء وتقنيته، كما يتضمن المراقبة الأرضية والاستشعار عن بعد. وتعد هذه الأخيرة من أهم تطبيقات تقنيات الفضاء وأكثرها تأثيراً على اقتصاد أي بلد، كما راعى البرنامج محاولة تفسير بعض القوانين الطبيعية الأرضية عند تطبيقها في بيئة الفضاء، وكذلك اختيار هذه التجارب مجموعة من المعايير منها مثلا:

- أهميتها للمملكة العربية السعودية والعالم العربي.
- أن يكون لرائد الفضاء دور في إجراء التجربة.
- إمكانية استكمالها والاستفادة من نتائجها بعد العودة.
- لا تتعارض مع برنامج وكالة ناسا على متن المكوك الفضائي.
- أن تكون المدة اللازمة لإجرائها مناسبة مع المهمات الأخرى لرائد الفضاء السعودي.

وحسب البرنامج الذي حددته وكالة ناسا فقد بلغ عدد التجارب التي شارك الأمير سلطان في تنفيذها:

- التقاط صور فضائية بزوايا مختلفة وبدقة غير معهودة للمنطقة.
- رصد هلال شهر شوال.
- تجربة فصل السوائل Phase Separation.

وسنتكلم هنا عن التجربة الأخيرة فقط بشكل مبسط نظراً لأهميتها في دراسة النفط العربي في ظروف انعدام الجاذبية.

نعلم أنه عندما يختلط الزيت مع الماء ينفصلان عن بعضهما بسبب عدم قابلية ذوبان أحدهما في الآخر، هذه الظاهرة تعلل من الناحية الكيميائية والفيزيائية من خلال قوانين الكثافة والتوتر السطحي للسوائل، ووجود قوى ربط بين جزيئات السوائل المختلفة بعضها ببعض، أو عدم وجودها. وهذه

الأخيرة عبارة عن قوى ربط ضعيفة سريعة التكوين والتلاشي، مثل: الروابط الأيونية الهيدروجينية وقوى تجاذب فان دير فالس وغيرها. هذه التجربة التي خطط لها الفريق العلمي ليست جديدة على التجارب التي أجريت في الفضاء من قبل، ولكن الجديد فيها أنها تجرى لأول مرة على عينات من خليط الماء وزيت البترول العربي الخام. وكان من أهدافها التوصل إلى تحديد هذه القوى المختلفة للوصول إلى أفضل الظروف الممكنة لفصل الزيت الخام من المياه الجوفية المختلطة به، كما أن المعلومات الأساسية عن طبيعة الفصل وطريقته قد تؤدي إلى ابتكار طريقة في المستقبل تفيد في استخراج كمية أكبر من النفط من باطن الأرض لا تتوافر بالطرق المستخدمة حالياً.

على اليمين حبوب السمسم الغنية بالزيوت «نحو 50 % من وزنها زيت السمسم، إضافة إلى 30 % من البروتين وكمية من الألياف» في الوسط كأس بها عدة أملاح مذابة، مثل ملح الطعام كلوريد الصوديوم وكلوريد الماغنسيوم، وعلى اليسار قارورة بها زيت نفط خام به عدة مكونات من الهيدروكربونات. كان الهدف من التجربة تقدير كفاءة المياه المالحة نسبيًا « تماثل المياه الجوفية» في استخلاص مختلف أنواع الزيوت تحت ظروف انخفاض الجاذبية الأرضية. المصدر : الفريق العلمي.

• إنجازات الرحلة الفضائية التي قام بها الأمير سلطان في الفضاء

- أول رحلة للمكوك نفسه تتم في أقصر فترة زمنية ما بين رحلتين متعاقبتين
- أول رحلة أنجزت خلالها جميع المهمات المكلفة دون مشكلات تذكر
- كانت تحمل أول عربي مسلم إلى الفضاء.
- أول قمر عربي صناعي يطلقه مكوك فضاء.
- أول رائد فضاء من خارج رحلته.
- أول رائد فضاء أنجز التدريب المطلوب في أقصر مدة زمنية في تاريخ ناسا
- أول رحلة فضاء تضم رواد فضاء من ثلاث جنسيات مختلفة.
- أول رحلة مكوك أسهمت في تجارب» حرب النجوم « .
- أول صيام وصلاة مسلمة في الفضاء.
- أول تختيم للقرآن في الفضاء.

• رائد الفضاء عبد المحسن البسام

العميد عبدالمحسن البسام ضابط متقاعد في سلاح الجو الملكي السعودي ورائد فضاء سابق وكان احتياطي متخصص الحمولة وعمل كـ قائد احتياطي لمركبة فضائية، من مواليد مدينة عُنيزة ويقيم حاليًا بمدينة الخبر، حاصل على درجة البكالوريوس في علوم الطيران من كلية الملك فيصل الجوية بالرياض، وتبلغ حصيلة البسام كطيار أكثر من 2,600 ساعة طيران قضاها في قيادة الطائرات المقاتلة والنفاثة. عمل البسام مدرباً على مقاتلات (F5) من عام 1973م وحتى 1984م حيث تم اختياره ضمن اختيارات دقيقة من وكالة «ناسا» ليكون رائدَ فضاء احتياطي على المكوك الفضائي الأمريكي «ديسكفري» مع الأمير سلطان بن سلمان في مهمة إطلاق القمر الصناعي إلى الفضاء والتي أمضى فيها 7 أيام حيث عاد إلى الأرض مع رفقائه بعد اتمام أهم رحلة فضائية في تاريخ المملكة.

الرائد عبد المحسن البسام في الوسط.

رائد الفضاء سلطان وزميله البسام أثناء التدريب على التعامل مع انعدام الجاذبية الأرضية على متن طائرة بوينج KC135 مجهزة لذلك.

سلطان بن سلمان وعلى يمينه باتريك بودري، وشانون لوسيد، وستيفن نايجيل وأمامهم
جون فابيان وانيل براند نستين، وجون كرايتون.

رائد الفضاء العربي خلف «براندستين» قائد الرحلة و كريتون طيار الرحلة في طريقهم إلى الحافلة
التي سوف تقلهم إلى منصة الإطلاق - فجر يوم 17 يونيو 1985 م الموافق 20 رمضان 1405هـ

خلال الاحتفال بمرور 25 عاما على رحلة الفضاء أثناء انعقاد المؤتمر السعودي الأول للفضاء والطيران والذي نظمته مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية في الرياض يوم 2 أكتوبر 2010م (23 شوال 1431هـ) يبدو رائد الفضاء العربي متوسطا كبار مسؤولي وكالة الفضاء الأمريكية «ناسا» ومن بينهم رئيسها آنذاك تشارلز بولدن الثالث على اليسار وجورج أبي كبير الإداريين آنذاك الخامس من اليسار). وبعض الرواد الذين شاركوا في الرحلة وكذلك د. محمد السويل رئيس المدينة آنذاك ونائبه الأمير الدكتور تركي بن محمد آل سعود، وخالد بن فهد السديري والدكتور عبد الله الدباغ رئيس الفريق العلمي.

• رائد الفضاء علي القرنـــي

علي القرني، رائد فضاء سعودي وطيّار متمرس، أحد رواد الفضاء ضمن طاقم الرحلة لمحطة الفضاء الدولية. خلال حياته المهنية الطويلة، حصل على العديد من الدورات في المجالات المتعلقة بالطيران وغير الطيران، وتسلّح بمهارات متقدّمة في إدارة الفريق ورقمنة البيانات. ونظرًا لكونه طيّارًا متمرّسًا حاصلاً على تدريبات صارمة ومكثّفة ومتمكّنًا من أداء المهام المكلّف بها على أكمل وجه، خوّلته جدارته نحو أداء مهمته في الرحلة القائمة على أداء التجارب العلمية بكفاءة عالية وتنفيذ التوجيهات الدقيقة لإتمامها وفق معاييرها المنشودة.

وفيما يتعلق بالمجال الأكاديمي للقرني، فهو حاصل على درجة البكالوريوس في علوم الطيران من أكاديمية الملك فيصل الجوية، ودبلوم في علوم الطيران من قاعدة فانس الجوية في جنوب إنيد، أوكلاهوما، وهو طيار متمرس على طائرات (F-15 SA). وقد قضى 12 عاما من الخبرة في مجال طائرات (F-15 SA)، وعنده 2387 ساعة طيران.

في 12 فبراير 2023م اختير ضمن طاقم بعثة AX-2 الفضائية من قبل وكالة الفضاء السعودية.

• رائدة الفضاء ريانة برناوي

ريانة برناوي باحثة في الطب الحيوي ورائدة فضاء. في 12 فبراير 2023م اختيرت ضمن طاقم مهمة AX-2 الفضائية من قبل وكالة الفضاء السعودية لتصبح أول إمرأة سعودية تذهب إلى الفضاء.

وهي حاصلة على درجة البكالوريوس في العلوم الطبية الحيوية من جامعة أوتاجو. كما أنها حاصلة على درجة الماجستير في العلوم الطبية الحيوية من جامعة الفيصل، حيث درست التصاق الخلايا الجذعية لسرطان الثدي.

عندما تم اختيارها كانت تعمل كفني مختبر أبحاث في مستشفى الملك فيصل التخصصي ومركز الأبحاث بالرياض. وكجزء من المهمة، تقوم بإجراء تجارب مهمة في مجالها.

وبذلك تُحقق السعودية أكبر نجاحاتها في رحلات الفضاء، عبر التاريخ، حيث خرج منها أول رائدي فضاء، كما خرجت منها أول رائدة فضاء عربية، في رحلات فضائية تتصدر المشهد عبر الزمان، ويحكي عنها الأجيال جيلًا بعد جيل، حيث سخرت كافة المستلزمات لهذه الرحلة الفضائية حتى تلقى أثرها العلمي على مستوى العالم أجمع.

رائد الفضاء عليّ القرني (في المقدمة إلى اليمين)، ورائدة الفضاء ريانة برناوي (في المقدمة إلى اليسار) وهما يستعدان للانطلاق.

• التجارب التي قام بها علي القرني وريانة برناوي في الفضاء

أتم رائدا الفضاء السعوديان علي القرني وريانة برناوي مهمتهما العلمية في محطة الفضاء الدولية، وجاءت الرحلة كجزء من برنامج المملكة لرواد الفضاء ويهدف إلى تأهيل كوادر سعودية متمرسة؛ لخوض رحلات فضائية طويلة وقصيرة المدى، والمشاركة في التجارب العلمية، والأبحاث الدولية، والمهام المستقبلية المتعلقة بالفضاء، والاستفادة من الفرص الواعدة التي يقدمها قطاع الفضاء وصناعاته عالمياً، والإسهام في الأبحاث التي تصبّ في صالح خدمة البشرية في عدد من المجالات ذات الأولوية مثل الصحة، والاستدامة، وتكنولوجيا الفضاء. استغرقت المهمة العلمية الفضائية نحو 10 أيام في محطة الفضاء الدولية، حيث أنجز الرائدان عدداً من التجارب العلمية أبرزها:

- قياس المؤشرات الحيوية عن طريق الدم، وتهدف هذه التجربة إلى دراسة تغييرات المؤشرات الحيوية في الدم، والتي تبين أنسجة الدماغ الوظيفية في مهمات الفضاء قصيرة المدى؛ لتحديد ما إذا كانت هذه الرحلات آمنة للدماغ أم لا.

- تجربة التغيير في طول التيلومير، والهادفة إلى قياس تأثير رحلات الفضاء قصيرة المدى على طول التيلومير

- تجربة قياس الحدقة لقياس الضغط داخل الجمجمة، حيث تهدف التجربة إلى استخدام جهاز أوتوماتيكي لقياس الحدقة في مهمة الفضاء قصيرة المدى؛ لقياس أي تغييرات في الضغط داخل الجمجمة، وتعزيز المعرفة في المتلازمة العصبية – العينية المرتبطة بالرحلات الفضائية (SANS).

- تجربة استخدام تخطيط أمواج الدماغ لقياس النشاط الكهربائي في الدماغ، بهدف دراسة تأثير بيئة الجاذبية الصغرى على النشاط الكهربائي في الدماغ، وذلك باستخدام جهاز متنقل يقوم بعمل تخطيط أمواج للدماغ، إضافة إلى قياس قطر غلاف العصب البصري لغرض تحديد قياس قطر غلاف العصب البصري لرواد الفضاء خلال مهمة الفضاء قصيرة المدى، كما سيجري الفريق اختبارات في الإرواء الدماغي وتعديلات وضع الدماغ في الجاذبية الصغرى، عبر استخدام التنظير الطيفي للأشعة القريبة من تحت الحمراء كتقنية غير جراحية؛ لقياس الإرواء الدماغي وتعديلات وضع الدماغ في الجاذبية الصغرى.

- الاستمطار في الجاذبية الصغرى»، وتهدف التجربة إلى دراسة احتمالية الاستمطار في بيئة الجاذبية الصغرى؛ لمعرفة تطبيقاته في المستوطنات على سطح القمر والمريخ.

- تجربة علوم الخلايا، وتهدف التجربة إلى فهم كيفية تغير الاستجابة الالتهابية في الفضاء، وخصوصاً التغييرات على عمر الحمض النووي الريبونووي المراسل، وهو جزيء أساسي لإنتاج البروتينات المؤدية للالتهاب، كما استخدم نموذج خلايا مناعية لمحاكاة استجابة الالتهاب للعلاج الدوائي أثناء الجاذبية الصغرى في الفضاء.

- أجرى الطاقم 3 تجارب توعوية وتعليمية في الجاذبية الصغرى في بث مباشر يستهدف الطلاب السعوديين وتمكينهم من التفكير النقدي في تأثير الجاذبية الصغرى على سلوك ونتائج تجاربهم منها تجربة انتشار الألوان السائلة، واستخدم في هذه التجربة مواد لزجة متعددة لخلق حركة سريعة ملونة في

السوائل، ومقارنة الأشكال والسرعة المرئية في الفضاء مقارنة على الأرض. واستهدف التجربة الطلاب من سن 9 إلى 12 سنة، وتجربة الطائرة الورقية الفضائية، وتهدف التجربة إلى تحديد آثار الجاذبية الصغرى على السلوك الديناميكي الهوائي للطائرة الورقية، وتستهدف الطلاب من سن 9 إلى 18 سنة.

- تجربة أنماط انتقال الحرارة في الأرض مقارنة بالفضاء، وسيتغير خلال التجربة لون مادة اللوحة الساخنة مع الحرارة، وسيتمكن الطلاب من اكتشاف التباين الزمني في نقل الحرارة وأنماطها في الفضاء، ومقارنتها مع الأرض. وتستهدف التجربة الأعمار من 15 إلى 18 سنة.

وصول رائدي الفضاء علي القرني وريانة برناوي، بصحبة طاقم المهمة الفضائية AX- 2 إلى محطة الفضاء الدولية (ISS)، لإجراء تجارب علمية وبحثية .تم تنظيم الرحلة بواسطة شركة «أكسيوم سبيس.

الفصل الثاني

المجموعة الشمسية

مُقَدِّمَة

المجموعة الشمسية Solar System هي النظام المرتبط بجاذبية الشمس والأجرام التي تدور حولها. تشكل أكبر هذه الأجرام نظامًا كوكبيًا مكونًا من ثمانية كواكب بالترتيب من الشمس: أربعة كواكب أرضية، هي عطارد والزهرة والأرض والمريخ؛ وأربعة كواكب عملاقة، اثنان من عمالقة الغاز، المشتري وزحل، واثنين من عمالقة الجليد، أورانوس ونبتون.

الكواكب الأرضية لها سطح محدد وتتكون في معظمها من الصخور والمعادن. تتكون العمالقة الغازية في الغالب من الهيدروجين والهيليوم، بينما تتكون العمالقة الجليدية في الغالب من مواد متطايرة مثل الماء والأمونيا والميثان. في بعض النصوص، تسمى هذه الكواكب الأرضية والعملاقة كواكب المجموعة الشمسية الداخلية وكواكب المجموعة الشمسية الخارجية على التوالي.

تشكلت المجموعة الشمسية قبل 4.6 بليون سنة من انهيار جاذبية سحابة جزيئية عملاقة بين النجوم. وبمرور الوقت، شكلت السحابة الشمس وقرصًا كوكبيًا أوليًا اندمجا تدريجيًا لتكوين الكواكب والأجرام الأخرى.

وهذا هو السبب في أن الكواكب الثمانية لها مدار يقع بالقرب من المستوي نفسه. في الوقت الحاضر، 99.86 % من كتلة المجموعة الشمسية موجودة في الشمس، ومعظم الكتلة المتبقية موجودة في كوكب المشتري. ستة كواكب والعديد من الأجرام الأخرى لها أقمار طبيعية أو أقمار تدور حولها. جميع الكواكب العملاقة وبعض الأجرام الصغيرة محاطة بحلقات كوكبية تتكون من الجليد والغبار وأحيانًا الأقمار الصغيرة.

هناك عدد غير معروف من الكواكب القزمة الأصغر حجما وعدد لا يحصى من الأجرام الصغيرة التي تدور حول الشمس. تتوزع هذه الأجرام في حزام الكويكبات الذي يقع بين مداري المريخ والمشتري، وحزام كويبر، وهو القرص المتناثر الذي يقع خلف مدار نبتون وفي مناطق أبعد من المجموعة الشمسية (وفي هذه الحالة يجري تصنيفها على أنها أجرام نبتونية عابرة تمامًا Trans-Neptunian Objects).

هناك إجماع بين علماء الفلك على تصنيف الأجرام التسعة اللاحقة على أنها كواكب قزمة: الكويكب سيريس، وأجرام حزام كويبر بلوتو، وأوركوس، وهوميا، وكواوار، وماكيماكي، والأجرام ذات الأقراص المتناثرة غونغونغ، وإيريس، وسيدنا والعديد من مجموعات الأجرام الصغيرة، بما في ذلك المذنبات وسحب الغبار بين الكواكب، تتنقل بحرية بين مناطق المجموعة الشمسية.

تخلق الرياح الشمسية، وهي تيار من الجسيمات المشحونة التي تتدفق إلى الخارج من الشمس، منطقة تشبه الفقاعة تعرف باسم الغلاف الشمسي. الغلاف الشمسي هو النقطة التي يكون فيها الضغط الناتج عن الرياح الشمسية مساويًا للضغط المعاكس للوسط البينجمي؛ يمتد إلى حافة القرص المبعثر.

سحابة أورت، التي يُعتقد أنها مصدر المذنبات طويلة الأمد، قد توجد أيضًا على مسافة أبعد بنحو ألف مرة من الغلاف الشمسي. وأبعد من ذلك هي نهاية المجموعة الشمسية. تنتمي المجموعة الشمسية إلى مجرة درب التبانة، وأقرب نجم إلى المجموعة الشمسية (باستثناء الشمس) هو نجم بروكسيما سنتوري Proxima Centauri الذي يقع على مسافة 4.24 سنة ضوئية.

نشـــأة المجموعـــة الشمسيـــة

تعـود الأفـكار المتعلقـة بأصـل العالـم ومصيـره إلـى أقـدم الكتابـات المعروفـة؛ ومـع ذلـك، طـوال ذلـك الوقـت تقريبًـا، لـم تكـن هنـاك محاولـة لربـط مثـل هـذه النظريـات بوجـود «المجموعـة الشمسـية»، وذلـك ببسـاطة لأنـه لـم يكـن يُعتقـد عمومًـا أن المجموعـة الشمسـية، بالمعنـى الـذي نفهمـه حاليًـا، موجـودةً.

كانـت الخطـوة الأولـى نحـو نظريـة تكويـن المجموعـة الشمسـية وتطورهـا هـي القبـول العـام لمركزيـة الشـمس، التـي وضعـت الشـمس في مركـز النظـام والأرض في مـدار حولهـا. جـرى تطويـر هـذا المفهـوم قبـل آلاف السـنين (اقترحـه أريسـتارخوس السـاموسـي في وقـت مبكـر مـن عـام 250 قبـل الميـلاد)، لكنـه لـم يُقبـل علـى نطـاق واسـع حتـى نهايـة القـرن السـابع عشـر. يعـود أول اسـتخدام مسـجل لمصطلـح «المجموعـة الشمسـية» إلـى عـام 1704.

لقـد سـقطت النظريـة القياسـية الحاليـة لتكويـن المجموعـة الشمسـية، وهـي الفرضيـة السـديمية، في صالحهـا وخرجـت عـن نطاقهـا منـذ صياغتهـا مـن قبـل إيمانويـل سـويدنبورج، وإيمانويـل كانـط، وبييـر سـيمون لابـلاس في القـرن الثامـن عشـر.

كان النقـد الأكثـر أهميـة لهـذه الفرضيـة هـو عـدم قدرتهـا الواضحـة علـى تفسـير النقـص النسـبي للزخـم الـزاوي للشـمس عنـد مقارنتهـا بالكواكـب. ومـع ذلـك، منـذ أوائـل الثمانينـات، أظهـرت الدراسـات التـي أجريـت علـى النجـوم الفتيـة أنهـا محاطـة بأقـراص باردة مـن الغبـار والغـاز، تمامًـا كمـا تنبـأت الفرضيـة السـديمية، ممـا أدى إلـى إعـادة قبولهـا.

إن فهـم الكيفيـة التـي مـن المتوقـع أن تسـتمر بهـا الشـمس في التطـور يتطلـب فهمًـا لمصـدر قوتهـا. أدى تأكيـد آرثـر سـتانلي إدينغتـون لنظريـة ألبـرت أينشـتاين

في النسبية إلى إدراكه أن طاقة الشمس تأتي من تفاعلات الاندماج النووي في قلبها، حيث يندمج الهيدروجين في الهيليوم.

وفي عام 1935م، ذهب إدينغتون إلى أبعد من ذلك واقترح أن عناصر أخرى قد تتشكل أيضًا داخل النجوم. وقد أوضح فريد هويل هذه الفرضية بالقول بأن النجوم المتطورة التي تسمى العمالقة الحمراء خلقت العديد من العناصر الأثقل من الهيدروجين والهيليوم في قلبها. عندما يتخلص العملاق الأحمر أخيرًا من طبقاته الخارجية، سيتم إعادة تدوير هذه العناصر لتكوين أنظمة نجمية أخرى.

لقد تشكلت المجموعة الشمسية قبل 4.568 بليون سنة من انهيار الجاذبية لمنطقة داخل سحابة جزيئية كبيرة. من المحتمل أن يبلغ عرض هذه السحابة الأولية عدة سنوات ضوئية، وربما ولّدت عدة نجوم.

كما هو الحال في السحب الجزيئية، تتكون هذه السحب في معظمها من الهيدروجين، مع بعض الهيليوم، وكميات صغيرة من العناصر الأثقل التي جرى دمجها بواسطة الأجيال السابقة من النجوم. مع انهيار المنطقة التي ستصبح فيما بعد المجموعة الشمسية، والمعروفة باسم سديم ما قبل الطاقة الشمسية، أدى الحفاظ على الزخم الزاوي إلى دورانها بشكل أسرع. وأصبح المركز، حيث تتجمع معظم الكتلة، أكثر سخونة بشكل متزايد من القرص المحيط. مع دوران السديم المنكمش بشكل أسرع، بدأ بالتسطح ليصبح قرصًا كوكبيًا أوليًا يبلغ قطره نحو 200 وحدة فلكية (30 بليون كم) ونجمًا أوليًا ساخنًا وكثيفًا في المركز.

تشكلت الكواكب من خلال التراكم من هذا القرص، حيث جذب الغبار والغاز بعضهما بعضًا، واتحدوا لتكوين أجرام أكبر من أي وقت مضى. ربما كانت مئات الكواكب الأولية موجودة في المجموعة الشمسية المبكر، لكنها إما

اندمجت أو جرى تدميرها أو قذفها، تاركة الكواكب والكواكب القزمة وبقايا الأجرام الصغيرة.

نظرًا لارتفاع درجات غليانها، فإن المعادن والسيليكات فقط هي التي يمكن أن توجد في شكل صلب في المجموعة الشمسية الداخلية الساخنة بالقرب من الشمس، وهذه ستشكل في النهاية الكواكب الصخرية مثل عطارد والزهرة والأرض والمريخ. ولأن العناصر المعدنية لا تشكل سوى جزء صغير جدًا من السديم الشمسي، فإن الكواكب الأرضية لا يمكن أن تنمو بشكل كبير جدًا.

تشكلت الكواكب العملاقة (المشتري، وزحل، وأورانوس، ونبتون) أبعد من خط الصقيع، وهي النقطة الواقعة بين مداري المريخ والمشتري حيث تكون المواد باردة بدرجة كافية لتبقى المركبات الجليدية المتطايرة صلبة. كانت الثلوج التي شكلت هذه الكواكب أكثر وفرة من المعادن والسيليكات التي شكلت الكواكب الداخلية الأرضية، مما سمح لها بالنمو بشكل كبير بما يكفي لالتقاط كميات كبيرة من الهيدروجين والهيليوم، وهما أخف العناصر وأكثرها وفرة. بقايا الحطام التي لم تصبح كواكب أبدًا تتجمع في مناطق مثل حزام الكويكبات وحزام كويبر وسحابة أورت.

تخيل لو اختفت حلقات زحل فجأة. وقد شهد علماء الفلك ذلك حول نجم فتي يشبه الشمس يسمى TYC 8241 2652. ولم يعثر على كميات هائلة من الغبار المعروف أنه يدور حول النجم في أي مكان بشكل غير متوقع. يبدو الأمر مثل خدعة الساحر الكلاسيكية: الآن تراها، والآن لا تراها. فقط في هذه الحالة نحن نتحدث عن ما يكفي من الغبار لملء المجموعة الشمسية الداخلية وقد اختفى بالفعل! تمت رؤية قرص مترب حول TYC 8241 2652 لأول مرة بواسطة القمر الصناعي الفلكي بالأشعة تحت الحمراء التابع لناسا (IRAS) في عام 1983م، واستمر في التوهج لمدة 25 عامًا. ويُعتقد أن الغبار ناتج عن تصادمات بين الكواكب المتكونة، وهو جزء طبيعي من تكوين الكواكب. مثل الأرض، يمتص الغبار الدافئ طاقة ضوء النجوم المرئي ويعيد إشعاع تلك الطاقة على شكل إشعاع تحت أحمر أو حراري.

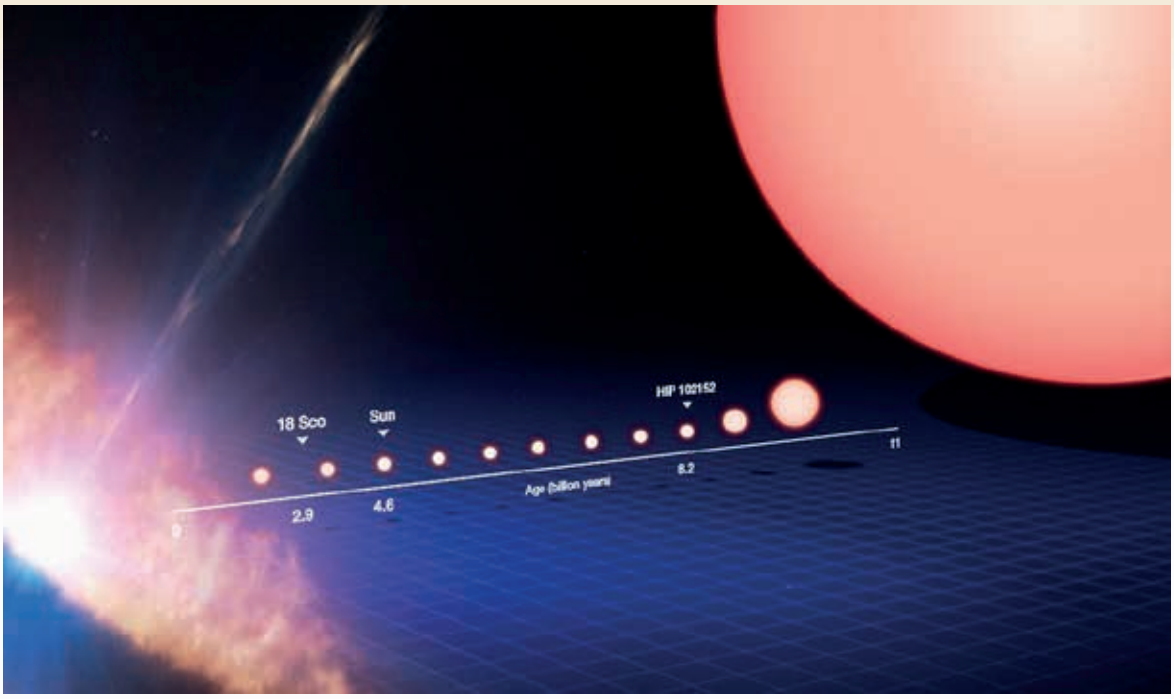
يعد نموذج نيس Nice Model تفسيرًا لإنشاء هذه المناطق وكيف يمكن للكواكب الخارجية أن تكون قد تشكلت في مواقع مختلفة وهاجرت إلى مداراتها الحالية من خلال تفاعلات الجاذبية المختلفة.

وفي غضون 50 مليون سنة، أصبح ضغط وكثافة الهيدروجين في مركز النجم الأولي كبيرًا بما يكفي لبدء الاندماج النووي الحراري. زادت درجة الحرارة ومعدل التفاعل والضغط والكثافة حتى أمكن تحقيق التوازن الهيدروستاتيكي: الضغط الحراري الذي يوازن قوة الجاذبية. عند هذه النقطة، أصبحت الشمس نجم تسلسل رئيس.

ستستمر مرحلة التسلسل الرئيسي، من البداية إلى النهاية، نحو 10 بليون سنة للشمس. وقد خلقت الرياح الشمسية القادمة من الشمس الغلاف الشمسي وجرفت الغاز والغبار المتبقي من قرص الكواكب الأولية إلى الفضاء بين النجوم. ومع تراكم الهيليوم في قلب الشمس، تصبح الشمس أكثر سطوعًا؛ في وقت مبكر من حياتها التسلسلية الرئيسية، كان سطوعها 70 % مما هو عليه اليوم.

ستبقى المجموعة الشمسية كما هو معروف اليوم تقريبًا حتى يتحول الهيدروجين الموجود في قلب الشمس بالكامل إلى هيليوم، وهو ما سيحدث بعد نحو 5 بلايين سنة من الآن. سيكون هذا نهاية لحياة التسلسل الرئيسي للشمس. في ذلك الوقت، سينكمش قلب الشمس مع اندماج الهيدروجين الذي يحدث على طول القشرة المحيطة بالهيليوم الخامل، وسيكون إنتاج الطاقة أكبر مما هو عليه حاليًا.

ستتوسع الطبقات الخارجية للشمس إلى نحو 260 مرة قطرها الحالي، وستصبح الشمس عملاقًا أحمر. بسبب زيادة مساحة سطح الشمس، سيكون سطح الشمس أكثر برودة (2330 درجة مئوية في أبرد حالاته) مما هو عليه في التسلسل الرئيس.



نظرة عامة على تطور الشمس، التي هي نجم التسلسل الرئيس من النوع G. بعد 12 بليون سنة من تشكلها بواسطة القرص الكوكبي الأولي للنظام الشمسي، ستتوسع الشمس لتصبح عملاقًا أحمر؛ سيتم ابتلاع عطارد والزهرة وربما الأرض.

من المتوقع أن تؤدي الشمس المتوسعة إلى تبخير عطارد وكذلك الزهرة، وجعل الأرض غير صالحة للسكن (وربما تدميرها أيضًا). وفي نهاية المطاف، سيكون اللب ساخنًا بدرجة كافية لاندماج الهيليوم؛ سوف تحرق الشمس الهيليوم لجزء من الوقت الذي تحرق فيه الهيدروجين في القلب.

الشمس ليست ضخمة بما يكفي لبدء اندماج العناصر الأثقل، وسوف تتضاءل التفاعلات النووية في اللب. سيتم قذف طبقاته الخارجية إلى الفضاء، تاركًا وراءه قزمًا أبيض كثيفًا، تبلغ كتلته نصف كتلة الشمس الأصلية ولكن بحجم الأرض فقط. ستشكل الطبقات الخارجية المقذوفة ما يعرف بالسديم

الكوكبي، مما يعيد بعض المواد التي شكلت الشمس - ولكنها حاليًا غنية بعناصر أثقل مثل الكربون - إلى الوسط البينجمي.

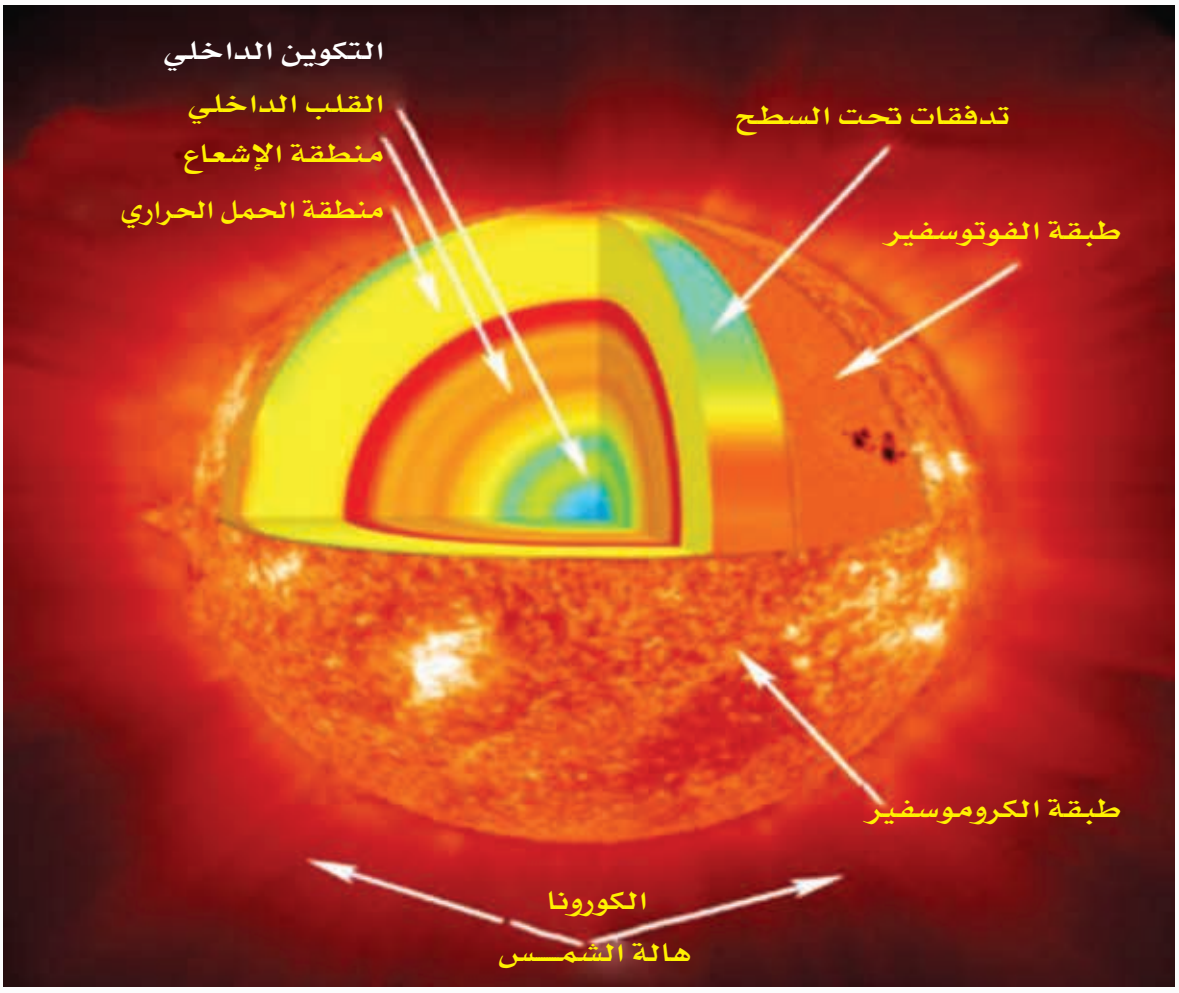
يقدر علماء الفلك أن الحالة الحالية للنظام الشمسي لن تتغير بشكل جذري حتى تقوم الشمس بدمج كل وقود الهيدروجين الموجود في قلبها تقريبًا إلى الهيليوم، لتبدأ تطورها من التسلسل الرئيسي لمخطط هيرتزسبرونغ-راسل إلى مرحلتها العملاقة الحمراء.

وستستمر المجموعة الشمسية في التطور حتى ذلك الحين. في النهاية، من المرجح أن تتوسع الشمس بدرجة كافية لتطغى على الكواكب الداخلية (عطارد والزهرة وربما الأرض)، ولكن دون الكواكب الخارجية، بما في ذلك المشتري وزحل.

بعد ذلك، سيتم تقليل حجم الشمس إلى حجم قزم أبيض، وستستمر الكواكب الخارجية وأقمارها في الدوران حول هذه البقايا الشمسية الضئيلة. قد يكون هذا التطور المستقبلي مشابهًا للاكتشاف المرصود للكوكب MOA-2010-BLG-477L b، وهو كوكب خارجي بحجم كوكب المشتري يدور حول نجمه القزم الأبيض المضيف MOA-2010-BLG-477L.

عمومًا فإن العمر النظري للشمس والقمر إلى حد ما أقل تعقيدًا بكثير من الكواكب مثل الأرض، لأن الأرض مصنوعة من المواد الصلبة والسوائل والغازات، في حين أن الشمس هي في الأساس مجرد كرة كبيرة من الغاز. هذا يجعل من الممكن لعلماء الفيزياء الفلكية كتابة نماذج رياضية، استنادًا إلى قوانين الفيزياء، التي تكرر كيف تتشكل النجوم مثل الشمس وتتطور، وفي النهاية تواجه مصيرها الطبيعي إما كمستعر أعظم أو قزم أبيض، اعتمادًا على حجمه. وفقًا لهذه الحسابات، فإن الشمس ليست نجمًا كبيرًا بما يكفي لتنفجر مستعرا أعظم

بمجرد احتراقها ؛ بدلاً من ذلك، سوف يتخلص من أجزائه الخارجية ويترك وراءه نجمًا قزمًا أبيض كثيفًا وساخنًا لم يعد ينتج أي حرارة جديدة. بناءً على هذه الحسابات، والتكوين الحالي للشمس ودرجة حرارتها، يتراوح عمر الشمس الآن بين 4.5 و 5.5 مليار سنة. يبدو هذا أقدم قليلاً من عمر النظام الشمسي، لكنه عمر تقريبي يعتمد على الحسابات النظرية، وليس عمرًا مُقاسًا بدقة، يتداخل مع عمر النظام الشمسي البالغ 4.6 مليار سنة المستمد من القياسات المباشرة لأعمار النيازك.



يوضح الشكل طبقات الشمس

• اســـتقرار على المـــدى الطويـــل

كانت المجموعة الشمسية بحالةٍ فوضوية على فترات زمنية تمتد لملايين وبلايين السنين، مع مدارات الكواكب مفتوحة للتغيرات طويلة المدى. أحد الأمثلة البارزة على هذه الفوضى هو نظام نبتون-بلوتو، الذي يقع في رنين مداري بنسبة 3:2.

على الرغم من أن الرنين نفسه سيبقى مستقرًا، إلا أنه يصبح من المستحيل التنبؤ بموقع بلوتو بأي درجة من الدقة لأكثر من 10–20 مليون سنة (زمن ليابونوف) في المستقبل. مثال آخر هو الميل المحوري للأرض، والذي، بسبب الاحتكاك الناتج عن تفاعلات المد والجزر مع القمر، لا يمكن حسابه من نقطة ما بين 1.5 و 4.5 بليون سنة من الوقت الحالي.

تكون مدارات الكواكب الخارجية فوضوية على فترات زمنية أطول، حيث يتراوح زمن ليابونوف بين 2–230 مليون سنة. وفي جميع الأحوال، يعني هذا أن موقع الكوكب على طول مداره يصبح في النهاية من المستحيل التنبؤ به بأي قدر من اليقين (لذلك، على سبيل المثال، يصبح توقيت الشتاء والصيف غير مؤكد).

ومع ذلك، في بعض الحالات، قد تتغير المدارات نفسها بشكل كبير. تتجلى هذه الفوضى بشكل أقوى في شكل تغيرات في الانحراف المركزي، حيث تصبح مدارات بعض الكواكب أكثر أو أقل إهليلجية.

في نهاية المطاف، المجموعة الشمسية مستقرة، حيث أنه من غير المحتمل أن يصطدم أي من الكواكب ببعضها البعض أو يتم طرده من النظام خلال بلايين السنين القليلة القادمة. أبعد من ذلك، في غضون خمسة بلايين سنة أو نحو ذلك، قد ينمو انحراف مركز المريخ إلى نحو 0.2، بحيث يقع على مدار عابر للأرض، مما يؤدي إلى تصادم محتمل.

في النطاق الزمني نفسه، قد ينمو انحراف عطارد بشكل أكبر، ويمكن أن يؤدي الاصطدام الوثيق مع كوكب الزهرة نظريًا إلى إخراجه من المجموعة الشمسية تمامًا أو إرساله في مسار تصادمي مع كوكب الزهرة أو الأرض. ويمكن أن يحدث هذا في غضون بليون سنة، وفقًا لعمليات المحاكاة العددية التي يكون فيها مدار عطارد مضطربًا.

• أنظمة حلقات القمر

إن تطور أنظمة القمر مدفوعةً بقوى المد والجزر. سيثير القمر انتفاخًا مديًا في الجسم الذي يدور حوله (القمر الأساسي) بسبب قوة الجاذبية التفاضلية عبر قطر القمر الأساسي. إذا كان القمر يدور في اتجاه دوران الكوكب نفسه وكان الكوكب يدور بشكل أسرع من الفترة المدارية للقمر، فسيتم سحب الانتفاخ باستمرار أمام القمر. في هذه الحالة، ينقل الزخم الزاوي من الدوران الابتدائي إلى دورة القمر التابع. يكتسب القمر الطاقة ويدور بشكل حلزوني نحو الخارج تدريجيًا، بينما يدور القمر الأساسي بشكل أبطأ مع مرور الوقت.

تعد الأرض وقمرها أحد الأمثلة على هذا التكوين. اليوم، القمر مقيد مديًا بالأرض؛ فإحدى دوراته حول الأرض (حاليًا نحو 29 يومًا) تعادل إحدى دوراته حول محوره، لذلك يظهر دائمًا وجهًا واحدًا للأرض. سيستمر القمر في التراجع عن الأرض، وسيستمر دوران الأرض في التباطؤ تدريجيًا. ومن الأمثلة الأخرى أقمار المشتري الغاليلية (بالإضافة إلى العديد من أقمار المشتري الأصغر) ومعظم أقمار زحل الكبيرة.

يحدث سيناريو مختلف عندما يدور القمر حول النجم الأساسي بشكل أسرع من دورانه الأساسي أو يدور في الاتجاه المعاكس لدوران الكوكب. وفي هذه الحالات، يتخلف انتفاخ المد والجزر عن القمر في مداره.

في الحالة الأولى، يتم عكس اتجاه نقل الزخم الزاوي، وبالتالي فإن دوران القوى الأولية يتسارع بينما يتقلص مدار القمر الطبيعي. في الحالة الأخيرة، يكون للزخم الزاوي للدوران والدورة إشارات متعارضة، وبالتالي يؤدي النقل إلى انخفاض في حجم كل منهما (الذي يلغي بعضهما بعضًا).

في كلتا الحالتين، يتسبب تباطؤ المد والجزر في دوران القمر نحو المرحلة الأولية حتى يتمزق بسبب ضغوط المد والجزر، مما قد يؤدي إلى إنشاء نظام حلقات كوكبية، أو يصطدم بسطح الكوكب أو الغلاف الجوي. مثل هذا المصير ينتظر أقمار المريخ فوبوس (في غضون 30 إلى 50 مليون سنة)، وتريتون نبتون (في 3.6 بليون سنة)، وما لا يقل عن 16 قمرا تابعًا صغيرا لأورانوس ونبتون. وقد يصطدم كوكب ديسديمونا التابع لأورانوس بأحد الأقمار المجاورة له.

الاحتمال الثالث هو أن يكون القمر الأساسي والقمر مقفلين مديًا لبعضهما بعضًا. في هذه الحالة، يبقى انتفاخ المد والجزر مباشرة تحت القمر، ولا يوجد انتقال للزخم الزاوي، ولن تتغير الفترة المدارية. بلوتو وشارون مثالان على هذا النوع من التكوين.

لا يوجد إجماع على آلية تشكل حلقات زحل. مع أنّ النماذج النظرية تشير إلى أن الحلقات من المحتمل أن تكون قد تشكلت في وقت مبكر من تاريخ المجموعة الشمسية، إلا أن البيانات الواردة من المركبة الفضائية كاسيني-هايغنز تشير إلى أنها تشكلت في وقت متأخر نسبيًا.

هيكلية المجموعة الشمسية

1. المـــــدارات

تقع الكواكب والأجرام الكبيرة الأخرى التي تدور حول الشمس بالقرب من مستوى مدار الأرض، المعروف باسم مسير الشمس. تدور الأجرام الجليدية الأصغر مثل المذنبات في كثير من الأحيان بزوايا أكبر بكثير من هذا المستوى.

تمتلك معظم الكواكب في المجموعة الشمسية أنظمة ثانوية خاصة بها، تدور حولها أجرام تابعة طبيعية تسمى الأقمار. العديد من أكبر الأقمار الطبيعية تدور بشكل متزامن، حيث يتجه وجه واحد بشكل دائم نحو الأقمار الأم. تحوي الكواكب الأربعة العملاقة على حلقات كوكبية، وهي أشرطة رقيقة من الجزيئات الصغيرة التي تدور حولها في انسجام تام.

نتيجة لتكوين المجموعة الشمسية، تدور الكواكب ومعظم الأجرام الأخرى حول الشمس في اتجاه دوران الشمس نفسه. أي عكس اتجاه عقارب الساعة، كما يُرى من أعلى القطب الشمالي للأرض.

هناك استثناءات، مثل مذنب هالي. تدور معظم الأقمار الأكبر حجمًا حول كواكبها في اتجاه تقدمي، بما يتوافق مع دوران الكواكب؛ قمر نبتون تريتون هو الأكبر الذي يدور بطريقة رجعية معاكسة.

تدور معظم الأجرام الأكبر حجمًا حول محاورها في اتجاه تقدمي بالنسبة إلى مدارها، على الرغم من أن دوران كوكب الزهرة هو دوران رجعي.

للحصول على تقدير أولي جيد، تصف قوانين كبلر لحركة الكواكب مدارات الأجرام حول الشمس. وتنص هذه القوانين على أن كل جرمٍ يتحرك على طول

القطع الناقص مع الشمس في إحدى البؤرتين، مما يتسبب في اختلاف مسافة الجسم من الشمس على مدار المسار خلال عامها.

يُطلق على أقرب نقطة لجرم ما من الشمس اسم الحضيض، بينما يُطلق على أبعد نقطة من الشمس اسمً الأوج. باستثناء عطارد، تكون مدارات الكواكب دائرية تقريبًا، لكن العديد من المذنبات والكويكبات وأجرام حزام كويبر تتبع مدارات إهليلجية تمامًا.

قوانين كيبلر تفسر فقط تأثير جاذبية الشمس على الجرم الذي يدور حولها، وليس قوى جاذبية الأجرام المختلفة على بعضها بعضًا. على النطاق الزمني البشري، يمكن تفسير هذه الاضطرابات الإضافية باستخدام النماذج الرقمية، لكن النظام الكوكبي يمكن أن يتغير بشكل عشوائي على مدى بلايين السنين.

الزخم الزاوي للنظام الشمسي هو مقياس للكمية الإجمالية للزخم المداري والدوراني الذي تمتلكه جميع مكوناته المتحركة. مع أن الشمس تهيمن على المجموعة الشمسية من ناحية الكتلة، إلا أنها تمثل نحو 2 % فقط من الزخم الزاوي.

تمثل الكواكب، التي يهيمن عليها المشتري، معظم الزخم الزاوي المتبقي بسبب مزيج كتلتها ومدارها وبعدها عن الشمس، مع مساهمة كبيرة محتملة من المذنبات.

2. التركـــيب

يتكون الهيكل العام للمناطق المخططة للمجموعة الشمسية من الشمس، وأربعة كواكب داخلية أصغر حجمًا محاطة بحزام من الكويكبات الصخرية في الغالب، وأربعة كواكب عملاقة محاطة بحزام كويبر المكون من أجسام جليدية في الغالب. يقوم علماء الفلك أحيانًا بتقسيم هذا الهيكل بشكل غير رسمي إلى مناطق منفصلة.

تتضمن المجموعة الشمسية الداخلية الكواكب الأرضية الأربعة وحزام الكويكبات. تقع المجموعة الشمسية الخارجية وراء الكويكبات، بما في ذلك الكواكب الأربعة العملاقة. منذ اكتشاف حزام كويبر، تعد الأجزاء الخارجية من المجموعة الشمسية منطقة متميزة تتكون من الأجرام الواقعة خلف نبتون.

المكون الرئيسي للمجموعة الشمسية هو الشمس، وهو نجم منخفض الكتلة يحوي على 99.86 % من كتلة النظام المعروفة وتهيمن عليها الجاذبية. تمثل الكواكب الأربعة الأكبر التي تدور حول الشمس، الكواكب العملاقة، 99 % من الكتلة المتبقية، بينما يشكل المشتري وزحل معًا أكثر من 90 %. تشكل الأجرام المتبقية في المجموعة الشمسية (بما في ذلك الكواكب الأرضية الأربعة والكواكب القزمة والأقمار والكويكبات والمذنبات) أقل من 0.002 % من إجمالي كتلة المجموعة الشمسية.

تتكون الشمس من نحو 98 % من الهيدروجين والهيليوم، وكذلك المشتري وزحل. يوجد تدرج في التركيب في المجموعة الشمسية، نتج عن الحرارة والضغط الخفيف من الشمس المبكرة؛ تلك الأجرام الأقرب إلى الشمس، والتي تتأثر أكثر بالحرارة والضغط الخفيف، تتكون من عناصر ذات نقاط انصهار عالية.

تتكون الأجرام البعيدة عن الشمس إلى حد كبير من مواد ذات نقاط انصهار منخفضة. تُعرف الحدود في المجموعة الشمسية التي يمكن أن تتجمع بعدها تلك المواد المتطايرة باسم خط الصقيع، وتقع على بعد خمسة أضعاف مسافة الأرض من الشمس تقريبًا.

تتكون أجرام المجموعة الشمسية الداخلية في معظمها من مواد صخرية، مثل السيليكات أو الحديد أو النيكل. يتكون كوكب المشتري وزحل بشكل رئيس من غازات ذات نقاط انصهار منخفضة جدًا وضغط بخار مرتفع، مثل الهيدروجين والهيليوم والنيون.

الجليد، مثل الماء والميثان والأمونيا وكبريتيد الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون، لها نقاط انصهار تصل إلى بضع مئات من درجات الكلفن. يمكن العثور عليها على شكل جليد أو سوائل أو غازات في أماكن مختلفة في المجموعة الشمسية.

تشكل المواد الجليدية غالبية أقمار الكواكب العملاقة، بالإضافة إلى معظم أورانوس ونبتون (ما يسمى «عمالقة الجليد») والعديد من الأجرام الصغيرة التي تقع خارج مدار نبتون. يشار إلى الغازات والجليد معًا بالمواد المتطايرة.

• المسافات والمقاييس

الوحدة الفلكية (150.000.000) [AU] كم) هي المسافة من الأرض إلى الشمس إذا كان مدار الكوكب دائريًا تمامًا. للمقارنة، يبلغ نصف قطر الشمس 0.0047 وحدة فلكية (700000 كم). وهكذا، تشغل الشمس 0.00001 % (5–10 %) من حجم الكرة التي يبلغ نصف قطرها حجم مدار الأرض، في حين أن حجم الأرض يبلغ تقريبًا واحد على المليون (10^{-6}) من حجم الشمس. كوكب المشتري، أكبر الكواكب، يبعد 5.2 وحدة فلكية (780.000.000 كم) عن الشمس ويبلغ نصف قطره 71000 كم (0.00047 AU)، في حين أن الكوكب الأكثر بعدًا، نبتون، يبعد 30 AU أو ($4.5x10^9$ كم) عن الشمس.

مع بعض الاستثناءات، كلما كان الكوكب أو الحزام أبعد عن الشمس، زادت المسافة بين مداره ومدار أقرب جسم إلى الشمس. على سبيل المثال، يبعد كوكب الزهرة عن الشمس بنحو 0.33 وحدة فلكية، بينما يبعد كوكب زحل عن المشتري 4.3 وحدة فلكية، ويقع نبتون على بعد 10.5 وحدة فلكية من أورانوس.

وقد بذلت محاولات لتحديد العلاقة بين هذه المسافات المدارية، مثل قانون تيتيوس–بودي ونموذج يوهانس كيبلر المبني على المواد الصلبة الأفلاطونية، لكن الاكتشافات المستمرة أبطلت هذه الفرضيات.

تحاول بعض نماذج المجموعة الشمسية نقل المقاييس النسبية الموجودة في المجموعة الشمسية من الناحية البشرية. بعضها صغير الحجم (وقد يكون ميكانيكيًا – يُسمى Orreries) – في حين يمتد البعض الآخر عبر المدن أو المناطق الإقليمية. أكبر نموذج من هذا النوع، المجموعة الشمسية السويدي، يستخدم ساحة أفيتشي التي يبلغ طولها 110 أمتار في ستوكهولم كبديل للشمس، ووفقًا للمقياس، فإن كوكب المشتري عبارة عن كرة يبلغ قطرها 7.5 متر في مطار ستوكهولم أرلاندا، على بعد 40 كم، في حين أن أبعد نموذج من هذا القبيل هو الجسم الحالي، سيدنا، عبارة عن كرة قطرها 10 سم تقع في لوليا، على بعد 912 كم.

إذا جعلنا قياس المسافة بين الشمس ونبتون إلى 100 متر، فسيكون قطر الشمس نحو 3 سم (نحو ثلثي قطر كرة الجولف)، وستكون الكواكب العملاقة أصغر من نحو 3 مم، وقطر الأرض إلى جانب الكواكب الأرضية الأخرى سيكون أصغر من البرغوث (0.3 ملم) بهذا المقياس.

• الوســـط بين الكـواكـــب

الطبقة الخارجية للغلاف الجوي الشمسي هي الغلاف الشمسي، الذي يتخلل جزءًا كبيرًا من النظام الكوكبي الشمسي. تشع الشمس، جنبًا إلى جنب مع الضوء، تيارًا مستمرًا من الجسيمات المشحونة (البلازما) تسمى الرياح الشمسية. ينتشر هذا التدفق من الجسيمات إلى الخارج بسرعات تتراوح من 900000 كيلومتر في الساعة إلى 2880000 كيلومتر في الساعة، مما يملأ الفراغ بين أجسام المجموعة الشمسية. والنتيجة هي غلاف جوي رقيق ومغبر، يسمى الوسط بين الكواكب، والذي يمتد إلى ما لا يقل عن 100 وحدة فلكية (15 بليون كيلومتر). وبعيدًا عن الغلاف الشمسي، تظل الأجرام الكبيرة مرتبطة بقوة الجاذبية بالشمس، لكن تدفق المادة في الوسط البينجمي يؤدي إلى تجانس توزيع الأجرام الصغيرة الحجم.

يعد الوسط بين الكواكب موطنًا لمنطقتين على الأقل تشبه القرص من الغبار الكوني. الأولى، سحابة الغبار البروجية، تقع في المجموعة الشمسية الداخلية وتسبب الضوء البروجي. ربما تكونت نتيجة الاصطدامات داخل حزام الكويكبات الناجمة عن تفاعلات الجاذبية مع الكواكب. والمرجح حديثًا هو كوكب المريخ.

مصفوفة التلسكوبات الراديوية دون المليمترية في الليل، مضاءة بالفلاش. نلاحظ هنا أنّ ضوء البروج ناجم عن الغبار بين الكواكب.

تمتد سحابة الغبار الثانية من نحو 10 وحدة فلكية (1.5 بليون كيلومتر) إلى نحو 40 وحدة فلكية (6.0 بليون كيلومتر)، ومن المحتمل أنها تكونت نتيجة الاصطدامات داخل حزام كويبر.

النشاط على سطح الشمس، مثل التوهجات الشمسية والانبعاثات الكتلية الإكليلية، يزعج الغلاف الشمسي، مما يخلق طقسًا فضائيًا ويسبب عواصف مغناطيسية على الأرض. تقذف الانفجارات الكتلية الإكليلية والأحداث المشابهة مجالًا مغناطيسيًا وكميات هائلة من المواد من سطح الشمس.

يؤدي تفاعل هذا المجال المغناطيسي والمواد مع المجال المغناطيسي للأرض إلى توجيه الجسيمات المشحونة إلى الغلاف الجوي العلوي للأرض، حيث تخلق تفاعلاتها شفقًا يُرى بالقرب من القطبين المغناطيسيين.

أكبر هيكل مستقر داخل الغلاف الشمسي هو صفيحة تيار الغلاف الشمسي، وهي شكل حلزوني جرى إنشاؤه بواسطة تصرفات المجال المغناطيسي الدوار للشمس على الوسط بين الكواكب.

• صلاحيـــة الحيـــاة

إلى جانب الطاقة الشمسية، فإن السمة الأساسية للمجموعة الشمسية التي تتيح وجود الحياة هي الغلاف الشمسي والمجالات المغناطيسية الكوكبية (بالنسبة للكواكب التي تحوي عليها). تحمي هذه المجالات المغناطيسية المجموعة الشمسية جزئيًا من الجسيمات بين النجوم عالية الطاقة والتي تسمى الأشعة الكونية.

تتغير كثافة الأشعة الكونية في الوسط النجمي وقوة المجال المغناطيسي للشمس على فترات زمنية طويلة جدًا، وبالتالي فإن مستوى اختراق الأشعة الكونية في المجموعة الشمسية يختلف، على الرغم من أن مقداره غير معروف.

يمنع المجال المغناطيسي للأرض أيضًا الغلاف الجوي من التعرض للرياح الشمسية. لا يمتلك كوكب الزهرة والمريخ مجالات مغناطيسية، ونتيجة لذلك تتسبب الرياح الشمسية في نزف غلافهما الجوي تدريجيًا في الفضاء.

تقع منطقة صلاحية السكن في المجموعة الشمسية بشكل تقليدي في المجموعة الشمسية الداخلية، حيث تسمح درجات حرارة سطح الكوكب أو الغلاف الجوي بإمكانية وجود الماء السائل. قد تكون الصالحية للسكن ممكنة أيضًا في المحيطات الموجودة تحت السطح لمختلف أقمار المجموعة الشمسية الخارجية.

• بنيـــة المجموعـــة الشمسيـــة

تتكون المجموعة الشمسية من الشمس وأفراد عائلتها من الكواكب وأقمارها والكويكبات والمذنبات، وكلها تدور حولها بتأثير جاذبيتها الثقالية.

الشمس

تعد الشمس أكبر عضو جاذبية مهيمن في المجموعة الشمسية، ويتم الحفاظ على نظامها الكوكبي في حالة مستقرة نسبيًا وتتطور ببطء من خلال اتباع مدارات معزولة ومقيدة بالجاذبية حول الشمس.

الشمس هي أضخم مكونات المجموعة الشمسية على الإطلاق. كتلتها الكبيرة (تعادل 332900 كتلة أرضية)، تشكل 99.86 % من إجمالي كتلة المجموعة الشمسية، تنتج درجات حرارة وكثافات عالية في قلبها بما يكفي للحفاظ على الاندماج النووي للهيدروجين وتحويله إلى الهيليوم. يؤدي هذا إلى إطلاق كمية هائلة من الطاقة، يشع معظمها في الفضاء على شكل إشعاع كهرومغناطيسي يبلغ ذروته بصورة الضوء المرئي.

ولأن الشمس تقوم بدمج الهيدروجين وتحويله إلى الهيليوم في قلبها، فهي نجم تسلسل رئيس. وبشكل أكثر تحديدًا، فهي نجم تسلسل رئيس من النوع G2، حيث يشير تصنيف النوع إلى درجة حرارته الفعالة. نجوم تسلسل الرئيس الأكثر سخونة تكون أكثر سطوعًا ولكنها أقصر عمرًا.

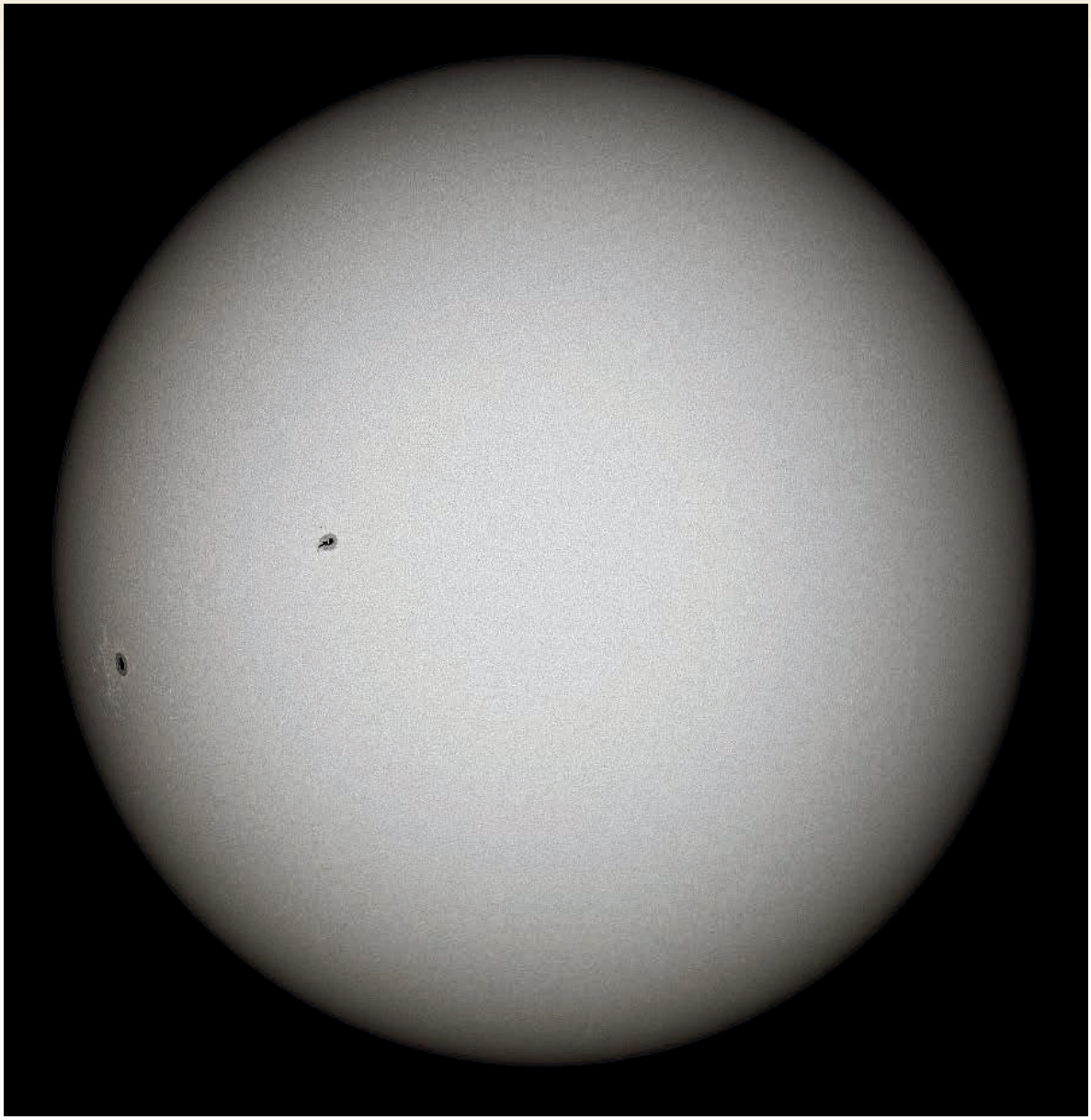
درجة حرارة الشمس متوسطة بين درجة حرارة النجوم الأكثر سخونة ودرجة حرارة أبرد النجوم. من النادر أن تكون النجوم أكثر سطوعًا وسخونة من الشمس، في حين أن النجوم الخافتة والباردة إلى حد كبير، والمعروفة باسم الأقزام الحمراء، تشكل نحو 75 % من النجوم في درب التبانة.

الشـمس مـن نجـوم الجمهـرة الأولـى؛ أي أن لديهـا وفـرة أعلـى مـن العناصـر الأثقـل مـن الهيدروجـين والهيليـوم مقارنـة بالنجـوم الثانيـة الأكبـر سـنًا. تشـكلت عناصـر أثقـل مـن الهيدروجـين والهيليـوم في نـوى النجـوم القديمـة والمتفجـرة، لذلـك كان لا بـد للجيـل الأول مـن النجـوم أن يمـوت قبـل أن يتـم إثـراء الكـون بهـذه الـذرات.

في كل ثانيـة، يدمـج قلـب الشـمس نحـو 600 مليـون طـن مـن الهيدروجـين إلـى الهيليـوم، وفي هـذه العمليـة يحـول 4 ملايـين طـن مـن المـادة إلـى طاقـة. هـذه الطاقـة، التـي يمكـن أن تسـتغرق مـا بـين 10000 إلـى 170000 سـنة للهـروب مـن القلـب، هـي مصـدر ضـوء الشـمس وحرارتهـا.

في المسـتقبل البعيـد، عندمـا يتضـاءل اندمـاج الهيدروجـين في قلـب الشـمس إلـى النقطـة التـي لـن تكـون فيهـا الشـمس في حالـة تـوازن هيدروسـتاتيكي، سـيخضع قلبهـا لزيـادة ملحوظـة في الكثافـة ودرجـة الحـرارة ممـا سـيدفع طبقاتهـا الخارجيـة للتوسـع، ممـا يـؤدي في النهايـة إلـى تحـوّل الشـمس إلـى عمـلاق أحمـر. سـتجعل هـذه العمليـة الشـمس كبيـرة بمـا يكفـي لجعـل الأرض غيـر صالحـة للسـكن بعـد نحـو خمسـة بلايـين سـنة مـن الوقـت الحاضـر. بعـد ذلـك، سـتتخلص الشـمس مـن طبقاتهـا الخارجيـة وتصبـح نوعًـا كثيفًـا مـن النجـوم البـاردة (قـزم أبيـض)، ولـن تقـوم بإنتـاج الطاقـة عـن طريـق الاندمـاج، ولكنهـا سـتبقى تتوهـج وتطلـق الحـرارة مـن اندماجهـا السـابق.

يعـد دوران الأرض ومدارهـا حـول الشـمس أساسًـا لبعـض التقـاويم الشمسـية. التقـويم السـائد المسـتخدم اليـوم هـو التقـويم الغريغـوري الـذي يعتمـد علـى تفسـير القـرن السـادس عشـر القياسـي لحركـة الشـمس الملحوظـة علـى أنهـا حركـة فعليـة.



جرى تصوير الشمس في 8 مايو 2019م بالضوء الأبيض (اللون الحقيقي). البقع الشمسية AR2740 (إلى اليمين) و AR2741 (إلى اليسار) مرئية. تشمل بعض المعالم الأخرى المثيرة للاهتمام البقع البيضاء بالقرب من AR2741، وتغميق الأطراف، وخلايا الحمل الحراري الصغيرة التي تسمى الحبيبات على سطحها.

يقدر أنّ الشمس أكثر سطوعًا من نحو 85 % من النجوم في درب التبانة، ومعظمها من الأقزام الحمراء.

ربما يكون قد تم تشكيل الشمس نتيجة لموجات صادمة من واحد أو أكثر من المستعرات العظمى (السوبرنوفا) القريبة.

يُقترح ذلك من خلال الوفرة العالية للعناصر الثقيلة في المجموعة الشمسية، مثل الذهب واليورانيوم، مقارنة بوفرة هذه العناصر في ما يسمى بنجوم الجمهرة الثانية، النجوم الفقيرة بالعناصر الثقيلة.

من الممكن أن تكون العناصر الثقيلة قد تم إنتاجها من خلال تفاعلات نووية ماصة للحرارة أثناء المستعر الأعظم، أو عن طريق التحول من خلال امتصاص النيوترونات داخل نجم ضخم من الجيل الثاني.

تعتبر الشمس ألمع جسم في سماء الأرض، حيث يبلغ قدرها الظاهري – 26.74. وهذا أكثر سطوعًا بنحو 13 بليون مرة من النجم الأكثر سطوعًا التالي، الشِّعرَى اليَمَانِيّة Sirius، الذي يبلغ قدره الظاهري – 1.46.

يتم تعريف الوحدة الفلكية الواحدة على أنها متوسط المسافة بين مركز الشمس ومركز الأرض، مع أن المسافة تختلف (بنحو +/– 2.5 مليون كيلومتر أو 1.55 مليون ميل) عندما تتحرك الأرض من الحضيض الشمسي على نحو 3 يناير إلى الأوج في نحو 4 يوليو. يمكن أن تتراوح المسافات بين 147,098,074 كم (الحضيض) و 152,097,701 كم (الأوج)، ويمكن أن تتراوح القيم القصوى من 147,083,346 كم إلى 152,112,126 كم.

في متوسط المسافة، ينتقل الضوء من أفق الشمس إلى أفق الأرض في نحو 8 دقائق و20 ثانية، في حين أن الضوء من أقرب النقاط للشمس والأرض يستغرق

نحو ثانيتين أقل. تدعم طاقة ضوء الشمس هذه كل أشكال الحياة تقريبًا على الأرض عن طريق عملية التمثيل الضوئي، وتتحكم في مناخ الأرض وطقسها.

ليس للشمس حدود معينة، لكن كثافتها تتناقص بشكل كبير مع زيادة الارتفاع فوق الغلاف الضوئي. ولأغراض القياس، يعتبر نصف قطر الشمس هو المسافة من مركزها إلى حافة الغلاف الضوئي، وهو السطح المرئي للشمس. وبهذا المقياس، تعد الشمس كرة شبه مثالية مع تفلطح يقدر بـ 9 أجزاء من المليون، مما يعني أن قطرها القطبي يختلف عن قطرها الاستوائي بمقدار 10 كيلومترات فقط.

تأثير المد والجزر للكواكب ضعيف ولا يؤثر بشكل كبير على شكل الشمس. تدور الشمس عند خط الاستواء بشكل أسرع منها عند قطبيها. يحدث هذا الدوران التفاضلي بسبب حركة الحمل الحراري الناتجة عن نقل الحرارة وقوة كوريوليس الناتجة عن دوران الشمس. وفي الإطار المرجعي الذي تحدده النجوم، تبلغ فترة الدوران نحو 25.6 يومًا عند خط الاستواء و33.5 يومًا عند القطبين.

عند النظر إليها من الأرض أثناء دورانها حول الشمس، تبلغ فترة الدوران الظاهرية للشمس عند خط الاستواء نحو 28 يومًا. إذا نظرنا إلى الشمس من نقطة مراقبة فوق القطب الشمالي، فإنها تدور عكس اتجاه عقارب الساعة حول محور دورانها.

• المجموعـــة الشمسية الداخليـــة

المجموعة الشمسية الداخلية هي المنطقة التي تضم الكواكب الأرضية وحزام الكويكبات. تتكون أجرام المجموعة الشمسية الداخلية بشكل أساسي من السيليكات والمعادن، وهي قريبة نسبيًا من الشمس؛ نصف قطر هذه المنطقة بكاملها أقل من المسافة بين مداري المشتري وزحل. وتقع هذه المنطقة أيضًا ضمن خط الصقيع، وهو أقل بقليل من 5 وحدات فلكية (750 مليون كيلومتر) من الشمس.

تحوي الكواكب الأرضية أو الداخلية الأربعة على تركيبات صخرية كثيفة، وأقمار قليلة أو معدومة، ولا تحوي على أنظمة حلقية. وهي في حالة توازن هيدروستاتيكي، وتشكل شكلًا مستديرًا، وخضعت للتمايز الكوكبي، مما تسبب في تراكم العناصر الكيميائية في أنصاف أقطار مختلفة.

توضح هذه الصورة الأحجام النسبية التقريبية للكواكب الأرضية، من اليسار إلى اليمين: عطارد، والزهرة، والأرض، والمريخ. المسافات ليست على نطاق واسع. الكوكب الأرضي هو كوكب يتكون أساسًا من صخور السيليكات. المصطلح مشتق من الكلمة اللاتينية التي تعني الأرض «Terra»، لذلك قد يكون التعريف البديل هو أن هذه الكواكب هي، بطريقة ملحوظة، «شبيهة بالأرض».

وتتكون إلى حد كبير من معادن حرارية مثل السيليكات - التي تشكل قشورها ووشاحها - ومعادن مثل الحديد والنيكل التي تشكل قلبها. ثلاثة من الكواكب الداخلية الأربعة (الزهرة والأرض والمريخ) لديها أجواء كافية لتوليد الطقس؛ تحوي جميعها على فوهات تصادمية وخصائص سطحية تكتونية، مثل الوديان المتصدعة والبراكين.

لا ينبغي الخلط بين مصطلح الكوكب الداخلي والكوكب السفلي، الذي يشير إلى الكواكب الأقرب إلى الشمس من الأرض (أي عطارد والزهرة).

1. كوكب عطارد

يبعد عطارد 0.307–0.588 وحدة فلكية (45.9–88.0 مليون كم) عن الشمس وهو أقرب كوكب إلى الشمس وأصغر كوكب في المجموعة الشمسية، وليس لدى عطارد أقمار طبيعية.

السمات الجيولوجية السائدة هي الفوهات أو الأحواض ذات المقذوفات، وبقايا النشاط البركاني المبكر بما في ذلك تدفقات الصهارة، والتلال المفصصة أو الروبيات التي ربما تكونت نتيجة فترة من الانكماش في وقت مبكر من تاريخ الكوكب.

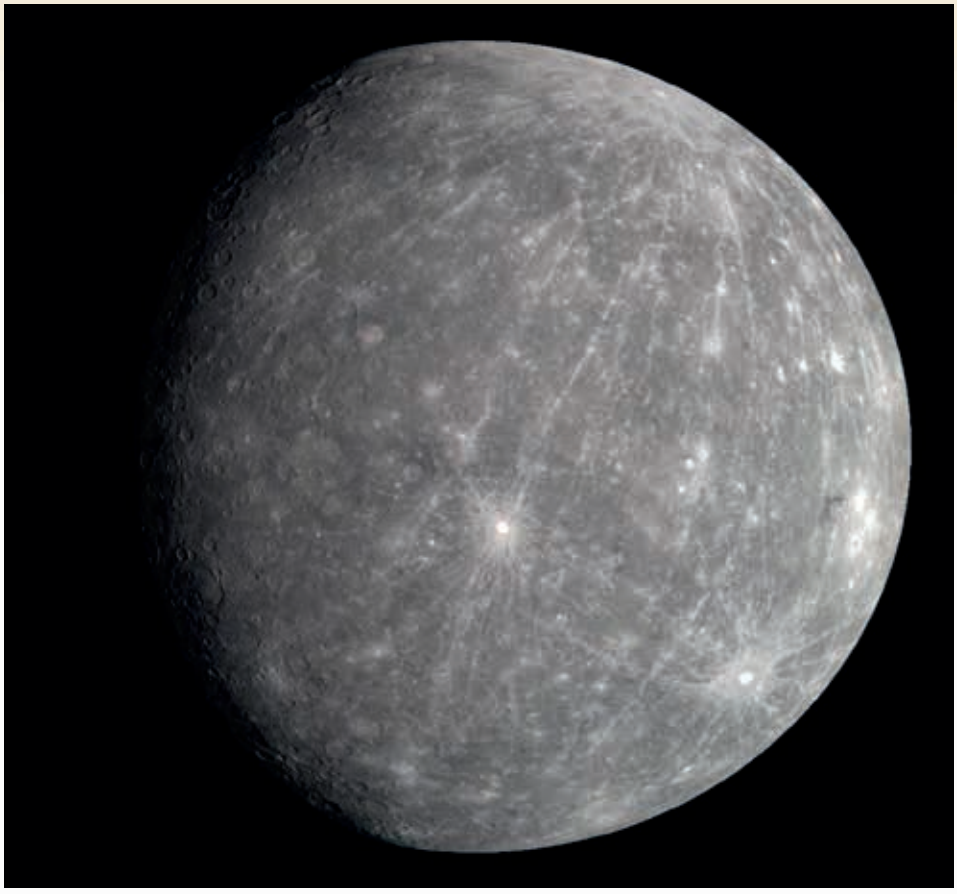
يتكون الغلاف الجوي الهش جدًا لعطارد من جزيئات الرياح الشمسية المحاصرة بالمجال المغناطيسي لعطارد، بالإضافة إلى ذرات انطلقت من سطحه بفعل الرياح الشمسية.

لم يتم حتى الوقت الحالي تفسير سبب جوهره الحديدي الكبير نسبيًا ووشاحه الرقيق بشكل كافٍ. تقول الفرضيات أن طبقاته الخارجية قد جرى

تجريدهـا مـن خـلال اصطـدام عمـلاق، أو أنـه مُنـعَ مـن التراكـم بالكامـل بسـبب طاقـة الشـمس الفتيـة. أُجريـت عمليـات بحـث عـن كويكبـات تـدور في مـدارات مسـتقرة بـين عطـارد والشـمس، ولكـن لـم يكتشـف أي منهـا.

عطـارد هـو الكوكـب الأول مـن الشـمس والأصغـر في المجموعـة الشمسـية. إنـه كوكـب أرضـي ذو سـطح مليء بالفوهـات بسـبب تداخـل أحداث الصـدم. تم الحفاظ علـى هـذه المعالـم جيـدًا نظـرًا لعـدم وجـود نشـاط جيولوجـي علـى الكوكـب، وغلافـه الجـوي ضعيـف جـدًا يسـمى الغـلاف الخارجـي.

مـع أنـه أصغـر كوكـب في المجموعـة الشمسـية حيـث يبلـغ متوسـط قطـره 4880 كيلومتـرًا، أي 38 % مـن قطـر الأرض، إلا أن عطـارد كثيـف بمـا يكفـي ليكـون لـه جاذبيـة سـطح المريـخ نفسـها تقريبًـا. يتمتـع عطـارد بمجـال مغناطيسـي ديناميكـي تبلـغ قوتـه نحـو 1 % مـن قـوة الأرض وليـس لـه أقمـار طبيعيـة.



اللون الحقيقي لعطارد كما يُرى بعين الناظر. (بواسطة بعثة ماسنجر في عام 2008م).

يوجد في قطبي عطارد خزانات كبيرة من المياه الجليدية التي لا تتعرض أبدًا لأشعة الشمس المباشرة، والتي تقدر كتلتها بنحو 0.025–0.25 % من الغطاء الجليدي في القطب الجنوبي. هناك العديد من الفرضيات المتنافسة حول أصول عطارد وتطوره، وبعضها يتضمن الاصطدام مع الكواكب الصغيرة وتبخر الصخور.

نظرًا لأن عطارد قريب جدًا من الشمس، فإن شدة ضوء الشمس على سطحه تتراوح بين 4.59 و10.61 أضعاف طاقة الشمس النموذجية التي تتلقاها الأرض والتي تسمى بالثابت الشمسي.

يدور عطارد حول الشمس في رنين مداري بنسبة 3:2، مما يعني أنه بالنسبة إلى النجوم الخلفية، يدور حول محوره ثلاث مرات بالضبط لكل دورتين يقوم بهما حول الشمس.

على عكس ما هو متوقع، ونظرًا لدوران عطارد البطيء، فإن الراصد على الكوكب سيرى يومًا شمسيًا عطارديًا واحدًا فقط (176 يومًا أرضيًا) كل عامين شمسيين عطارديين (88 يومًا أرضيًا لكل منهما). يمتلك محور عطارد أصغر ميل لأي من كواكب المجموعة الشمسية، نحو 30/1 درجة، كما أن انحراف مداره هو الأكبر بين جميع الكواكب المعروفة في المجموعة الشمسية.

مثل كوكب الزهرة، يدور عطارد حول الشمس ضمن مدار الأرض، مما يجعله يظهر في سماء الأرض فقط كـ «نجم الصباح» أو «نجم المساء» الذي يكون قريبًا نسبيًا من الشمس. وفي اللغة الإنجليزية يسمى (ميركوري) على اسم الإله الروماني مرقوريوس إله التجارة والاتصالات ورسول الآلهة.

عطارد هو أصعب كوكب يمكن الوصول إليه من الأرض لأنه يتطلب أكبر تغيير في سرعة المركبة الفضائية. قامت ثلاث مركبات فضائية فقط بزيارة عطارد اعتبارًا من عام 2023م: حلقت مارينر10- في عامي 1974 و1975م؛ تم إطلاق مركبة ماسنجر MESSENGER في عام 2004م، وحلقت بالقرب من عطارد لأول مرة في عام 2008م، ودارت حوله أكثر من 4000 مرة بين عامي 2011 و2015م؛ حلقت المركبة الفضائية بيبي كولومبو BepiColombo بالقرب من عطارد لأول مرة في عام 2021م، ومن المقرر أن تصل إلى عطارد نهائيًا في عام 2025م، حيث ستقوم بعد ذلك بإدخال مركبتين مداريتين.

عطارد هو أحد الكواكب الأرضية الأربعة في المجموعة الشمسية، مما يعني أنه جرم صخري مثل الأرض. وهو أصغر كوكب في المجموعة الشمسية، حيث

يبلغ نصف قطره الاستوائي 2439.7 كيلومترًا. كما أن عطارد أصغر حجمًا - وإن كان أضخم - من أكبر الأقمار الطبيعية في المجموعة الشمسية، جانيميد وتيتان. يتكون عطارد من نحو 70 % من المعدن و 30 % من مادة سيليكات.

يبدو أن لعطارد قشرة سيليكات صلبة وغطاء يغطي طبقة أساسية معدنية خارجية صلبة، وطبقة أساسية سائلة أعمق، ونواة داخلية صلبة. لا يزال تكوين النواة الغنية بالحديد غير مؤكد، ولكن من المحتمل أنه يحوي على النيكل والسيليكون وربما الكبريت والكربون، بالإضافة إلى كميات ضئيلة من العناصر الأخرى.

كثافة الكوكب هي ثاني أعلى كثافة في المجموعة الشمسية حيث تبلغ 5.427 غرام/سم^3، وهي أقل بقليل من كثافة الأرض البالغة 5.515 غرام/سم^3. إذا تم أخذ تأثير ضغط الجاذبية في الاعتبار من كلا الكوكبين، فإن المواد التي يتكون منها عطارد ستكون أكثر كثافة من تلك الموجودة في الأرض، حيث تبلغ الكثافة غير المضغوطة 5.3 غرام/سم^3 مقابل 4.4 غرام/سم^3 للأرض.

يمكن استخدام كثافة عطارد لاستنتاج تفاصيل بنيته الداخلية. على الرغم من أن الكثافة العالية للأرض تنتج بشكل ملحوظ عن ضغط الجاذبية، خاصة في القلب، إلا أن عطارد أصغر بكثير ومناطقه الداخلية ليست مضغوطة بالقدر نفسه. ولذلك، حتى يتمتع بمثل هذه الكثافة العالية، يجب أن يكون قلبه كبيرًا وغنيًا بالحديد.

يقدر نصف قطر قلب عطارد بـ 2020 ± 30 كيلومترًا، استنادًا إلى النماذج الداخلية المقيدة لتكون متسقة مع عزم القصور الذاتي البالغ 0.346 ± 0.014. ومن ثم فإن نواة عطارد تشغل نحو 57 % من حجمه؛ أما بالنسبة للأرض فتبلغ هذه النسبة 17 %. تشير الأبحاث المنشورة في عام 2007م إلى أن عطارد له قلب منصهر.

يبلـغ سـمك طبقـة الوشـاح والقشـرة 420 كـم. واسـتنادا إلـى بيانـات بعثتـي مارينـر– 10 وماسـنجر، بالإضافـة إلـى عمليـات الرصـد الأرضيـة، يقـدر سـمك قشـرة عطـارد بـ 35 كيلومتـرًا.

ومع ذلك، قد يكون هذا النموذج مبالغًا فيه وقد تبلغ سماكة القشرة 26 ± 11 كم بناءً على نموذج التوازن الهوائي. إحدى السمات المميزة لسطح عطارد هي وجود العديد من التلال الضيقة التي يصل طولها إلى عدة مئات من الكيلومترات. ويعتقد أن هذه تشكلت عندما برد قلب عطارد ووشاحه وانكمش في الوقت الذي كانت فيه القشرة قد تصلبت بالفعل.

تحوي نواة عطارد على نسبة حديد أعلى من تلك الموجودة في أي كوكب آخر في المجموعة الشمسية، وقد اقترحت عدة نظريات لتفسير ذلك. النظرية الأكثر قبولًا على نطاق واسع هي أن عطارد كان لديه في الأصل نسبة معدن إلى سيليكات مشابهة لنيازك الكوندريت الشائعة، والتي يُعتقد أنها نموذجية للمادة الصخرية في المجموعة الشمسية، وكتلة تعادل نحو 2.25 ضعف كتلتها الحالية.

في وقت مبكر من تاريخ المجموعة الشمسية، ربما يكون كوكب عطارد قد اصطدم بكوكب صغير تبلغ كتلته نحو 6 أضعاف كتلة عطارد وعرضه عدة آلاف من الكيلومترات. كان من الممكن أن يؤدي الاصطدام إلى تجريد جزء كبير من القشرة والوشاح الأصليين، تاركًا وراءه اللب كمكون رئيس نسبيًا. تم اقتراح عملية مماثلة، تُعرف باسم فرضية الصدم العملاق، لشرح تكوين قمر الأرض.

وبدلاً من ذلك، ربما يكون عطارد قد تشكل من السديم الشمسي قبل أن يستقر إنتاج الطاقة الشمسية. كان من الممكن أن تكون كتلته ضعف كتلته الحالية في البداية، ولكن مع انكماش الشمس الأولية، يمكن أن تتراوح درجات الحرارة بالقرب من عطارد بين 2500 و3500 كلفن وربما تصل إلى 10000 كلفن.

من الممكن أن يتبخر جزء كبير من الصخور السطحية لعطارد عند درجات الحرارة هذه، مما يشكل جوًا من «البخار الصخري» الذي يمكن أن تحمله الرياح الشمسية بعيدًا.

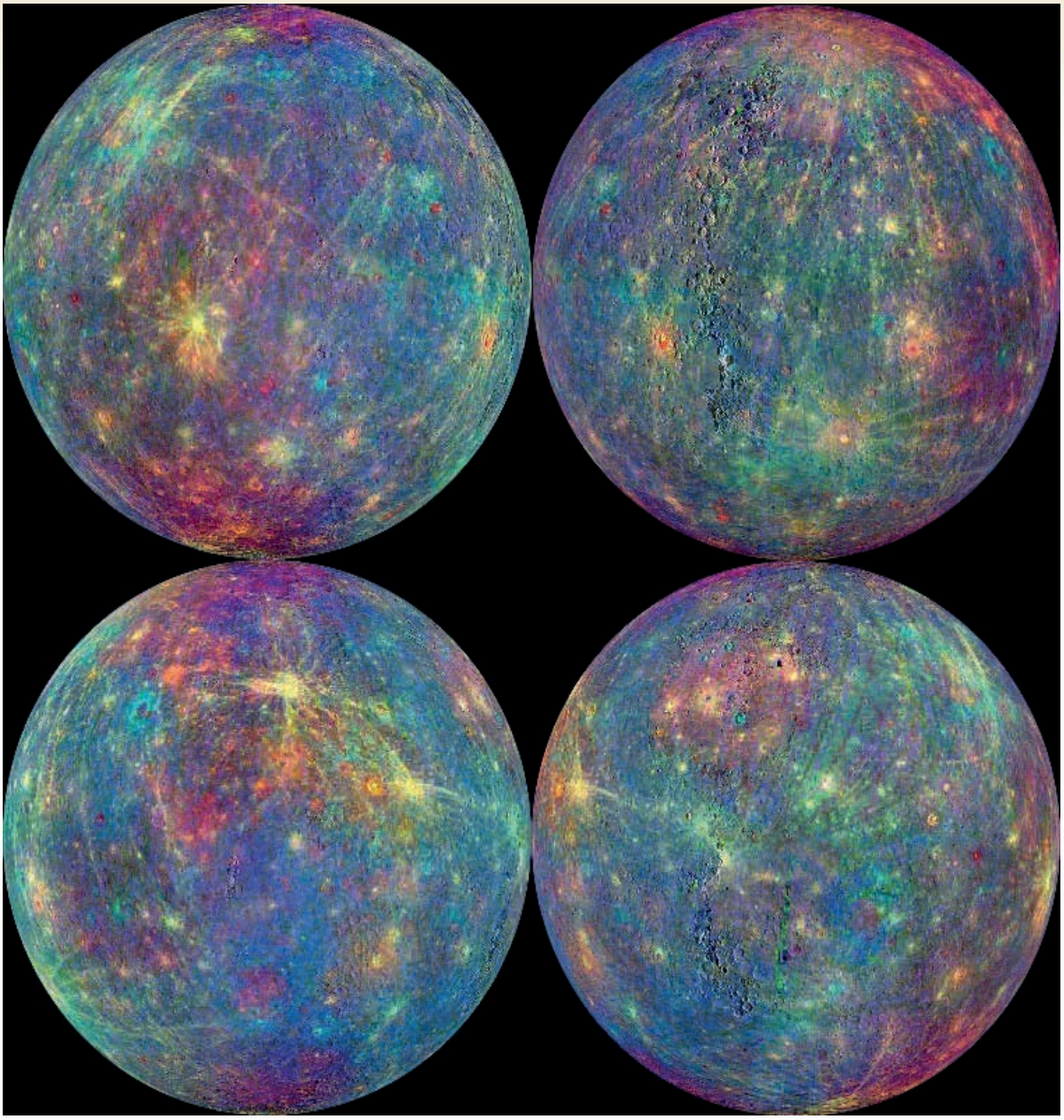
تقترح فرضية ثالثة أن السديم الشمسي تسبب في سحب الجسيمات التي يتراكم منها عطارد، مما يعني أن الجزيئات الأخف قد فقدت من المادة المتراكمة ولم يجمعها عطارد.

تتنبأ كل فرضية بتكوين سطحي مختلف، وتم تكليف بعثتين فضائيتين بمراقبة هذا التكوين. وجدت بعثة ماسنجر الأولى، والتي انتهت في عام 2015م، مستويات أعلى من المتوقع من البوتاسيوم والكبريت على السطح، مما يشير إلى أن فرضية الاصطدام العملاق وتبخر القشرة والوشاح لم يحدثا لأن البوتاسيوم والكبريت المذكورين كانا مدفوعين بالحرارة الشديدة لهذه الأحداث.

وستقوم بعثة (بيبي كولومبو)، التي ستصل إلى عطارد في عام 2025م، بإجراء أرصادٍ لاختبار هذه الفرضيات. ويبدو أن النتائج حتى الوقت الحالي تؤيد الفرضيةَ الثالثة؛ ومع ذلك، هناك حاجة إلى مزيد من التحليل للبيانات.

سطح عطارد مشابه في مظهره لسطح القمر، حيث يُظهر سهولًا واسعة تشبه الفرس وحفرًا ثقيلة، مما يشير إلى أنه كان غير نشط جيولوجيًا منذ بلايين السنين. وهو أكثر تجانسًا من سطح المريخ أو القمر، وكلاهما يحوي على مساحات كبيرة من الجيولوجيا المماثلة، مثل ماريا والهضاب.

إن وشاح الكوكب غير متجانس كيميائيًا، مما يشير إلى أن الكوكب مر بمرحلة محيط الصهارة في وقت مبكر من تاريخه. أدى تبلور المعادن وانقلاب الحمل الحراري إلى تكوين قشرة ذات طبقات غير متجانسة كيميائيًا مع اختلافات واسعة النطاق في التركيب الكيميائي التي لوحظت على السطح.



معالم العاكسية الضوئية (البيدو Albedo) على سطح عطارد هي مناطق ذات عاكسية مختلفة بشكل ملحوظ، والتي تشمل الحفر الأثرية، والمقذوفات الناتجة، وأنظمة الأشعة. تتوافق معالم البياض الأكبر مع السهول الانعكاسية الأعلى. يحوي عطارد على «تلال متجعدة» (ظهر)، ومرتفعات تشبه القمر، وجبال (مونت)، وسهول (بلانيتيا)، وجروف (روبس)، ووديان.

تحوي القشرة على نسبة منخفضة من الحديد ولكنها تحوي على نسبة عالية من الكبريت، نتيجة لظروف الاختزال الكيميائي المبكرة الأقوى مما هو موجود على الكواكب الأرضية الأخرى. ويهيمن على السطح البيروكسين والأوليفين الفقيران بالحديد، كما يمثلهما الإنستاتيت والفورستيريت، على التوالي، إلى جانب البلاجيوجلاز الغني بالصوديوم ومعادن المغنسيوم المختلط والكالسيوم وكبريتيد الحديد. المناطق الأقل انعكاسًا في القشرة تحوي على نسبة عالية من الكربون، على الأرجح في شكل غرافيت.

تأتي أسماء المعالم الموجودة على عطارد من مجموعة متنوعة من المصادر ويتم تعيينها وفقًا لنظام تسميات الكواكب التابع للاتحاد الفلكي الدولي. الأسماء المأخوذة من أسماء البشر تقتصر على المتوفى منهم. يتم تسمية الحفر على أسماء الفنانين والموسيقيين والرسامين والمؤلفين الذين قدموا مساهمات بارزة أو أساسية في مجالهم.

جرى تسمية التلال، أو الظهرة، على اسم العلماء الذين ساهموا في دراسة عطارد. تتم تسمية المنخفضات أو الحفريات على اسم الأعمال المعمارية. تمت تسمية مونتيس على اسم كلمة «ساخن» في مجموعة متنوعة من اللغات. تتم تسمية السهول أو بلانتيا Planitiae باسم عطارد في لغات مختلفة. تتم تسمية المنحدرات أو الروابي على اسم سفن البعثات العلمية. تتم تسمية الوديان على اسم المدن أو البلدات أو المستوطنات القديمة المهجورة.

وبحسب قواعد الاتحاد الفلكي الدولي، يجب تسمية كل حفرة جديدة باسم فنان اشتهر منذ أكثر من خمسين عاما، ومات منذ أكثر من ثلاث سنوات، وذلك قبل تاريخ تسمية الحفرة.

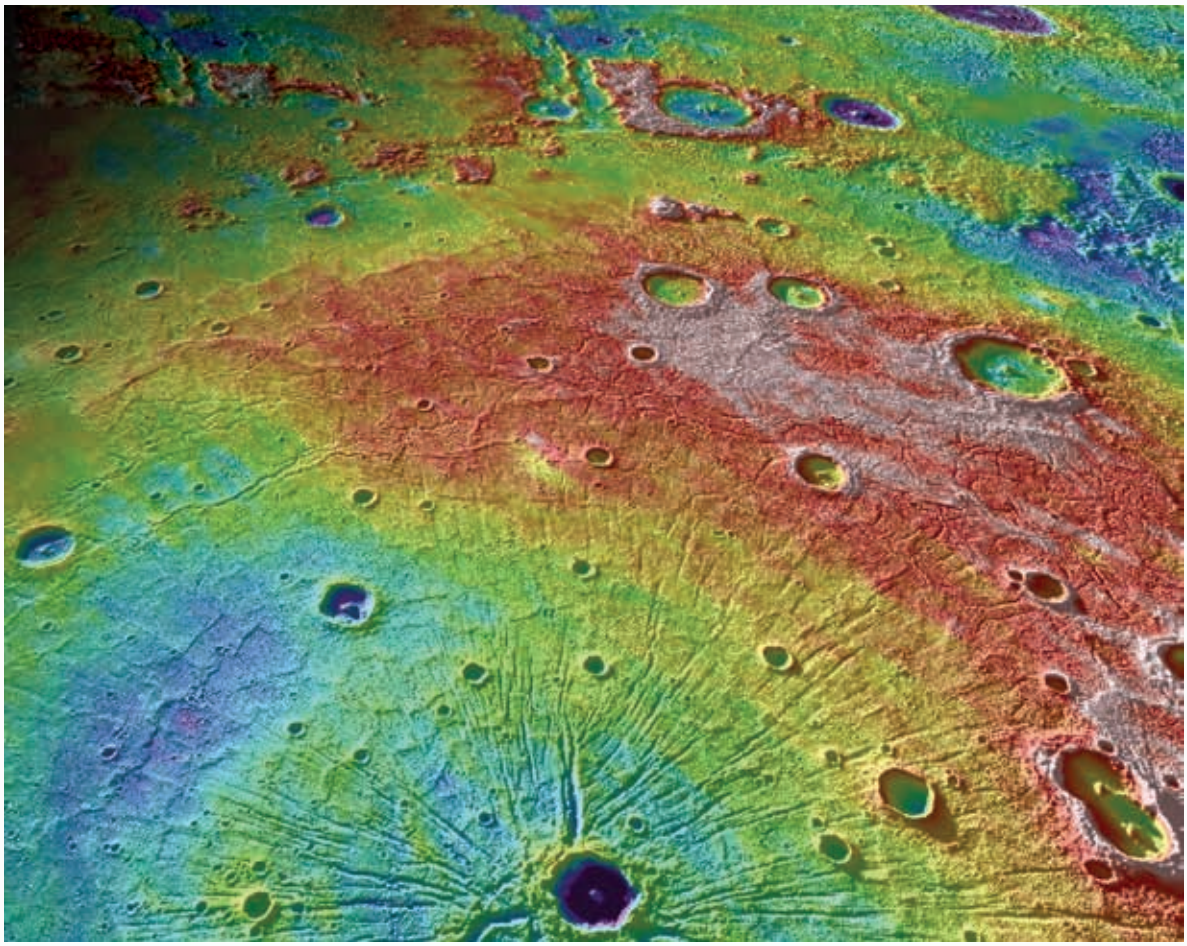
تعرض عطارد لقصف شديد من المذنبات والكويكبات أثناء وبعد وقت قصير من تكوينه قبل 4.6 بليون سنة، وكذلك خلال حلقة لاحقة منفصلة محتملة تسمى القصف الثقيل المتأخر والتي انتهت قبل 3.8 بليون سنة. تلقى عطارد صدمات على سطحه بكامله خلال هذه الفترة من تكوين الحفرة المكثفة، مما سهل ذلك عدم وجود أي غلاف جوي لإبطاء الارتطام.

خلال هذا الوقت كان عطارد نشطًا بركانيًا. كانت الأحواض مليئة بالصهارة، مما أدى إلى إنتاج سهول ناعمة تشبه ماريا الموجودة على القمر. واحدة من الحفر الأكثر غرابة هي أبولودوروس، أو «العنكبوت»، التي تستضيف مجموعة كبيرة من الأحواض المشعة الممتدة إلى الخارج من موقع تأثيرها.

يتراوح قطر الفوهات الموجودة على عطارد من تجاويف صغيرة على شكل وعاء إلى أحواض تصادمية متعددة الحلقات يبلغ عرضها مئات الكيلومترات. تظهر في جميع حالات التدهور، بدءًا من الحفر المشعة الحديثة نسبيًا وحتى بقايا الحفر المتدهورة جدًا. تختلف فوهات عطارد بشكل طفيف عن الحفر القمرية في أن المنطقة التي تغطيها مقذوفاتها أصغر بكثير، وذلك نتيجة لجاذبية سطح عطارد الأقوى.

أكبر حفرة معروفة هي كالوريس بلانيتيا Caloris Planitia، أو حوض كالوريس، ويبلغ قطرها 1550 كم. كان الصدم الذي أدى إلى إنشاء حوض كالوريس قويًا جدًا لدرجة أنه تسبب في ثوران الحمم البركانية وترك حلقة جبلية متحدة المركز يبلغ ارتفاعها نحو 2 كم تحيط بالفوهة الناتجة عن الاصطدام.

تمتلئ أرضية حوض كالوريس بسهل مسطح متميز جيولوجيًا، مقسم بواسطة التلال والكسور في نمط متعدد الأضلاع تقريبًا. ليس من الواضح ما إذا كانت تدفقات الحمم البركانية الناجمة عن الاصطدام أو طبقة كبيرة من ذوبان الاصطدام.



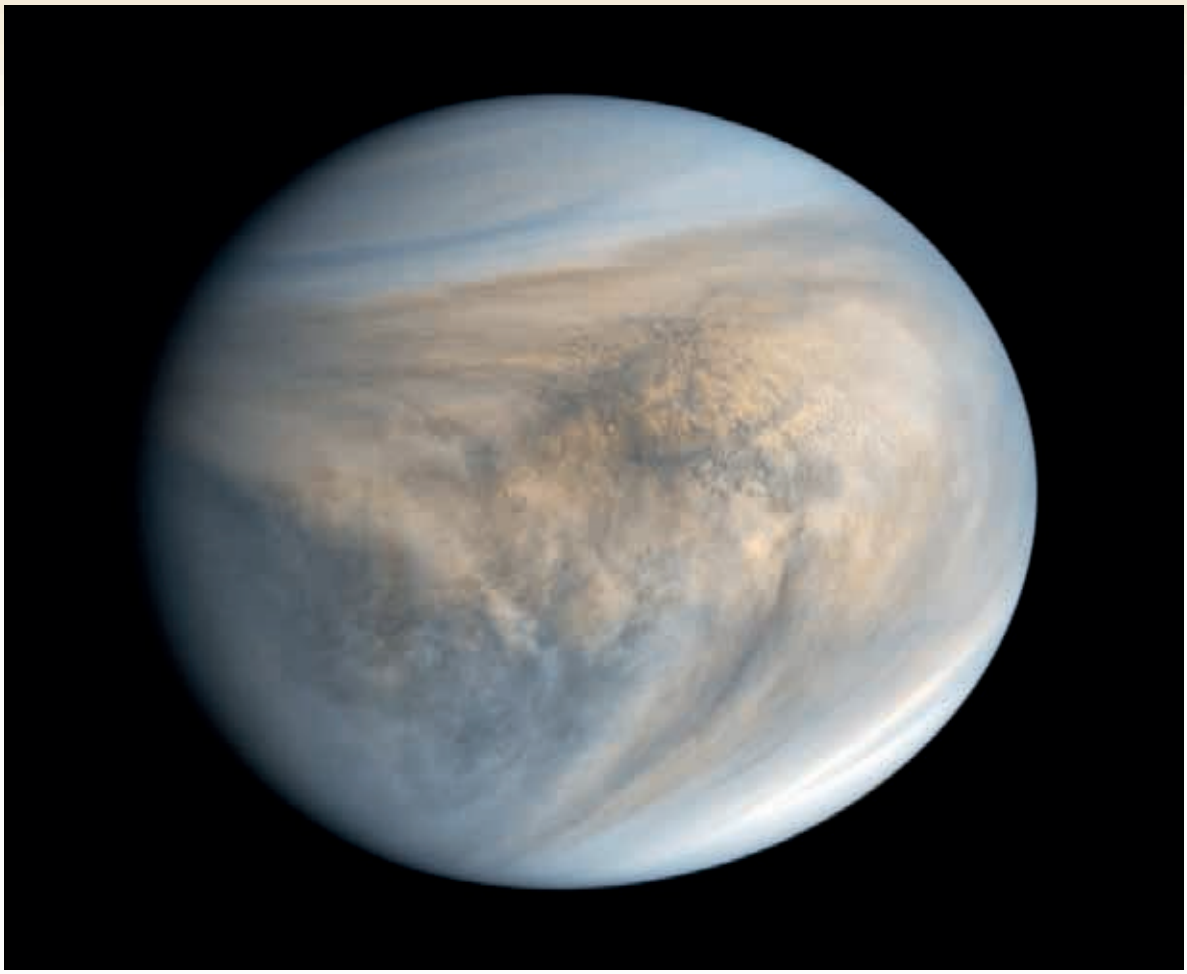
في هذا المشهد المنظوري، ننظر إلى الشمال الغربي فوق حوض كالوريس، وهو منخفض يبلغ قطره نحو 1500 كيلومتر تشكل منذ عدة بلايين من السنين نتيجة اصطدام مقذوف كبير بسطح عطارد.

في الجهة المقابلة لحوض كالوريس توجد منطقة كبيرة ذات تضاريس جبلية غير عادية تُعرف باسم «التضاريس الغريبة». إحدى الفرضيات المتعلقة بأصلها هي أن موجات الصدمة المتولدة أثناء اصطدام كالوريس انتقلت حول عطارد، وتتقارب عند القطب المقابل للحوض (على بعد 180 درجة). أدت الضغوط العالية الناتجة إلى كسر السطح. وبدلاً من ذلك، فقد اقترح أن هذه التضاريس تشكلت نتيجة لتقارب المقذوفات عند النقطة المقابلة لهذا الحوض.

وبشكل عام، تم تحديد 46 حوضًا تصادميًا على سطح عطارد. ومن أبرز هذه الأحواض حوض تولستوي متعدد الحلقات الذي يبلغ عرضه 400 كيلومتر، وله غطاء قاذف يمتد حتى 500 كيلومتر من حافته، وأرضية مملوءة بمواد سهول ملساء. يحوي حوض بيتهوفن على بطانية مماثلة الحجم وحافة قطرها 625 كم. مثل القمر، من المحتمل أن يكون سطح عطارد قد تعرض لصدمات عمليات التجوية الفضائية، بما في ذلك صدمات الرياح الشمسية والنيازك الدقيقة.

2. كوكب الزهرة

يبعد كوكب الزهرة (0.718–0.728 وحدة فلكية (107.4–108.9 مليون كم) عن الشمس، وهو قريب من الأرض (0.815 مليون كيلومتر) ومثل الأرض، لديه قشرة سميكة من السيليكات حول نواة حديدية، وغلاف جوي كبير. النشاط الجيولوجي الداخلي وهو أكثر جفافًا من الأرض بكثير، وغلافه الجوي أكثر كثافة بتسعين مرة.



البنية السحابية للغلاف الجوي لكوكب الزهرة، أصبحت مرئية من خلال التصوير بالأشعة فوق البنفسجية.

كوكب الزهرة ليس لديه أقمار طبيعية. وهو الكوكب الأكثر سخونة، حيث تزيد درجات حرارة سطحه عن (400 درجة مئوية)، ويرجع ذلك أساسًا إلى كمية الغازات الدفيئة في الغلاف الجوي. لا يوجد للكوكب مجال مغناطيسي يمنع استنفاد غلافه الجوي الكبير، مما يشير إلى أن غلافه الجوي يتجدد بسبب الانفجارات البركانية.

يُظهـر السـطح الكوكبـي الصغيـر نسـبيًا أدلـة واسـعة النطـاق علـى النشـاط البركانـي، ولكنـه خـالٍ مـن الصفائـح التكتونيـة. قـد يخضـع لحلقـات إعـادة الظهـور علـى نطـاق زمنـي قـدره 700 مليـون سـنة.

كوكـب الزهـرة هـو الكوكـب الثانـي مـن الشـمس. وهـو كوكـب صخـري يتمتـع بغـلاف جـوي هـو الأكثـر كثافـة مـن بـين جميـع الأجـرام الصخريـة في المجموعـة الشمسـية، والوحيـد الـذي يتمتـع بكتلـة وحجـم قريـب مـن جارتـه المداريـة الأرض.

يـدور في مـدار أدنـى (داخـل مـدار الأرض)، ويظهـر في سـماء الأرض بالقـرب مـن الشـمس دائمًـا، إمـا كـ «نجـم الصبـاح» أو «نجـم المسـاء». في حـين أن هـذه التسـمية تنطبـق أيضًـا علـى عطـارد، إلا أن كوكـب الزهـرة يظهـر بشـكل أكثـر بـروزًا، لأنـه ثالـث ألمـع جسـم في سـماء الأرض بعـد القمـر والشـمس، ويظهـر أكثـر سـطوعًا مـن أي كوكـب كلاسـيكي آخـر شـبيه بالنجـوم أو أي نجـم ثابـت. مـع هـذا الظهـور في سـماء الأرض، كان كوكـب الزهـرة تاريخيًـا جرمًـا شـائعًا ومهمًـا للبشـر، في كل مـن ثقافاتهـم وعلـم الفلـك.

يمتلـك كوكـب الزهـرة غلافًـا مغناطيسـيًا مسـتحثًا ضعيفًـا وجـوًا سـميكًا مـن ثاني أكسـيد الكربـون، ممـا يخلـق، جنبًـا إلـى جنـب مـع غطـاء سـحابة حمـض الكبريتيـك العالمـي، تأثيـرًا شـديدًا للاحتبـاس الحـراري. وينتـج عـن ذلـك علـى السـطح متوسـط درجـة حـرارة 737 كلفـن (464 درجـة مئويـة) وضغـط سـاحق يبلـغ 92 مـرة ضغـط الأرض عنـد مسـتوى سـطح البحـر، ممـا يحـول الهـواء إلـى سـائل فـوق حـرج، بينمـا علـى ارتفاعـات غائمـة تبلـغ 50 كـم فـوق السـطح، الضغـط ودرجـة الحـرارة والإشـعاع تشـبه إلـى حـد كبيـر تلـك الموجـودة علـى سـطح الأرض.

جـرى تحديـد الظـروف المواتيـة للحيـاة علـى كوكـب الزهـرة في طبقـات السـحب، حيـث وجـدت الأبحـاث الحديثـة دليـلًا إرشـاديًا، ولكـن غيـر مقنـع، علـى وجـود

الحياة على الكوكب. ربما كان لدى كوكب الزهرة مياه سطحية سائلة في وقت مبكر من تاريخه، وربما كانت كافية لتكوين المحيطات، لكن تأثيرات الاحتباس الحراري الجامحة أدت في النهاية إلى تبخير أي ماء، والذي تم نقله بعد ذلك إلى الفضاء بواسطة الرياح الشمسية.

داخليًا، يُعتقد أن كوكب الزهرة يتكون من نواة ووشاح وقشرة، وتطلق الأخيرة حرارة داخلية من خلال نشاطها البركاني النشط، مما يشكل السطح من خلال إعادة تشكله بشكل كبير بدلًا من تكتونية الصفائح. كوكب الزهرة هو أحد كوكبين في المجموعة الشمسية ليس لهما أقمار.

يتباطأ دوران كوكب الزهرة ويتحول عكس اتجاهه المداري (الرجعي) بسبب التيارات القوية وسحب غلافه الجوي. ينتج عن هذا الدوران، إلى جانب الوقت الذي يستغرقه كوكب الزهرة 224.7 يومًا أرضيًا لإكمال مداره حول الشمس (سنة شمسية زهرية)، يوم شمسي زهري يبلغ طوله 117 يومًا أرضيًا، وهو الأطول في المجموعة الشمسية، مما يؤدي إلى يوم زهري شمسي. يبلغ طول العام أقل بقليل من يومين من أيام الزهرة.

مدارات كوكب الزهرة والأرض هي الأقرب بين أي كوكبين في المجموعة الشمسية، ويقتربان من بعضهما بعضًا في فترات اقترانية مدتها 1.6 سنة. في حين أن هذا يسمح لهما بالاقتراب من بعضهم بعضًا عند الاقتران الأدنى من أي زوج آخر من كواكب المجموعة الشمسية، إلا أن عطارد يبقى في المتوسط أقرب إليها ومن أي كوكب آخر، حيث إنّ عطارد هو الكوكب الأكثر مركزية ويمر به بشكل متكرر.

ومع ذلك، فإن كوكب الزهرة والأرض بينهما أقل فرق في إمكانات الجاذبية مقارنة بأي زوج آخر من كواكب المجموعة الشمسية. وقد سمح ذلك لكوكب

الزهـرة بـأن يكـون الوجهـة الأكثـر سـهولة للوصـول ونقطـة الطريـق الجذابـة التـي تسـاعد علـى الجاذبيـة للرحـلات الجويـة بـين الكواكـب.

في عـام 1961م، أصبـح كوكـب الزهـرة هدفًـا لأول رحلـة بـين الكواكـب في تاريـخ البشـرية، تلاهـا العديـد مـن الرحـلات الأولـى بـين الكواكـب مثـل أول هبـوط ناعـم علـى كوكـب آخـر في عـام 1970م. وقـد أوضحـت هـذه السـوابر الفضائيـة أن تأثيـرات الاحتبـاس الحـراري الشـديدة قـد خلقـت ظروفًـا سـطحية قمعيـة، وهـي رؤيـة ثاقبـة كانـت لهـا تنبـؤات مسـتنيرة بشـكل حاسـم حـول ظاهـرة الاحتبـاس الحـراري علـى الأرض.

أوقـف هـذا الاكتشـاف معظـم الاهتمـام بالنظريـات والخيـال العلمـي الشـائع آنـذاك حـول كـون كوكـب الزهـرة كوكبًـا صالحًـا للسـكن أو مأهـولًا. ومـع ذلـك، فقـد جـرى اقتـراح رحـلات جويـة مأهولـة إلـى كوكـب الزهـرة، إمـا للتحليـق بالقـرب مـن كوكـب الزهـرة، وإجـراء مسـاعدة الجاذبيـة للوصـول إلـى المريـخ بشـكل أسـرع وأكثـر أمانًـا، أو لدخـول الغـلاف الجـوي للزهـرة والبقـاء عاليًـا علـى ارتفاعـات مـع ظـروف أكثـر مماثلـة لسـطح الأرض، باسـتثناء تكويـن الغـلاف الجـوي، مـن أي مـكان آخـر في المجموعـة الشمسـية.

في الوقـت الحاضـر، اكتسـب كوكـب الزهـرة الاهتمـام مـرة أخـرى كحالـة للبحـث بشـكل خـاص في تطـور الكواكـب الشـبيهة بـالأرض وصلاحيتهـا للسـكن.

تختلـف الظـروف علـى سـطح كوكـب الزهـرة جذريًـا عـن تلـك الموجـودة علـى الأرض، لأن غلافـه الجـوي الكثيـف يتكـون مـن 96.5 % مـن ثانـي أكسـيد الكربـون، ومعظـم النسـبة المتبقيـة البالغـة 3.5 % هـي مـن نيتروجـين.

يبلـغ الضغـط السـطحي 9.3 ميغـا باسـكال (93 بـار)، ويبلـغ متوسـط درجـة حـرارة السـطح 737 كلفـن (464 درجـة مئويـة)، وهـو أعلـى مـن النقـاط الحرجـة

لكل من المكونات الرئيسية ويجعل الغلاف الجوي السطحي سائلًا فوق حرج يتكون بشكل أساسي من ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج وبعض غاز النتروجين فوق الحرج.

يتمتع كوكب الزهرة بغلاف جوي كثيف يتكون من 96.5 % ثاني أكسيد الكربون، و 3.5 % نيتروجين - وكلاهما موجود كسوائل فوق حرجة على سطح الكوكب مع كثافة ماء تبلغ 6.5 % - وآثار غازات أخرى بما في ذلك ثاني أكسيد الكبريت.

تبلغ كتلة الغلاف الجوي للكوكب 92 ضعف كتلة الغلاف الجوي للأرض، في حين أن الضغط على سطحه يبلغ نحو 93 ضعف الضغط على سطح الأرض، وهو ضغط يعادل الضغط الموجود على عمق نحو كيلومتر واحد تحت محيطات الأرض. تبلغ الكثافة على السطح 65 كغ/م^3، أي 6.5% من كثافة الماء أو 50 مرة كثافة الغلاف الجوي للأرض عند 293 كلفن (20 درجة مئوية) عند مستوى سطح البحر.

يولد الغلاف الجوي الغني بثاني أكسيد الكربون أقوى تأثير للاحتباس الحراري في المجموعة الشمسية، مما يخلق درجات حرارة سطحية لا تقل عن 735 كلفن (462 درجة مئوية).

وهذا يجعل سطح الزهرة أكثر سخونة من سطح عطارد، الذي تبلغ درجة حرارة سطحه الدنيا 53 كلفن (– 220 درجة مئوية) والحد الأقصى لدرجة حرارة السطح 700 كلفن (427 درجة مئوية)، على الرغم من أن كوكب الزهرة يبعد تقريبًا ضعف المسافة بين عطارد والشمس وبالتالي يتلقى فقط 25 % من الإشعاع الشمسي لعطارد. بسبب تأثير الاحتباس الحراري الجامح، تم تحديد كوكب الزهرة من قبل علماء مثل كارل ساغان على أنه تحذيري وبحثي مرتبط بتغير المناخ على الأرض.

الغلاف الجوي لكوكب الزهرة غني بالغازات النبيلة البدائية مقارنة بالغلاف الجوي للأرض. يشير هذا التخصيب إلى انحراف مبكر عن الأرض في التطور.

تم اقتراح صدم مذنب كبير بشكل غير عادي أو تراكم غلاف جوي أولي أكثر ضخامة من السديم الشمسي لتفسير هذه الخصوبة. ومع ذلك، فإن الغلاف الجوي مستنزف من الأرغون الإشعاعي، وهو كفيل بتفريغ الغازات في الوشاح، مما يشير إلى إيقاف مبكر للصهارة الرئيسة.

تشير الدراسات إلى أنه منذ بلايين السنين، كان من الممكن أن يكون الغلاف الجوي لكوكب الزهرة يشبه إلى حد كبير الغلاف الجوي المحيط بالأرض المبكرة، وأنه ربما كانت هناك كميات كبيرة من الماء السائل على السطح.

بعد فترة تتراوح بين 600 مليون إلى عدة بلايين من السنين، تسبب التأثير الشمسي الناتج عن ارتفاع سطوع الشمس وربما ظهور بركان كبير في تبخر الماء الأصلي والغلاف الجوي الحالي. وقد ظهر تأثير الاحتباس الحراري الجامح بمجرد إضافة مستوى حرج من غازات الدفيئة (بما في ذلك الماء) إلى الغلاف الجوي.

مع أن الظروف السطحية على كوكب الزهرة لم تعد ملائمة لأي حياة شبيهة بالأرض قد تكونت قبل هذا الحدث، إلا أن هناك تكهنات حول احتمال وجود حياة في طبقات السحابة العليا لكوكب الزهرة، على بعد 50 كيلومترًا من السطح، حيث الظروف الجوية هي الأكثر تشابهًا مع الأرض في المجموعة الشمسية، إذ تتراوح درجات الحرارة بين 303 و353 كلفن (30 و80 درجة مئوية)، ويكون الضغط والإشعاع متماثلين تقريبًا كما هو الحال على سطح الأرض، ولكن مع سحب حمضية وهواء ثاني أكسيد الكربون.

أدى الاكتشاف المفترض لخط امتصاص الفوسفين في الغلاف الجوي لكوكب الزهرة، مع عدم وجود مسار معروف للإنتاج غير الحيوي، إلى تكهنات في سبتمبر 2020م بأنه قد تكون هناك حياة موجودة حاليًا في الغلاف الجوي.

وأرجعت الأبحاث اللاحقة الإشارة الطيفية التي جرى تفسيرها على أنها فوسفين إلى ثاني أكسيد الكبريت، أو وجدت أنه في الواقع لم يكن هناك خط امتصاص.

القصور الذاتي الحراري وانتقال الحرارة عن طريق الرياح في الغلاف الجوي السفلي يعني أن درجة حرارة سطح كوكب الزهرة لا تختلف بشكل كبير بين نصفي الكرة الأرضية، النصفين المواجهين وغير المواجهين للشمس، مع بطء دوران كوكب الزهرة.

الرياح على السطح بطيئة، وتتحرك بسرعة بضعة كيلومترات في الساعة، ولكن بسبب الكثافة العالية للغلاف الجوي على السطح، فإنها تمارس قدرًا كبيرًا من القوة ضد العوائق، وتنقل الغبار والأحجار الصغيرة عبر السطح. وهذا وحده سيجعل من الصعب على الإنسان أن يمشي، حتى بدون الحرارة والضغط ونقص الأكسجين.

لقد كان سطح الزهرة موضوعاً للتكهنات حتى كشف علم الكواكب عن بعض أسراره في القرن العشرين. أعادت مركبات الهبوط فينيرا في عامي 1975 و1982م صورًا لسطح مغطى بالرواسب والصخور الزاويّة نسبيًا.

ورُسمت خريطة السطح بالتفصيل بواسطة ماجلان في 1990–1991م. تُظهر أرضية الزهرة دليلًا على وجود نشاط بركاني واسع النطاق، وقد يشير الكبريت الموجود في الغلاف الجوي إلى حدوث انفجارات حديثة.

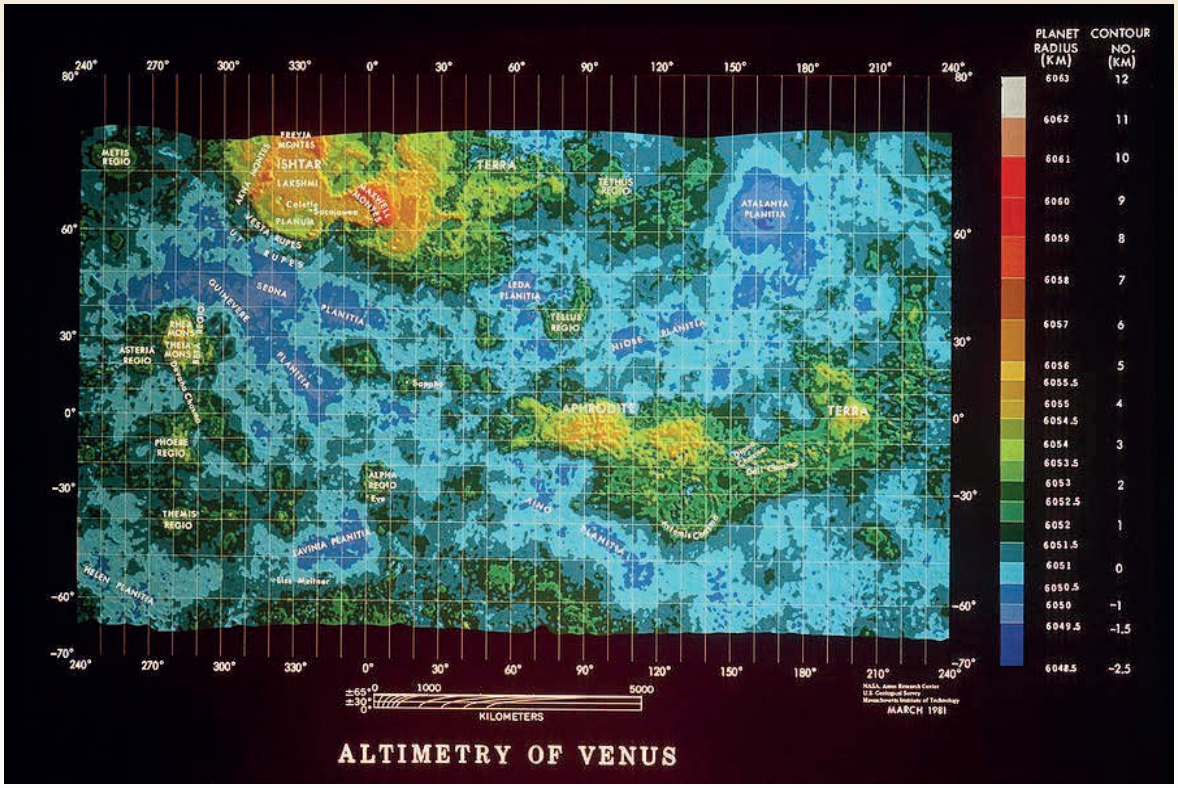
نحـو 80 % مـن سـطح كوكـب الزهـرة مغطـى بسـهول بركانيـة ناعمـة، تتكـون مـن 70 % سـهول ذات حـواف مجعـدة و 10 % سـهول ناعمـة أو مفصصـة. تشـكل «قارتـان» مرتفعتـان بقيـة مسـاحة سـطح الكوكـب، إحداهمـا تقـع في نصـف الكـرة الشـمالي للكوكـب والأخـرى جنـوب خـط الاسـتواء مباشـرة.

وتسـمى القـارة الشـمالية عشـتار تيـرا نسـبة إلـى عشـتار، إلهـة الحـب البابليـة، وهـي بحجـم أسـتراليا تقريبًـا. حيـث يقـع جبـل ماكسـويل مونتيـس، أعلـى جبـل علـى كوكـب الزهـرة، علـى أرض عشـتار. تبلـغ ذروتـه 11 كـم فـوق متوسـط ارتفـاع سـطح كوكـب الزهـرة.

تسـمى القـارة الجنوبيـة أفروديـت تيـرا، علـى اسـم إلهـة الحـب الأسـطورية اليونانيـة، وهـي أكبـر منطقتيـن مرتفعتيـن بحجـم أمريكـا الجنوبيـة تقريبًـا. وتغطـي شـبكة مـن الكسـور والصـدوع جـزءًا كبيـرًا مـن هـذه المنطقـة.

إن عـدم وجـود دليـل علـى تدفـق الحمـم البركانيـة المصاحبـة لأي مـن الفوهـات البركانيـة المرئيـة يبقـى لغـزًا. يحـوي الكوكـب علـى عـدد قليـل مـن الفوهـات الاصطداميـة، ممـا يـدل علـى أن سـطحه حديـث العهـد نسـبيًا، حيـث يتـراوح عمـره بـين 300 و600 مليـون سـنة. يتمتـع كوكـب الزهـرة ببعـض السـمات السـطحية الفريـدة بالإضافـة إلـى الحفـر البركانيـة والجبـال والوديـان التـي توجـد عـادة علـى الكواكـب الصخريـة.

ومـن بـين هـذه المعالـم البركانيـة المسـطحة التـي تسـمى «فـارا»، والتـي تشـبه إلـى حـد مـا الفطائـر، ويتـراوح حجمهـا مـن 20 إلـى 50 كيلومتـرًا، وارتفاعهـا مـن 100 إلـى 1000 متـر؛ أنظمـة كسـر شـعاعية شـبيهة بالنجـوم التـي تسـمى «المسـتعرات»؛ السـمات التـي تحـوي علـى كسـور شـعاعية ومتحـدة المركـز تشـبه شـبكات العنكبـوت، والمعروفـة باسـم «العناكـب»؛ و«الأكاليـل»، وهـي حلقـات دائريـة مـن الكسـور محاطـة أحيانًـا بمنخفـضٍ. هـذه المعالـم بركانيـة الأصـل.



خريطة الارتفاع المرمزة بالألوان، تظهر «القارات» المرتفعة باللون الأصفر والملامح الثانوية لكوكب الزهرة. خريطة لكوكب الزهرة جرى تجميعها من البيانات المسجلة بواسطة المركبة الفضائية Pioneer Venus Orbiter التابعة لناسا ابتداءً من عام 1978م.

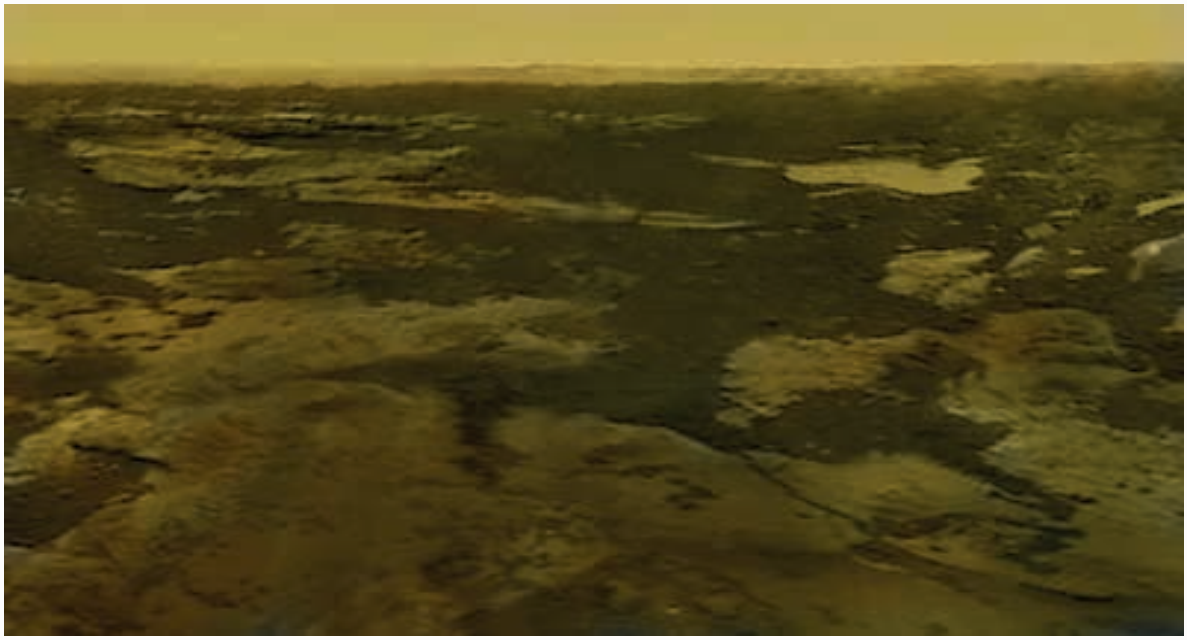
تمت تسمية معظم معالم سطح كوكب الزهرة بأسماء نساء تاريخية وأسطورية. الاستثناءات هي ماكسويل مونتيس، الذي سمي على اسم جيمس كليرك ماكسويل، والمناطق المرتفعة ألفا ريجيو، وبيتا ريجيو، وأوفدا ريجيو. تمت تسمية السمات الثلاث الأخيرة قبل اعتماد النظام الحالي من قبل الاتحاد الفلكي الدولي، وهي الهيئة التي تشرف على تسميات الكواكب.

يتم التعبير عن خط طول السمات الفيزيائية على كوكب الزهرة بالنسبة إلى خط الطول الرئيس. مر خط الطول الرئيسي الأصلي عبر النقطة الساطعة

للرادار في وسط الميزة البيضاوية حواء، الواقعة جنوب ألفا ريجيو. بعد الانتهاء من مهمات فينيرا، تم إعادة تعريف خط الطول الرئيسي ليمر عبر القمة المركزية في فوهة بركان أريادن في سيدنا بلانيتيا.

تتميز أقدم تضاريس الفسيفساء الطبقية بانبعاثية حرارية أقل باستمرار من السهول البازلتية المحيطة التي تم قياسها بواسطة فينوس إكسبرس وماجلان، مما يشير إلى تجمع معدني مختلف، وربما أكثر فسيفسائية.

تتطلب آلية توليد كمية كبيرة من القشرة الفسيفسائية عادة وجود محيط مائي وصفائح تكتونية، مما يعني أن حالة صالحة للسكن كانت موجودة على كوكب الزهرة المبكر مع وجود مسطحات مائية كبيرة في مرحلة ما. ومع ذلك، فإن طبيعة تضاريس قطعة الأرض ليست مؤكدة على الإطلاق.



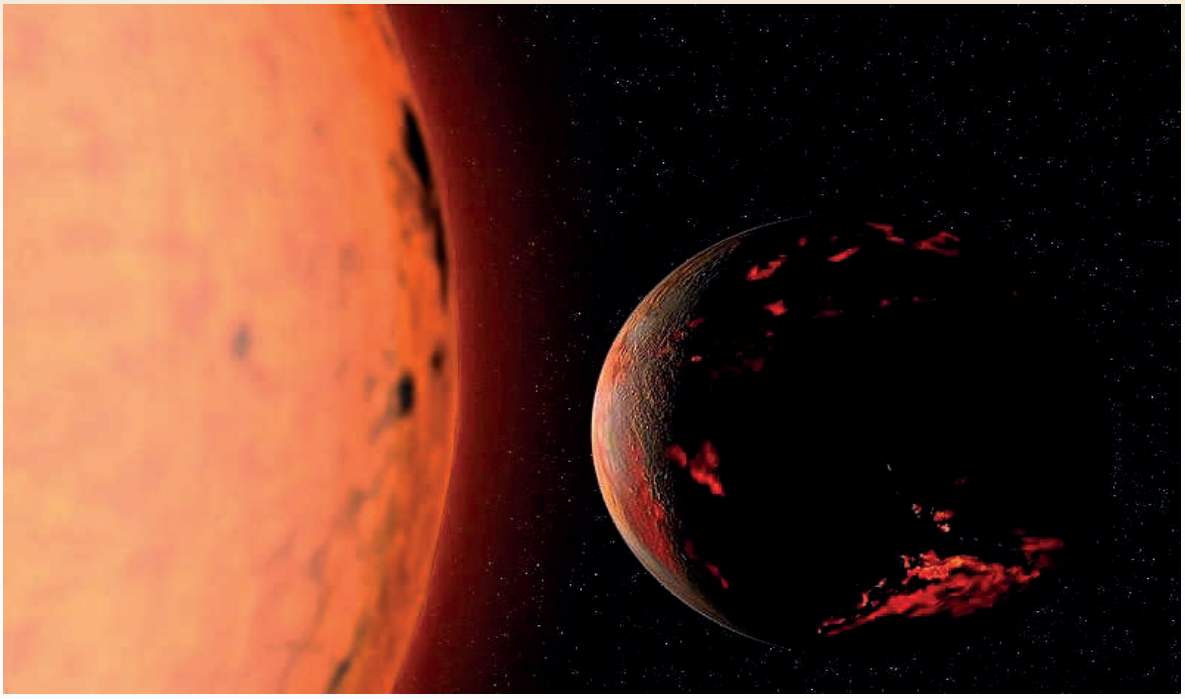
صورة سطحية مصححة وملونة أخذتها المركبة الفضائية فينيرا 10 (1975م) Venera 10.

1. كوكب الأرض

تبعد الأرض 0.983–1.017 وحدة فلكية (147.1–152.1 مليون كم) عن الشمس. هي أكبر الكواكب الداخلية وأكثرها كثافة، والكوكب الوحيد المعروف بوجود نشاط جيولوجي حالي، والمكان الوحيد في الكون الذي من المعروف أن الحياة موجودة فيه.

يعتبر غلافه المائي السائل فريدًا من نوعه بين الكواكب الأرضية، وهو الكوكب الوحيد الذي تم ملاحظة تكتونية الصفائح فيه. يختلف الغلاف الجوي للأرض جذريًا عن الغلاف الجوي للكواكب الأخرى، حيث تغير بسبب وجود الحياة ليحوي على 21 % من الأكسجين الحر.

يحمي الغلاف المغناطيسي الكوكبي السطح من الإشعاع الشمسي والكوني، مما يحد من تجريد الغلاف الجوي ويحافظ على الصالحية للسكن. وله قمر طبيعي واحد، وهو القمر الكبير الوحيد لكوكب أرضي في المجموعة الشمسية.



رسم توضيحي تخميني للأرض المحروقة بعد دخول الشمس مرحلة العملاق الأحمر، بعد نحو 5 إلى 7 بلايين سنة من الآن.

2. كوكـــب المريـــخ

يبعد المريخ 1.382–1.666 وحدة فلكية (206.7–249.2 مليون كم) عن الشمس، وهو أصغر من الأرض والزهرة. له غلاف جوي يتكون في الغالب من ثاني أكسيد الكربون مع ضغط سطحي يبلغ 6.1 ملي بار (0.18 بوصة زئبقية)؛ نحو 0.6 % من مساحة الأرض ولكنها كافية لدعم الظواهر الجوية.

يُظهر سطحه، المليء بالبراكين، مثل أوليمبوس مونس، والوديان المتصدعة، مثل فاليس مارينيريس، نشاطًا جيولوجيًا ربما استمر حتى وقت قريب يصل إلى مليوني سنة مضت. ويأتي لونه الأحمر من أكسيد الحديد (الصدأ) الموجود في تربته، بينما تظهر على المناطق القطبية قبعات جليدية بيضاء تتكون إلى حد

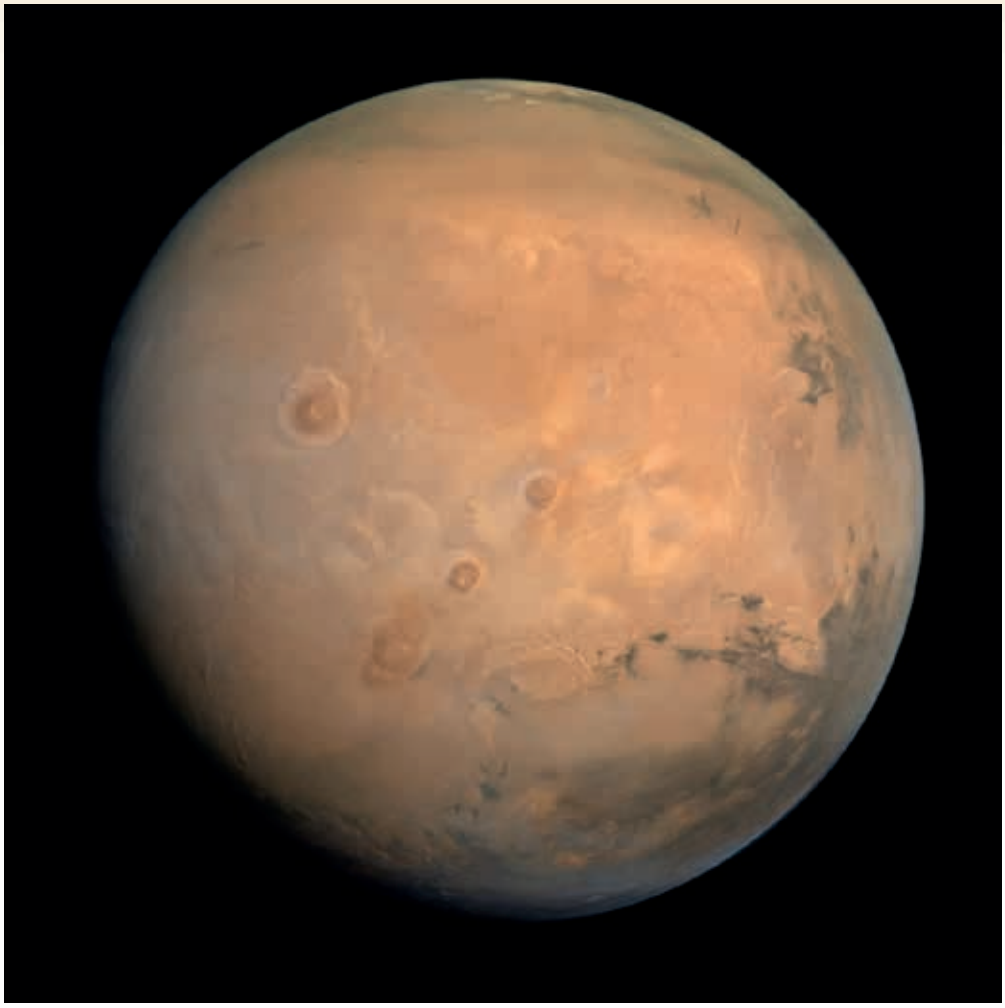
كبير من الماء. يمتلك المريخ قمرين طبيعيين صغيرين (ديموس وفوبوس) يُعتقد أنهما إما كويكبان تم الاستيلاء عليهما، أو قذف حطام من صدم هائل في وقت مبكر من تاريخ المريخ.

المريخ هو الكوكب الرابع وأبعد كوكب أرضي عن الشمس. يرجع اللون المحمر لسطحه إلى وجود غبار أكسيد الحديد (III) الناعم في التربة، مما يمنحه لقب «الكوكب الأحمر». المريخ هو ثاني أصغر كواكب المجموعة الشمسية حيث يبلغ نصف قطره 3389.5 كم.

يظهر الانقسام المريخي على السطح؛ ففي المتوسط، تكون التضاريس في نصف الكرة الشمالي للمريخ أكثر استواءً وأقل ارتفاعًا من نصف الكرة الجنوبي. يتمتع المريخ بغلاف جوي رقيق يتكون أساسًا من ثاني أكسيد الكربون وقمرين طبيعيين غير منتظمي الشكل: فوبوس وديموس.

من الناحية الجيولوجية، المريخ نشط إلى حد ما، حيث تجتاح شياطين الغبار المناظر الطبيعية وتهتز الزلازل المريخية تحت أرضيته. يستضيف سطح المريخ بركانًا درعيًا كبيرًا (أوليمبوس مونس) وواحدًا من أكبر الأخاديد في المجموعة الشمسية (وادي مارينريس).

يتسبب الانحراف المداري الكبير للمريخ والميل المحوري في حدوث تغيرات موسمية كبيرة في تغطية القمم الجليدية القطبية وتقلبات درجة الحرارة بين 110- درجة مئوية إلى 35 درجة مئوية على السطح. اليوم الشمسي المريخي (سول sol) يساوي 24.5 ساعة والسنة الشمسية المريخية تساوي 1.88 سنة أرضية.



كوكب المريخ بالألوان الحقيقية، التقطتها بعثة الإمارات (الأمل) لاستكشاف المريخ بتاريخ 30 أغسطس 2021م، عندما كان المريخ في حالة الانقلاب الشمالي.

مثل الكواكب الأخرى في المجموعة الشمسية، تشكل المريخ منذ نحو 4.5 بليون سنة. خلال فترة نواشيان قبل نحو 4.1 إلى 3.7 بليون سنة مضت، تميز سطح المريخ بصدمات النيازك، وتشكل الوديان، والتآكل، واحتمال وجود محيطات مائية.

هيمن على الفترة الهسبيرية قبل 3.7 إلى 3.2–2 بليون سنة مضت نشاط بركاني واسع النطاق وفيضانات حفرت قنوات تدفق هائلة. وتميزت الفترة الأمازونية، والتي تستمر حتى الوقت الحاضر، بتأثير الرياح على العمليات الجيولوجية. من غير المعروف ما إذا كانت الحياة قد وجدت على المريخ من قبل.

يعد المريخ من أكثر الأجرام سطوعًا في سماء الأرض، ولذلك فهو معروف منذ العصور القديمة. تجعل معالم البياض عالية التباين منه موضوعًا شائعًا للعرض باستخدام التلسكوب.

منذ أواخر القرن العشرين، جرى استكشاف المريخ بواسطة المركبات الفضائية والمركبات الجوالة غير المأهولة، مع أول تحليق بواسطة مسبار مارينر – 4 في عام 1965م، وأول مركبة مدارية حول المريخ بواسطة مسبار مارس – 2 في عام 1971م، وأول هبوط بواسطة السابر فايكنغ – 1 في عام 1976م. اعتبارًا من عام 2023م، هناك ما لا يقل عن 11 سابرًا نشطًا يدور حول المريخ أو على سطح المريخ. يعد المريخ حاليًا هدفًا جذابًا للبعثات البشرية المستقبلية الأولى بين الكواكب.

افترض العلماء أنه أثناء تكوين المجموعة الشمسية، جرى إنشاء المريخ نتيجة لعملية عشوائية لتراكم المواد من القرص الكوكبي الأولي الذي يدور حول الشمس. يتمتع المريخ بالعديد من السمات الكيميائية المميزة الناجمة عن موقعه في المجموعة الشمسية.

العناصر ذات نقاط الغليان المنخفضة نسبيًا، مثل الكلور والفوسفور والكبريت، أكثر شيوعًا على المريخ منها على الأرض؛ من المحتمل أن تكون هذه العناصر قد دفعت إلى الخارج بفعل الرياح الشمسية النشطة للشمس الفتية.

بعد تكوين الكواكب، تعرضت جميعها لما يسمى «القصف الثقيل المتأخر». يُظهر نحو 60 % من سطح المريخ سجلًا من الصدمات من تلك الحقبة، في حين أن معظم السطح المتبقي ربما يكون تحت أحواض تصادم هائلة ناجمة عن تلك الأحداث.

هناك أدلة على وجود حوض تصادم هائل في النصف الشمالي من الكرة الأرضية للمريخ، يمتد على مساحة 10600 × 8500 كيلومتر، أو ما يقرب من أربعة أضعاف حجم القطب الجنوبي للقمر، أي حوض آيتكين، وهو أكبر حوض تصادم اكتشف حتى الوقت الحالي.

تشير هذه النظرية إلى أن كوكب المريخ قد اصطدم بجسم بحجم بلوتو قبل نحو أربعة بلايين سنة. هذا الحدث، الذي يُعتقد أنه سبب الانقسام في نصف الكرة المريخية، أدى إلى إنشاء حوض بوريااليس السلس الذي يغطي 40 % من الكوكب.

يمكن تقسيم التاريخ الجيولوجي للمريخ إلى فترات عديدة، ولكن فيما يأتي الفترات الأساسية الثلاث:

- **الفتـــرة النوشـــية**: تشكل أقدم أسطح المريخ الموجودة قبل 4.5 إلى 3.5 بليون سنة. إن أسطح الفترة النوشي مشوّهة بالعديد من الحفر الكبيرة. يُعتقد أن انتفاخ ثارسيس، وهو مرتفع بركاني، قد تشكل خلال هذه الفترة، مع حدوث فيضانات واسعة النطاق بالمياه السائلة في أواخر تلك الفترة. سميت هذه الفترة على اسم نواشيس تيرا.
- **الفتـــرة الهسبيريـــة**: قبل 3.5 إلى ما بين 3.3 و2.9 بليون سنة. تتميز الفترة الهسبيرية بتكوين سهول واسعة من الحمم البركانية. سميت هذه الفترة على اسم هيسبيريا بلانوم.

- **الفـــترة الأمازونيـــة:** قبـل مـا بـين 3.3 و 2.9 بليـون سـنة حتـى الوقـت الحاضـر. تحـوي مناطـق الأمـازون علـى عـدد قليـل مـن الحفـر الناتجـة عـن ارتطـام النيـازك ولكنهـا بخـلاف ذلـك متنوعـة تمامًـا. تشـكل جبـل أوليمبـوس خـلال هـذه الفتـرة، مـع تدفقـات الحمـم البركانيـة في أماكـن أخـرى علـى المريـخ. سـميت هـذه الفتـرة علـى اسـم أمازونيـس بلانيتيـا.

لا يـزال النشـاط الجيولوجـي يحـدث علـى المريـخ. يعـد وادي أثاباسـكا موطنًـا لتدفقـات الحمـم البركانيـة الشـبيهة بالصفائـح التـي تكونـت قبـل نحـو 200 مليـون سـنة مضـت. حدثـت تدفقـات الميـاه في الحفريـات المسـماة سـيربيروس فوسـاي Cerberus Fossae قبـل أقـل مـن 20 مليـون سـنة مضـت، ممـا يشـير إلـى حـدوث توغـلات بركانيـة حديثـة بالقـدر نفسـه. التقطـت المركبـة الفضائيـة Mars Reconnaissance Orbiter صـورًا للانهيـارات الجليديـة.

يبلـغ قطـر المريـخ نحـو نصـف قطـر الأرض، وتقـل مسـاحة سـطحه قليـلًا عـن إجمالـي مسـاحة اليابسـة علـى الأرض. المريـخ أقـل كثافـة مـن الأرض، حيـث يبلـغ حجمـه نحـو 15 % مـن حجـم الأرض و 11 % مـن كتلـة الأرض، ممـا يـؤدي إلـى نحـو 38 % مـن جاذبيـة سـطح الأرض.

المظهـر الأحمـر البرتقالـي لسـطح المريـخ نـاتج عـن أكسـيد الحديديـك، أو الصـدأ. يمكـن أن تبـدو مثـل الحلـوى. تشـمل الألـوان السـطحية الشـائعة الأخـرى الذهبـي، والبنـي، والأسـمر، والأخضـر، اعتمـادًا علـى المعـادن الموجـودة.

مثـل الأرض، تمايـز المريـخ إلـى نـواة معدنيـة كثيفـة مغطـاة بمـواد أقـل كثافـة. تشـير النمـاذج الحاليـة للتصميـم الداخلـي إلـى نـواة تتكـون أساسًـا مـن الحديـد والنيـكل مـع نحـو 16-17 % مـن الكبريـت. يُعتقـد أن نـواة كبريتيـد الحديـد (II) غنيـة بالعناصـر الأخـف مرتـين مثـل تلـك الموجـودة في الأرض.

يحيط بالنواة وشاح سيليكاتي شكلت العديد من السمات التكتونية والبركانية على الكوكب، ولكن يبدو أنها خاملة. إلى جانب السيليكون والأكسجين، فإن العناصر الأكثر وفرة في قشرة المريخ هي الحديد والمغنيسيوم والألمنيوم والكالسيوم والبوتاسيوم. يبلغ متوسط سمك قشرة الكوكب نحو 50 كيلومترًا، ويبلغ سمكها الأقصى 125 كيلومترًا. وبالمقارنة، يبلغ متوسط سمك القشرة الأرضية 40 كيلومترًا.

تم التقاط هذه اللقطة إلى الكثبان الرملية التي قادتها مركبة كيوريوسيتي المريخية التابعة لناسا بواسطة الكاميرا الصاري الخاصة بالمركبة (Mastcam) خلال اليوم المريخي رقم 538، أو اليوم المريخي، من عمل كيوريوسيتي على المريخ (9 فبراير 2014م). كانت العربة الجوالة قد تحركت فوق الكثبان الرملية قبل ثلاثة أيام. بالنسبة للمقياس، تبلغ المسافة بين مسارات العجلة المتوازية نحو (2.7 متر). يبلغ ارتفاع الكثبان الرملية نحو (متر واحد) في منتصف امتدادها عبر فتحة تسمى فجوة دنغو Dingo Gap. هذا المنظر يتجه نحو الشرق.

نصف قطر لب المريخ كبير بشكل غير طبيعي، حيث يمثل أكثر من نصف قطر المريخ ونحو نصف حجم لب الأرض. ولهذا السبب، فقد اقترح أن اللب يحوي على كمية من العناصر الخفيفة مثل الأكسجين والهيدروجين بالإضافة إلى سبائك الحديد والنيكل ونحو 15 % من الكبريت.

لب المريخ مغطى بالوشاح الصخري، الذي لا يبدو أنه يحوي على طبقة عازلة حراريًا مماثلة للوشاح السفلي للأرض. يبدو أن الوشاح المريخي صلب حتى عمق نحو 500 كيلومتر، حيث تبدأ المنطقة ذات السرعة المنخفضة (الغلاف الموري الذائب جزئيًا).

تحت الغلاف الموري تبدأ سرعة الموجات الزلزالية في النمو مرة أخرى؛ وعلى عمق نحو 1050 كم تقع حدود المنطقة الانتقالية الممتدة حتى القلب. يشير التحليل الإضافي لبيانات المركبة إنسايت InSight إلى أن المريخ يمتلك نواة سائلة.

المريخ هو كوكب صخري يتكون سطحه من معادن تحوي على السيليكون والأكسجين والمعادن وعناصر أخرى تشكل الصخور عادةً. يتكون سطح المريخ بشكل أساسي من البازلت الثوليتي، مع أن الأجزاء غنية بالسيليكا أكثر من البازلت النموذجي وقد تكون مشابهة للصخور الأنديزيتية على الأرض، أو زجاج السيليكا.

تشير المناطق ذات البياض المنخفض إلى تركيزات الفلسبار بلاجيوجلاز، مع ظهور مناطق البياض المنخفضة الشمالية أعلى من التركيزات الطبيعية لصفائح السيليكات والزجاج عالي السيليكون. تحوي أجزاء من المرتفعات الجنوبية على كميات يمكن اكتشافها من البيروكسينات عالية الكالسيوم. عثر على تركيزات موضعية من الهيماتيت والأوليفين. جزء كبير من السطح مغطى بعمق بغبار أكسيد الحديد (III) ذو الحبيبات الدقيقة.

مع أن المريخ ليس لديه أي دليل على وجود مجال مغناطيسي عالمي منظم، إلا أن الأرصاد تظهر أن أجزاء من قشرة الكوكب ممغنطة، مما يشير إلى حدوث انعكاسات قطبية متناوبة لحقله ثنائي القطب في الماضي.

تشبه المغناطيسية القديمة للمعادن الحساسة مغناطيسيًا النطاقات المتناوبة الموجودة في قاع المحيطات على الأرض. إحدى النظريات، التي نشرت في عام 1999م وأعيد فحصها في أكتوبر 2005م (بمساعدة مساح المريخ العالمي)، هي أن هذه النطاقات تشير إلى نشاط الصفائح التكتونية على المريخ قبل أربعة بلايين سنة، قبل أن يتوقف دينامو الكوكب عن العمل وتتوقف المغناطيسية للكوكب.

أعادت المركبة الهابطة فينيكس بيانات تظهر أن تربة المريخ قلوية قليلًا وتحوي على عناصر مثل المغنيسيوم والصوديوم والبوتاسيوم والكلور. وقد عثر على هذه العناصر الغذائية في التربة على الأرض. فهي ضرورية لنمو النباتات. وأظهرت التجارب التي أجرتها مركبة الهبوط أن درجة الحموضة الأساسية لتربة المريخ تبلغ 7.7، وتحوي على 0.6 % من بيركلورات الملح، وهي تركيزات سامة بالنسبة للإنسان.

تعد الخطوط شائعة عبر المريخ وتظهر خطوط جديدة بشكل متكرر على المنحدرات الشديدة من الحفر والأحواض والوديان. تكون الخطوط داكنة في البداية ثم تصبح أفتح مع التقدم في الزمن. يمكن أن تبدأ الخطوط في منطقة صغيرة، ثم تنتشر لمئات الأمتار.

لقد شوهدت وهي تتبع حواف الصخور والعقبات الأخرى في طريقها. تشمل النظريات المقبولة عمومًا أنها طبقات داكنة من التربة جرى الكشف عنها بعد الانهيارات الجليدية من الغبار الساطع أو شياطين الغبار. وقد طُرحت عدة تفسيرات أخرى، بما في ذلك تلك التي تتعلق بالمياه أو حتى نمو الكائنات الحية.

تبلغ مستويات الإشعاع على السطح في المتوسط 0.64 مللي سيفرت من الإشعاع يوميًا، وأقل بكثير من الإشعاع البالغ 1.84 مللي سيفرت يوميًا أو 22 مللي سيفرت يوميًا أثناء الرحلة من وإلى المريخ. وللمقارنة، تبلغ مستويات الإشعاع في المدار الأرضي المنخفض، حيث تدور محطات الأرض الفضائية، نحو 0.5 مللي سيفرت من الإشعاع يوميًا. يمتلك سهل هيلاس بلانيتيا أدنى إشعاع سطحي يبلغ نحو 0.342 مللي سيفرت يوميًا، ويتميز بأنابيب الحمم البركانية جنوب غرب جبل هادرياكوس مونس بمستويات محتملة منخفضة تصل إلى 0.064 مللي سيفرت يوميًا.

تحوي منطقة المرتفعات الشاسعة ثارسيس على العديد من البراكين الخامدة، والتي تشمل بركان الدرع أوليمبوس مونس (جبل أوليمبوس). ويبلغ عرض الصرح أكثر من 600 كيلومتر.

نظرًا لأن الجبل كبير جدًا، وله بنية معقدة عند حوافه، فمن الصعب تحديد ارتفاع محدد له. يبلغ ارتفاعه المحلي، من سفح المنحدرات التي تشكل هامشها الشمالي الغربي إلى ذروتها، أكثر من 21 كيلومترًا، أي ما يزيد قليلًا عن ضعف ارتفاع جبل مونا كيا مقاسًا من قاعدتها في قاع المحيط.

صورة لأكبر بركان على سطح المريخ، أوليمبوس مونس. ويبلغ عرضه نحو 550 كيلومتر.

يتغير الارتفاع الإجمالي من سهول أمازونيس بلانيتيا، على بعد أكثر من 1000 كيلومتر إلى الشمال الغربي، إلى القمة التي تقترب من 26 كيلومترًا، أي ما يقرب من ثلاثة أضعاف ارتفاع جبل إيفرست، والذي يبلغ بالمقارنة ما يزيد قليلًا عن 8.8 كيلومتر.

وبالتالي، فإن أوليمبوس مونس هو إما أطول أو ثاني أطول جبل في المجموعة الشمسية؛ الجبل الوحيد المعروف الذي قد يكون أطول هو قمة ريسيلفيا على الكويكب فيستا، على ارتفاع 20-25 كم.

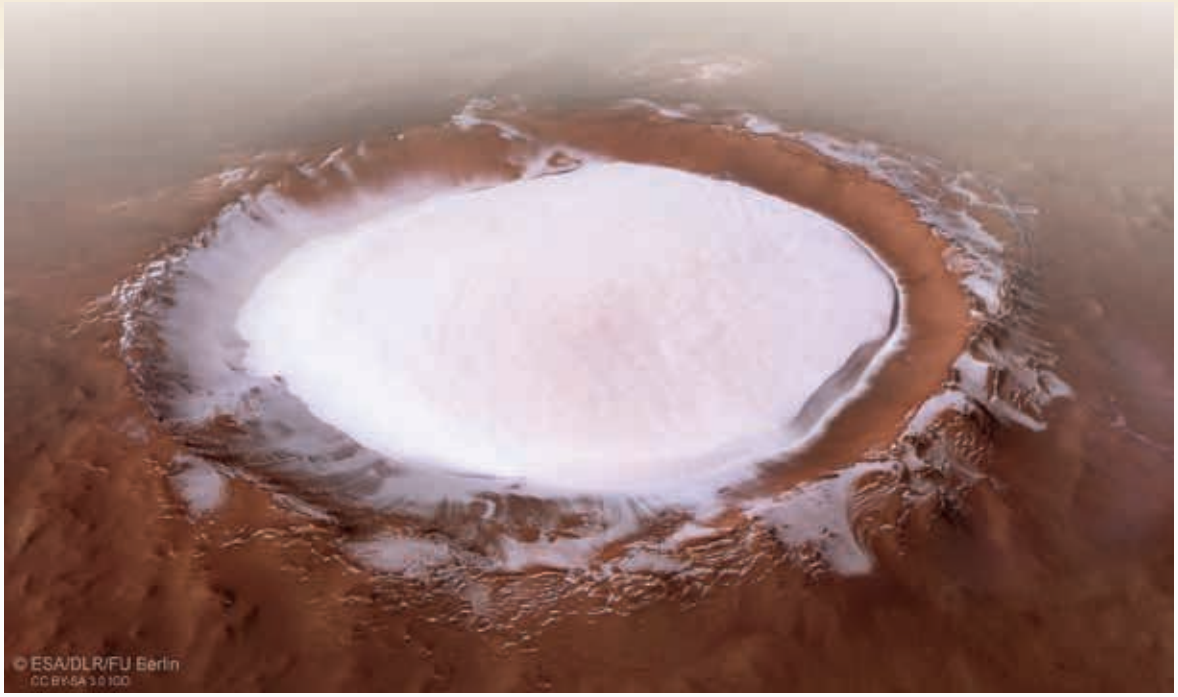
من المعالم البارزة والمهمة على سطح المريخ فوهة كورولیف Korolev crater وهي حفرة صدمية مملوءة بالجليد في مربع ماري بوريوم، وتقع عند خط عرض

73 درجة شمالًا وخط طول 165 درجة شرقًا. ويبلغ قطرها 81.4 كيلومترًا، وتحوي على نحو 2200 كيلومتر مكعب من الجليد المائي، وهو ما يعادل حجم بحيرة غريت بير في شمال كندا.

تقع فوهة كورولیف في سهل بلانوم بوريوم، وهو السهل القطبي الشمالي الذي يحيط بالغطاء الجليدي في القطب الشمالي، بالقرب من حقل الكثبان الرملية أولمبيا أونداي. ترتفع حافة الحفرة نحو 2 كيلومتر فوق السهول المحيطة. تقع أرضية الحفرة على بعد نحو 2 كيلومتر تحت الحافة، وتغطيها تلة مركزية بعمق 1.8 كيلومتر من الجليد المائي الدائم، يصل قطرها إلى 60 كيلومترًا.

الجليد مستقر بشكل دائم لأن الحفرة تعمل كمصيدة باردة طبيعية. الهواء المريخي الرقيق فوق جليد الحفرة أبرد من الهواء المحيط بالفوهة؛ كما أن الغلاف الجوي المحلي الأكثر برودة أثقل أيضًا، لذا فهو يغوص ليشكل طبقة واقية، تعزل الجليد، وتحميه من الانصهار والتبخر.

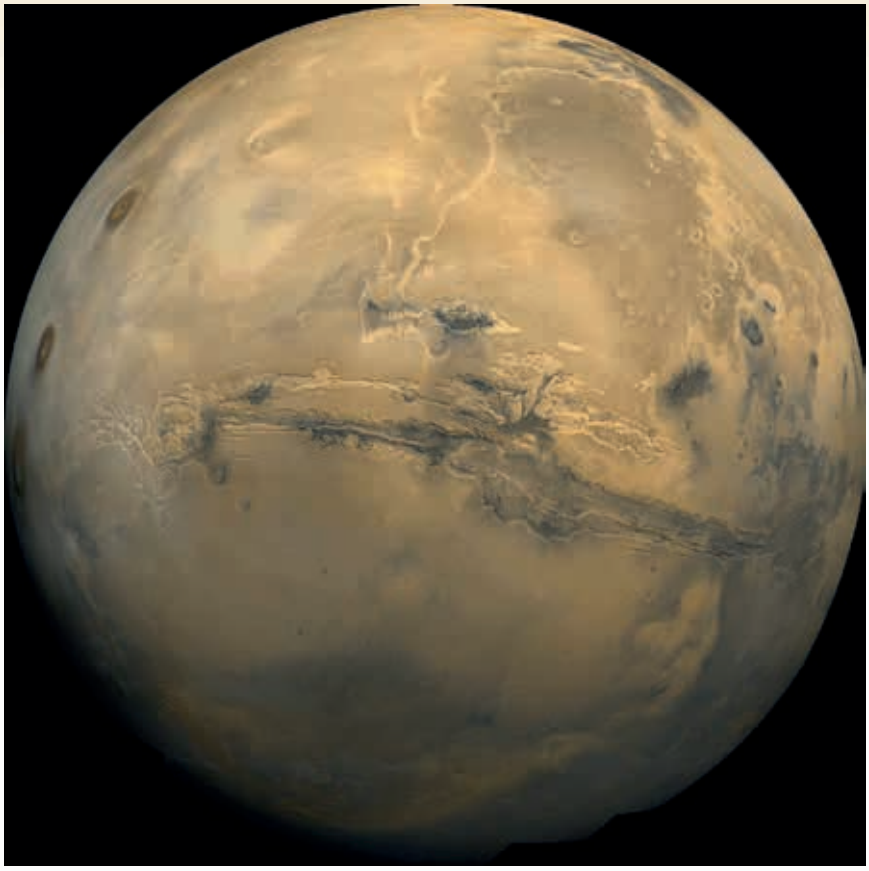
تشير الأبحاث الحديثة إلى أن الرواسب الجليدية تشكلت في مكانها داخل الحفرة ولم تكن في السابق جزءًا من طبقة جليدية قطبية أكبر. ويعد الجليد الموجود في الحفرة جزءًا من الموارد المائية الهائلة في قطبي الكوكب.



تُظهر هذه الصورة الملتقطة من مركبة Mars Express التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية فوهة كورولیف، وهي منطقة يبلغ عرضها 82 كيلومترًا توجد في الأراضي المنخفضة الشمالية للمريخ.

أيضًا هناك معلم بارز في المريخ هو الوادي الكبير. يبلغ طول الوادي الكبير، فاليس مارينريس Valles Marineris (باللاتينية «أودية مارينر»، المعروف أيضًا باسم أجاثودايمون في خرائط القناة القديمة) 4000 كيلومتر وعمق يصل إلى 7 كيلومترات. طول وادي مارينيريس يعادل طول أوروبا ويمتد عبر خمس محيط المريخ. وبالمقارنة، يبلغ طول غراند كانيون على الأرض 446 كيلومترًا فقط، وعمقه نحو 2 كيلومترًا. وتشكلت منطقة وديان مارينيريس بسبب انتفاخ منطقة ثارسيس، مما أدى إلى انهيار القشرة الأرضية في منطقة وديان مارينيريس.

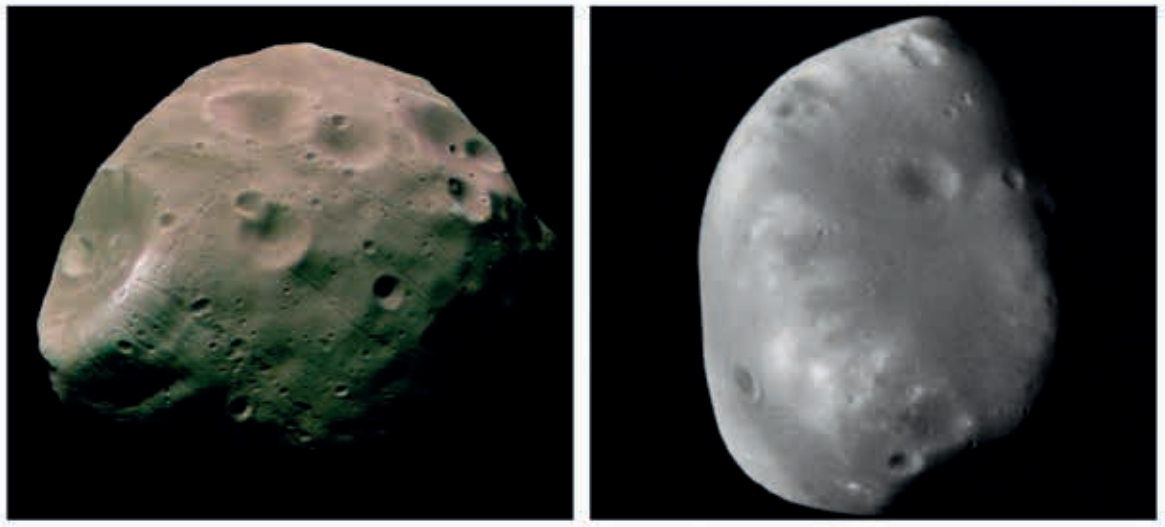
في عام 2012م، تم اقتراح أن فاليس مارينيريس ليس مجرد منطقة منتفخة، بل هو حدود صفيحة حدثت فيها حركة عرضية بطول 150 كيلومترًا، مما يجعل المريخ كوكبًا من المحتمل أن يكون به ترتيب صفيحتين تكتونيتين.



يقع في وسط الصورة وادي مارينريس، الذي يبلغ طوله أكثر من 4000 كيلومتر ويصل عمقه إلى 7 كيلومترات. لاحظ القنوات الممتدة (شمالًا) من الأجزاء الوسطى والشرقية من وادي مارينريس إلى المنطقة في أعلى اليمين، Chryse Planitia. على اليسار توجد جبال ثارسيس الثلاثة وإلى الجنوب تضاريس قديمة شديدة التأثر.

يدور حول المريخ قمران هما فوبوس وديموس. إنهما غير منتظمي الشكل. اكتشفهما عالم الفلك الأمريكي آساف هول في أغسطس 1877م وتمت تسميتهما على اسم الشخصيتين التوأم الأسطوريتين اليونانيتين فوبوس (الخوف والذعر) وديموس (الرعب والفزع) اللذين رافقا والدهما آريس في المعركة. وآريس، إله الحرب، كان معروفًا لدى الرومان باسم مارس.

بالمقارنة مع قمر الأرض، فإن الأقمار فوبوس وديموس صغيرة الحجم. يبلغ قطر فوبوس 22.2 كم وكتلته 1.08×10^{16} كغ، في حين يبلغ قطر ديموس 12.6 كم وكتلته 2.0×10^{15} كغ. يدور فوبوس بالقرب من المريخ، بمحور شبه رئيس يبلغ طوله 9,377 كيلومترًا وفترة مدارية قدرها 7.66 ساعة؛ بينما يدور ديموس أبعد بمحور شبه رئيس يبلغ 23460 كم وفترة مدارية قدرها 30.35 ساعة.

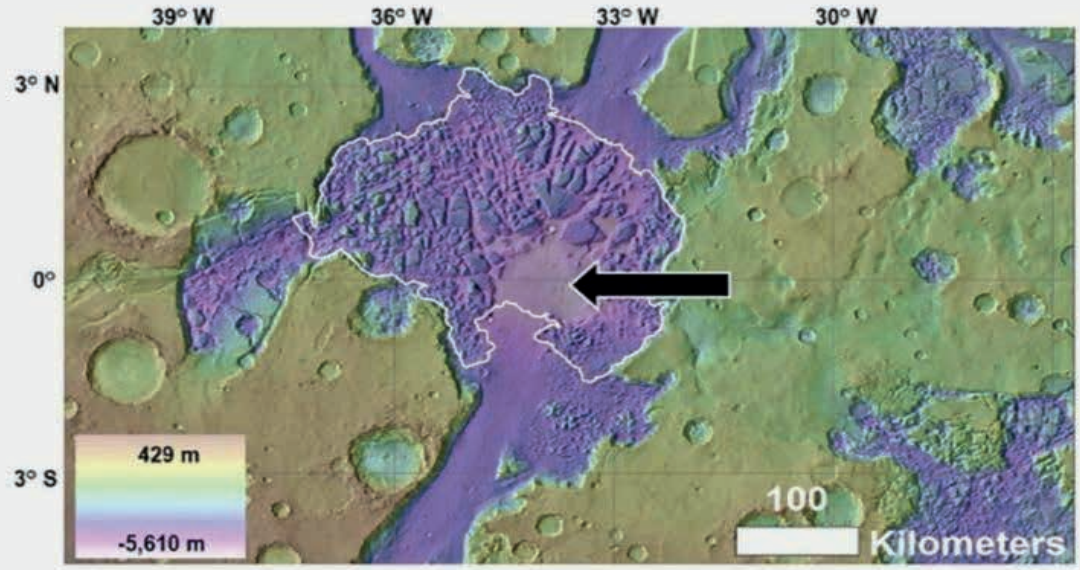


لدى المريخ قمران صغيران، فوبوس (إلى اليمين) وديموس (إلى اليسار). سطح فوبوس محزز ومنقّر ومليء بالفوهات بشكل كبير، في حين أن سطح ديموس أكثر سلاسة. يظهر فوبوس في صورة التقطتها مركبة مارس إكسبرس، مع رؤية حفرة ستيكني الكبيرة على اليسار. يظهر ديموس، القمر الأصغر والخارجي، في صورة التقطتها مركبات فايكنغ المدارية. الصور ليست على نطاق واسع.

وفي شهر أكتوبر من عام 2023م نشر الباحثون أنهم شبه متأكدين أن كوكب المريخ احتوى يوما ما على المياه مثل الأرض، بل وربما شهد ازدهار صور متنوعة للحياة قبل مليارات السنين. وفي عام 2020م انطلقت مركبة «بيرسيفيرنس» لاستكشاف فوهة جيزيرو شرقي كوكب المريخ.

وقد افترض الباحثون من وكالة الفضاء والطيران الأميركية (ناسا) أن جيزيرو كانت مغمورة بالمياه في السابق، وكانت موطنا لدلتا نهر قديم، وربما كانت بيئات المريخ القديمة قادرة على دعم الحياة الميكروبية يوما ما، ما يجعلها واحدة من أفضل أهداف المهمات من هذا النوع.

لكن فريقا بحثيًا بقيادة علماء من معهد علوم الكواكب، وهو منظمة بحثية أميركية غير ربحية، يرى أن جيزيرو ليست الأفضل، فرغم أن كميات هائلة من المياه ومعها الرواسب قد تدفقت إلى الأراضي الشمالية والشرقية للمريخ، يقترح الفريق أن الأفضل هو استكشاف منابع تلك الرواسب، وليس المكان الذي وصلت إليه.



السهول في منطقة هايدراوتس كاوس التي يرى الباحثون أنها الأفضل لدراسة الحياة القديمة على المريخ (ناسا)

وقد وقع اختيار هذا الفريق البحثي على منطقة «هايدراوتس كاوس» التي تقع بالقرب من الطرف الشرقي لوادي مارينيريس، وهو أكبر نظام وديان في المجموعة الشمسية، وهي ذات مظهر غير منتظم ومجزأ جدًا.

حيث تشكلت هذه المنطقة نتيجة انهيار السطح بسبب انطلاق الماء أو الحمم البركانية من تحت القشرة المريخية، مما أدى إلى إنشاء وديان كبيرة وهضاب معزولة.

ووفق الدراسة، التي نشرها هذا الفريق في دورية «ساينتفك ريبورتس»، فقد احتوت تلك المنطقة على عدد من السهول الرسوبية، وهي مساحات واسعة من الأراضي المسطحة أو المنحدرة بلطف، والتي تغطيها الرواسب مثل الرمل أو الطين أو الحصى التي تآكلت من صخور أخرى، وانتقلت إليها مع تيار الماء.

ويعتقد الباحثون أن طبقات الحجر الطيني في تلك المنطقة احتوت على فقاعات أو جيوب غازية تشبه تلك التي ارتبطت على كوكب الأرض بتحويل المادة العضوية من نباتات وعوالق وطحالب إلى نفط أو غاز تحت ظروف الضغط ودرجة الحرارة المرتفعة، خلال ملايين السنوات.

وتحتمل الدراسة أن غرفًا واسعةً مملوءة بالمياه قد تشكلت في باطن الحجر الطيني، يبلغ عرض الواحدة منها عدة كيلومترات وعمقها مئات الأمتار، وبذلك تكون أكبر بكثير من أي نظير معروف لها على كوكب الأرض، وهي أماكن تنتشر بها صور متنوعة للحياة. ويأمل الباحثون أن تساهم تلك النتائج في بناء رحلات مريخية مستقبلية لاستكشاف تلك المناطق والبحث عن أثر الحياة القديمة فيها.

3. حـــزام الكـويكبـــات

تُصنف الكويكبات، باستثناء الأكبر منها، سيريس، على أنها أجرامٌ صغيرة في المجموعة الشمسية وتتكون بشكل أساسي من معادن كربونية وصخرية ومعدنية مقاومة للحرارة، مع بعض الجليد. ويتراوح حجمها من بضعة أمتار إلى مئات الكيلومترات.

تسمى الكويكبات الأصغر من متر واحد عادةً بالنيازك والنيازك الدقيقة (بحجم الحبة)، مع مناقشة التقسيم الدقيق بين الفئتين على مر السنين. اعتبارًا من عام 2017م، قام الاتحاد الفلكي الدولي بتصنيف الكويكبات التي يتراوح قطرها بين نحو 30 ميكرومتر ومتر واحد على أنها نيازك دقيقة، ويطلق على الجسيمات الأصغر اسم «الغبار».

يحتل حزام الكويكبات المدار بين المريخ والمشتري، على مسافة تتراوح بين 2.3 و3.3 وحدة فلكية (340 و490 مليون كيلومتر) من الشمس. ويُعتقد أنها بقايا من تكوين المجموعة الشمسية الذي فشل في الاندماج بسبب تداخل جاذبية المشتري.

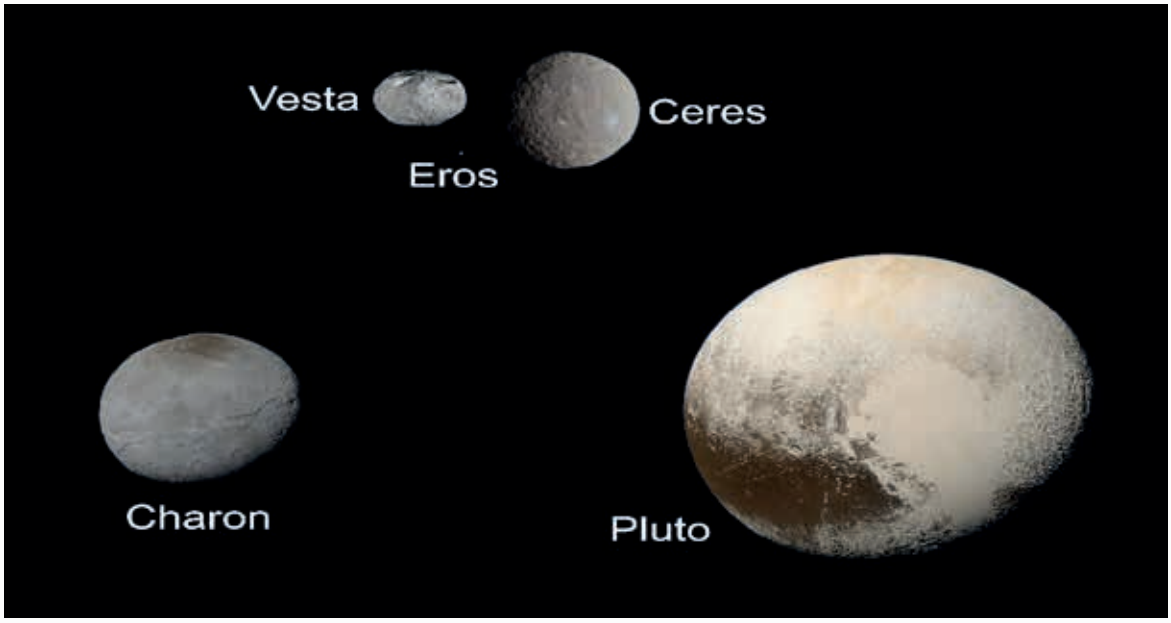
ويحوي حزام الكويكبات على عشرات الآلاف، وربما الملايين، من الأجرام التي يزيد قطرها عن كيلومتر واحد. ومع ذلك، فمن غير المرجح أن تكون الكتلة الإجمالية لحزام الكويكبات أكثر من جزء من الألف من كتلة الأرض. حزام الكويكبات ذو كثافة جرمية منخفضة جدًا؛ تمر المركبات الفضائية بشكل روتيني دون وقوع أي حادث.

حزام الكويكبات هو منطقة على شكل حلقي في المجموعة الشمسية، يتمركز حول الشمس ويمتد تقريبًا بين مدارات كوكبي المشتري والمريخ. يحوي على عدد كبير جدًا من الأجرام الصلبة غير منتظمة الشكل التي تسمى الكويكبات أو الكواكب الصغيرة.

الأجـرام التـي تم تحديدهـا لهـا أحجـام عديـدة، ولكنهـا أصغـر بكثيـر مـن الكواكـب، وتبعـد في المتوسـط نحـو مليـون كيلومتـر عـن بعضهـا بعضًـا. ويسـمى حـزام الكويكبـات هـذا أيضًـا حـزام الكويكبـات الرئيـس أو الحـزام الرئيـس لتمييـزه عـن مجموعـات الكويكبـات الأخـرى في المجموعـة الشمسـية.

حـزام الكويكبـات هـو أصغـر وأعمـق قـرص محيطـي معـروف في المجموعـة الشمسـية. فئـات الأجـرام الصغيـرة في المجموعـة الشمسـية في مناطـق أخـرى هـي الأجـرام القريبـة مـن الأرض، وأجـرام حـزام كويبـر، والأجـرام القرصيـة المتناثـرة، والأجـرام السـدنوية، وأجـرام سـحابة أورت.

نحـو 60 % مـن كتلـة الحـزام الرئيـس موجـودة في أكبـر أربعـة كويكبـات هـي: سـيريس، فيسـتا، بـالاس، وهيجيـا. وتقـدر الكتلـة الإجماليـة لحـزام الكويكبـات بنحـو 3 % مـن كتلـة القمـر.



إلى حد بعيد فإن أكبر جرم داخل الحزام هو الكوكب القزم سيريس. الكتلة الإجمالية لحزام الكويكبات أقل بكثير من كتلة بلوتو، ونحو ضعف كتلة قمر بلوتو شارون.

سيريس، الجرم الوحيد في حزام الكويكبات الكبير بما يكفي ليكون كوكبًا قزمًا، يبلغ قطره نحو 950 كيلومترًا، في حين أن أقطار فيستا وبالاس وهيجيا يبلغ متوسط أقطارها أقل من 600 كيلومتر. ويتراوح حجم الأجرام المتبقية إلى حجم ذرة الغبار.

إن مادة الكويكب موزعة بشكل رقيق جدًا لدرجة أن العديد من المركبات الفضائية غير المأهولة قد اجتازتها دون وقوع أي حادث. ومع ذلك، فإن الاصطدامات بين الكويكبات الكبيرة تحدث ويمكن أن تنتج عائلة الكويكبات، التي يتمتع أعضاؤها بخصائص وتركيبات مدارية مماثلة.

يتم تصنيف الكويكبات الفردية داخل الحزام حسب أطيافها، حيث يقع معظمها في ثلاث مجموعات أساسية: الكويكبات الكربونية (النوع C)، والسيليكات (النوع S)، والكويكبات الغنية بالمعادن (النوع M).

يتكون حزام الكويكبات من السديم الشمسي البدائي كمجموعة من الكواكب المصغرة، وهي السلائف الأصغر للكواكب الأولية. ومع ذلك، بين المريخ والمشتري، عطلت اضطرابات الجاذبية من المشتري تراكمها في كوكب، مما أدى إلى نقل الطاقة الحركية الزائدة التي حطمت الكواكب المصغرة المتصادمة ومعظم الكواكب الأولية.

ونتيجة لذلك، فقد 99.9 % من الكتلة الأصلية لحزام الكويكبات في أول 100 مليون سنة من تاريخ المجموعة الشمسية. وجدت بعض الشظايا طريقها في النهاية إلى المجموعة الشمسية الداخلية، مما أدى إلى اصطدام نيزك بالكواكب الداخلية.

تستمر مدارات الكويكبات في الاضطراب بشكل ملحوظ عندما تشكل فترة دورانها حول الشمس رنينًا مداريًا مع كوكب المشتري. عند هذه المسافات المدارية، تحدث فجوة كيركوود عند انجرافها إلى مدارات أخرى.

في عام 1802، بعد وقت قصير من اكتشاف بالاس، اقترح أولبرز على هيرشل أن سيريس وبالاس كانا أجزاء من كوكب أكبر بكثير كان يشغل منطقة المريخ والمشتري، وقد عانى هذا الكوكب من انفجار داخلي أو اصطدام مذنب قبل عدة ملايين من السنين. بينما اقترح عالم فلك أوديسان كيه إن سافتشينكو أن سيريس وبالاس وجونو وفيستا كانت أقمارًا هاربة وليست أجزاء من الكوكب المنفجر.

إن الكمية الكبيرة من الطاقة اللازمة لتدمير كوكب، بالإضافة إلى الكتلة المجمعة المنخفضة للحزام، والتي تبلغ نحو 4 % فقط من كتلة قمر الأرض، لا تدعم هذه الفرضيات. علاوة على ذلك، يصبح من الصعب تفسير الاختلافات الكيميائية الكبيرة بين الكويكبات إذا كانت قادمة من الكوكب نفسه.

تتعلق الفرضية الحديثة لإنشاء حزام الكويكبات بكيفية الاعتقاد بأن تكوين الكواكب، بشكل عام في المجموعة الشمسية، قد حدث من خلال عملية مماثلة للفرضية السديمية طويلة الأمد؛ انهارت سحابة من الغبار والغاز بين النجوم تحت تأثير الجاذبية لتشكل قرصًا دوارًا من المواد التي تكتلت بعد ذلك لتشكل الشمس والكواكب.

خلال الملايين القليلة الأولى من تاريخ المجموعة الشمسية، تسببت عملية تراكم الاصطدامات اللزجة في تكتل الجسيمات الصغيرة، والتي زاد حجمها تدريجيًا. بمجرد أن تصل الكتل إلى كتلة كافية، يمكنها جذب أجسام أخرى من خلال الجاذبية وتصبح كويكبة صغيرة. أدى تراكم الجاذبية هذا إلى تكوين الكواكب.

كانت الكواكب الصغيرة الموجودة في المنطقة التي ستصبح حزام الكويكبات مضطربة بشدة بسبب جاذبية المشتري. حدثت الرنينات المدارية عندما شكلت

الفترة المدارية لجسم ما في الحزام جزءًا صحيحًا من الفترة المدارية لكوكب المشتري، مما أدى إلى اضطراب الجرم في مدار مختلف؛ تحوي المنطقة الواقعة بين مداري المريخ والمشتري على العديد من هذه الأصداء المدارية.

ومع هجرة المشتري نحو الداخل بعد تشكله، لا بد أن هذه الأصداء قد اجتاحت حزام الكويكبات، مما أدى إلى إثارة أجرام المنطقة ديناميكيًا وزيادة سرعاتها بالنسبة لبعضهم بعضًا.

وفي المناطق التي كان فيها متوسط سرعة الاصطدامات مرتفعًا جدًا، كان تحطم الكواكب المصغرة يميل إلى السيطرة على التراكم، مما يمنع تكوين الكوكب. وبدلاً من ذلك، استمرا في الدوران حول الشمس كما كان من قبل، وكانا يصطدمان أحيانًا.

خلال التاريخ المبكر للنظام الشمسي، انصهرت الكويكبات إلى حد ما، مما سمح للعناصر الموجودة بداخلها بالتمييز جزئيًا أو كليًا حسب الكتلة. ربما تكون بعض الأجرام السلفية قد خضعت لفترات من التفجير البركاني وتشكلت محيطات من الصهارة.

ومع ذلك، نظرًا لصغر حجم الأجرام نسبيًا، كانت فترة الانصهار قصيرة بالضرورة مقارنة بالكواكب الأكبر حجمًا، وانتهت بشكل عام منذ نحو 4.5 بليون سنة، في أول عشرات الملايين من السنين من التكوين.

في أغسطس 2007م، أشارت دراسة لبلورات الزركون في نيزك في القطب الجنوبي يعتقد أنه نشأ من فيستا، وبالتالي بقية حزام الكويكبات، قد تشكل بسرعة إلى حد ما، في غضون 10 ملايين سنة من نشأة المجموعة الشمسية.

الكويكبات ليست عينات أصلية من المجموعة الشمسية البدائية. لقد خضعت لتطور كبير منذ تكوينها، بما في ذلك التسخين الداخلي (في عشرات الملايين من السنين الأولى)، وذوبان السطح من الصدمات، والتجوية الفضائية من الإشعاع، والقصف بالنيازك الدقيقة. مع أن بعض العلماء يشيرون إلى الكويكبات على أنها كواكب مصغرة متبقية، إلا أن علماء آخرين يعتبرونها متمايزة عن الكواكب.

ويعتقد أن حزام الكويكبات الحالي يحوي فقط جزءا صغيرًا من كتلة الحزام البدائي. تشير عمليات المحاكاة الحاسوبية إلى أن حزام الكويكبات الأصلي ربما كان على كتلة تعادل كتلة الأرض.

في المقام الأول بسبب اضطرابات الجاذبية، جرى إخراج معظم المواد من الحزام خلال نحو مليون سنة من التكوين، تاركة وراءها أقل من 0.1 % من الكتلة الأصلية.

منذ تكوينه، بقي توزيع حجم حزام الكويكبات مستقرًا نسبيًا؛ لم تحدث أي زيادة أو نقصان كبير في الأبعاد النموذجية للكويكبات الموجودة في الحزام الرئيسي.

يمكن اعتبار الرنين المداري 4:1 مع كوكب المشتري، عند نصف قطر 2.06 وحدة فلكية (AUs)، الحد الداخلي لحزام الكويكبات. تؤدي الاضطرابات التي يسببها كوكب المشتري إلى تحرّك الأجرام هناك إلى مدارات غير مستقرة. تم اجتياح معظم الأجرام التي تشكلت داخل نصف قطر هذه الفجوة بواسطة المريخ (الذي يبلغ أوجه عند 1.67 وحدة فلكية) أو تم طرده بسبب اضطرابات الجاذبية في التاريخ المبكر للنظام الشمسي.

تقع الكويكبات المجرية بالقرب من الشمس بدرجة رنين 4:1، ولكنها محمية من الاضطراب بسبب ميلها العالي.

عندما تشكل حزام الكويكبات لأول مرة، شكلت درجات الحرارة على مسافة 2.7 وحدة فلكية من الشمس «خطًا ثلجيًا» أسفل نقطة تجمد الماء. وكانت الكواكب المصغرة التي تشكلت خارج نصف القطر هذا قادرة على تجميع الجليد.

وفي عام 2006م، اكتشفت مجموعة من المذنبات داخل حزام الكويكبات خلف خط الثلج، والتي ربما تكون قد وفرت مصدرًا للمياه لمحيطات الأرض. وفقًا لبعض النماذج، لم يكن إطلاق الغازات من الماء خلال فترة تكوين الأرض كافيًا لتكوين المحيطات، مما يتطلب مصدرًا خارجيًا مثل قصف المذنبات.

ويبدو أن حزام الكويكبات الخارجي يتضمن بعض الأجرام التي ربما وصلت إلى هناك خلال مئات السنين القليلة الماضية، وتشمل القائمة (457175) 2008 GO98 المعروف أيضًا باسم 362P.

الكويكب فيستا في فجر يوم 18 يوليو 2011م. جرى التقاط الصورة من مسافة (10500 كم) . أصغر التفاصيل المرئية يبلغ عرضها نحو (2.0 كم).

وعلى عكس الصور الشائعة، فإن حزام الكويكبات فارغ في الغالب. تنتشر الكويكبات على مساحة كبيرة لدرجة أن الوصول إلى كويكب دون التصويب بعناية سيكون أمرًا غير محتمل.

ومع ذلك، هناك مئات الآلاف من الكويكبات المعروفة حاليًا، ويتراوح العدد الإجمالي بالملايين أو أكثر، اعتمادًا على الحجم الأقل. ومن المعروف أن أكثر من 200 كويكب يبلغ حجمها أكبر من 100 كيلومتر مكعب، وأظهر المسح في الأطوال الموجية للأشعة تحت الحمراء أن حزام الكويكبات يضم ما بين 700 ألف و1.7 مليون كويكب يبلغ قطرها كيلومترًا واحدًا أو أكثر.

يزداد عدد الكويكبات في الحزام الرئيس بشكل مطرد مع تناقص الحجم. مع أن توزيع الحجم يتبع عمومًا قانون القوة، إلا أن هناك «نتوءات» في المنحنى عند نحو 5 كم و100 كم، حيث يعثر على كويكبات أكثر من المتوقع من مثل هذا المنحنى.

معظم الكويكبات التي يزيد قطرها عن 120 كيلومتر تقريبًا هي كويكبات بدائية، وقد نجت من عصر التنامي، في حين أن معظم الكويكبات الأصغر حجمًا هي نتاج تجزئة الكويكبات البدائية. ربما كان عدد الكويكبات البدائية في الحزام الرئيس أكبر بـ 200 مرة مما هو عليه اليوم.

تتراوح الأحجام المطلقة لمعظم الكويكبات المعروفة بين 11 و 19، ويبلغ المتوسط نحو 16. في المتوسط، تبلغ المسافة بين الكويكبات نحو 965,600 كيلومتر، على الرغم من أن هذا يختلف بين عائلات الكويكبات، وقد تكون الكويكبات الأصغر حجمًا والتي لم يتم اكتشافها هي الأقرب.

تقدر الكتلة الإجمالية لحزام الكويكبات بـ 2.39×10^{21} كغ، أي 3 % فقط من كتلة القمر. تحوي الأجرام الأربعة الأكبر، سيريس وفيستا وبالاس وهيجيا، على ما يقدر بـ 62 % من الكتلة الإجمالية للحزام، منها 39 % لسيريس وحده.

• المجموعة الشمسية الخارجية

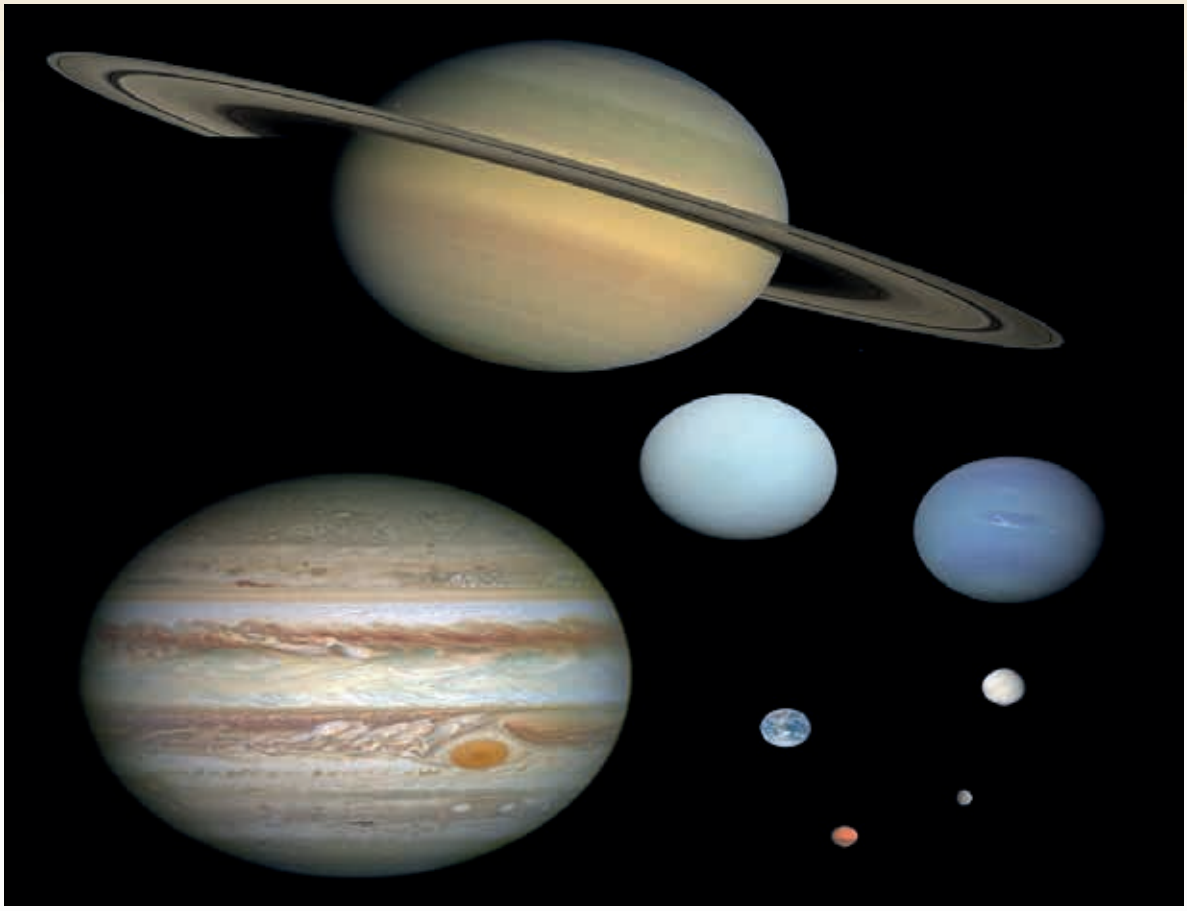
المنطقة الخارجية للمجموعة الشمسية هي موطن للكواكب العملاقة وأقمارها الكبيرة. تدور أيضًا في هذه المنطقة العديد من المذنبات قصيرة المدى. نظرًا لبعدها الكبير عن الشمس، تحوي الأجرام الصلبة في المجموعة الشمسية الخارجية على نسبة أعلى من المواد المتطايرة، مثل الماء والأمونيا والميثان، مقارنة بتلك الموجودة في المجموعة الشمسية الداخلية لأن درجات الحرارة المنخفضة تسمح لهذه المركبات بالبقاء صلبة. دون معدلات كبيرة من التسامي.

تشكل الكواكب الخارجية الأربعة، والتي تسمى أيضًا الكواكب العملاقة أو كواكب المشتري، مجتمعة 99 % من الكتلة المعروفة التي تدور حول الشمس. تبلغ كتلة كوكب المشتري وزحل معًا أكثر من 400 مرة كتلة الأرض، ويتكون معظمهما من غازي الهيدروجين والهيليوم، ومن هنا تم تصنيفهما كعمالقة غازية.

أورانوس ونبتون أقل كتلة بكثير - أقل من 20 كتلة أرضية لكل منهما - ويتكونان بشكل أساسي من الجليد. ولهذه الأسباب، يقترح بعض علماء الفلك أنها تنتمي إلى فئتها الخاصة، وهي عمالقة الجليد.

تحوي جميع الكواكب العملاقة الأربعة على حلقات، مع أنه يمكن ملاحظة نظام حلقات زحل فقط بسهولة من الأرض. يشير مصطلح الكوكب العلوي إلى الكواكب الواقعة خارج مدار الأرض، وبالتالي يشمل الكواكب الخارجية والمريخ.

تشبه أنظمة القمر الحلقي للمشتري وزحل وأورانوس نسخًا مصغرة من المجموعة الشمسية؛ يختلف كوكب نبتون بشكل كبير، حيث تعطل بسبب الاستيلاء على أكبر أقماره تريتون.

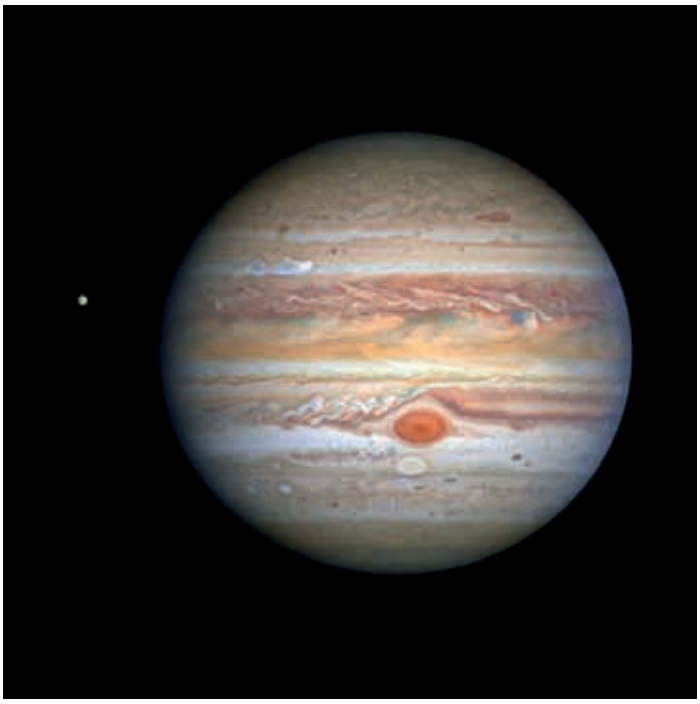


الكواكب الخارجية: المشتري وزحل وأورانوس ونبتون، مقارنة بالكواكب الداخلية الأرض والزهرة والمريخ وعطارد في أسفل اليمين.

1. كوكـــب المشـــــتري

يبعد كوكب المشتري (5.457–4.951 وحدة فلكية (816.4–740.7 مليون كيلومتر) عن الشمس)، وتبلغ كتلته 2.5 ضعف كتلة جميع الكواكب الأخرى مجتمعة. ويتكون إلى حد كبير من الهيدروجين والهيليوم. تخلق الحرارة الداخلية القوية لكوكب المشتري سمات شبه دائمة في غلافه الجوي، مثل العصابات السحابية والبقعة الحمراء الكبرى.

يمتلك الكوكب غلافًا مغناطيسيًا بقوة 4.2–14 غاوس يمتد لمسافة 22–29 مليون كيلومتر، مما يجعله، في بعض النواحي، أكبر جسم في المجموعة الشمسية. كوكب المشتري لديه 95 قمرًا طبيعيًا معروفًا. تُسمى الأقمار الأربعة الأكبر، جانيميد، وكاليستو، وآيو، وأوروبا، بالأقمار الغاليلية: فهي تظهر أوجه تشابه مع الكواكب الأرضية، مثل البراكين والتدفئة الداخلية. جانيميد، أكبر قمر طبيعي في المجموعة الشمسية، أكبر من عطارد؛ كاليستو كبير تقريبًا.



كوكب المشتري مع قمره أوروبا على اليسار. قطر الأرض أصغر بـ 11 مرة من قطر المشتري، وأكبر بـ 4 مرات من أوروبا.

كوكب المشتري هو الكوكب الخامس من الشمس والأكبر في المجموعة الشمسية. وهو عملاق غازي تبلغ كتلته ضعفي ونصف كتلة جميع الكواكب الأخرى في المجموعة الشمسية مجتمعة، وأقل بقليل من واحد في الألف من كتلة الشمس.

يـدور كوكـب المشـتري حـول الشـمس خـلال فتـرة مداريـة تبلـغ 11.86 سـنة. كوكـب المشـتري هـو ثالـث ألمـع جـرم طبيعـي في سـماء الأرض ليـلًا بعـد القمـر والزهـرة، وقـد رُصـد منـذ عصـور مـا قبـل التاريـخ. وقـد سُـمي علـى اسـم جوبيتـر، الإلـه الرئيسـي للديانـة الرومانيـة القديمـة.

كان كوكـب المشـتري أول كوكـب يتشـكل، وقـد أثـرت هجرتـه إلـى الداخـل خـلال المجموعـة الشمسـية البدائيـة علـى الكثيـر مـن تاريـخ تكويـن الكواكـب الأخـرى. يتكـون المشـتري بشـكل أساسـي مـن الهيدروجـين (90 % مـن حيـث الحجـم)، يليـه الهيليـوم الـذي يشـكل ربـع كتلتـه وعُشـر حجمـه.

يؤدي الانكماش المستمر للجزء الداخلي من كوكب المشتري إلى توليد حرارة أكثر مما يتلقاه الكوكب من الشمس. يُعتقد أن هيكله الداخلي يتكون من غلاف خارجي من الهيدروجين المعدني السائل، ونواة داخلية منتشرة من مادة أكثر كثافة. بسبب معدل دورانه السريع الذي يبلغ دورة واحدة كل 10 ساعات، فإن شكل المشتري عبارة عن جسم كروي مفلطح: له انتفاخ طفيف ملحوظ حول خط الاستواء.

ينقسم الغلاف الجوي الخارجي إلى سلسلة من خطوط العرض، مع وجود اضطرابات وعواصف على طول حدودها المتفاعلة. والنتيجة الأكثر وضوحًا لذلك هي البقعة الحمراء الكبرى، وهي عاصفة عملاقة رُصدت منذ عام 1831 وربما قبل ذلك.

كوكـب المشـتري محـاط بنظـام حلقـات كوكبيـة خافـت، ذو غـلاف مغناطيسـي قوي، وهو ثاني أكبر هيكل مجاور في المجموعة الشمسية (بعد الغلاف الشمسي). يشـكل كوكـب المشـتري نظامًـا مكونًـا مـن 95 قمـرًا معروفًـا وربمـا أكثـر مـن ذلـك بكثيـر، بمـا في ذلـك الأقمـار الأربعـة الكبيـرة التـي اكتشـفها غاليليـو غاليلـي في عـام

1610: آيو، وأوروبا، وغانيميد، وكاليستو. جانيميد، وهو الأكبر بين الكواكب الأربعة، أكبر من كوكب عطارد. كاليستو هو ثاني أكبر قمر؛ يبلغ حجم آيو وأوروبا تقريبًا حجم قمر الأرض.

منذ عام 1973م، أمكن زيارة كوكب المشتري بواسطة تسعة سوابر آلية: سبع رحلات جوية ومركبتان مداريتان مخصصتان، وواحدة أخرى في الطريق وواحدة في انتظار الإطلاق.

تبلغ كتلة كوكب المشتري 318 مرة كتلة الأرض؛ 2.5 مرة من جميع الكواكب الأخرى في المجموعة الشمسية مجتمعة. إنه ضخم جدًا لدرجة أن مركزه مع الشمس يقع فوق سطح الشمس عند 1.068 نصف قطر شمسي من مركز الشمس.

ويبلغ نصف قطر المشتري نحو عُشر نصف قطر الشمس، وكتلته جزء من الألف من كتلة الشمس، إذ أن كثافات الجسمين متشابهة. غالبًا ما تُستخدم «كتلة المشتري» (M_J أو M_{Jup}) كوحدة قياس لوصف كتل الأجرام الأخرى، خاصة الكواكب خارج المجموعة الشمسية والأقزام البنية. على سبيل المثال، تبلغ كتلة الكوكب الموجود خارج المجموعة الشمسية التي تسمى HD 209458 b $0.69M_{Jup}$، في حين تبلغ كتلة القزم البني Gliese 229 b $60.4M_{Jup}$.

من السمات المعروفة والشهيرة لكوكب المشتري هي البقعة الحمراء العظيمة، وهي عاصفة مستمرة تقع على بعد 22 درجة جنوب خط الاستواء. رُصدت لأول مرة في عام 1831م، وربما في وقت مبكر من عام 1665م. وقد أظهرت الصور التي التقطها تلسكوب هابل الفضائي «بقعتين حمراوين» أخريين مجاورتين للبقعة الحمراء العظيمة.

جرى التقاط هذه الصورة للبقعة الحمراء العظيمة الشهيرة لكوكب المشتري والمناطق المضطربة المحيطة بها بواسطة مركبة جونو الفضائية التابعة لناسا.

يمكن رؤية العاصفة من خلال التلسكوبات الأرضية بفتحة قطرها 12 سم أو أكبر. يدور الجسم البيضاوي عكس اتجاه عقارب الساعة، لمدة ستة أيام تقريبًا. أقصى ارتفاع لهذه العاصفة هو نحو 8 كيلومترات فوق قمم السحب المحيطة. لا يزال تكوين البقعة ومصدر لونها الأحمر غير مؤكدين، مع أن تفاعل الأمونيا المتفكك ضوئيًا مع الأسيتيلين هو التفسير المحتمل.

البقعة الحمراء العظيمة تتسع لاثنين من كوكب الأرض. تشير النماذج الرياضياتية إلى أن العاصفة مستقرة وستكون سمة دائمة للكوكب. ومع ذلك، فقد انخفض حجمها بشكل ملحوظ منذ اكتشافها. أظهرت الأرصاد الأولية في أواخر القرن التاسع عشر أن عرضها بلغ نحو 41000 كيلومتر.

بحلول وقت تحليق فوياجر في عام 1979م، كان طول العاصفة 23300 كم وعرضها نحو 13000 كم. وأظهرت أرصاد هابل في عام 1995م أن حجمها قد انخفض إلى 20950 كيلومترًا، وأظهرت أرصاد عام 2009م أن الحجم أصبح 17,910 كيلومترًا. اعتبارًا من عام 2015م، تم قياس مساحة العاصفة بنحو 16500 × 10940 كم، وكان طولها يتناقص بنحو 930 كم سنويًا. في أكتوبر 2021م، قامت مهمة التحليق جونو بقياس أبعاد البقعة الحمراء العظيمة، ووضعتها عند نحو 300-500 كيلومتر.

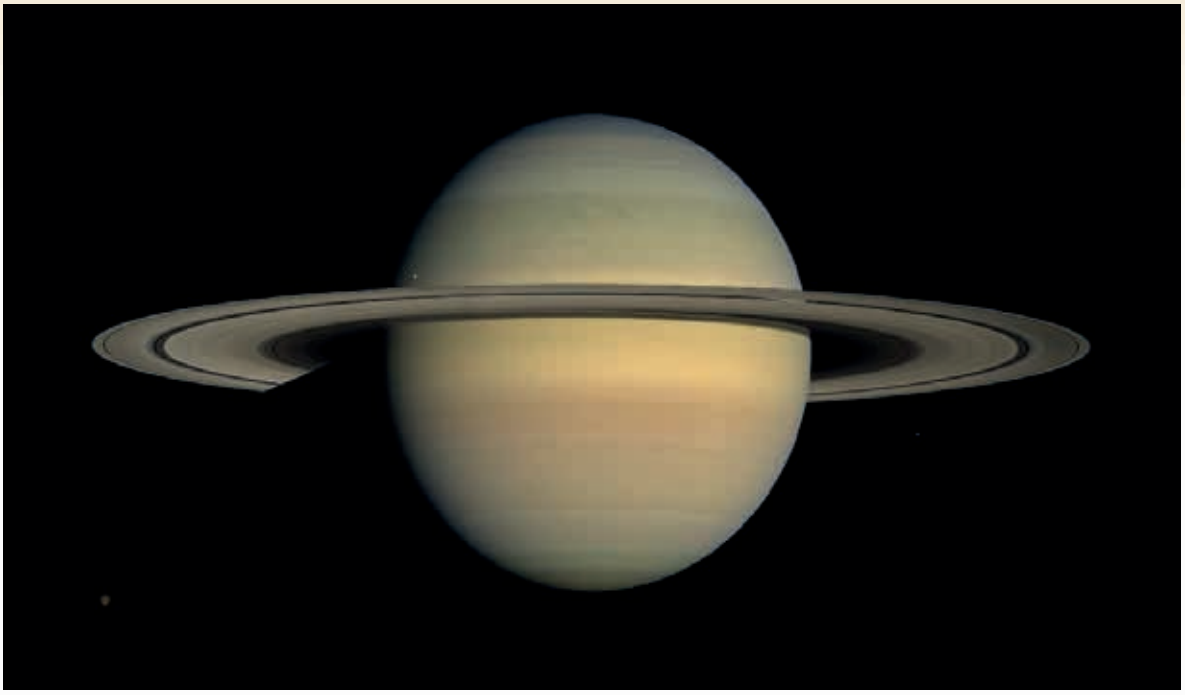
لدى كوكب المشتري 95 قمرًا طبيعيًا معروفًا، ومن المحتمل أن يرتفع هذا العدد في المستقبل بسبب تحسن الأجهزة؛ 79 منها يقل قطرها عن 10 كيلومترات. الأقمار الأربعة الأكبر هي غانيميد، كاليستو، آيو وأوروبا (حسب الحجم التنازلي)، والمعروفة مجتمعة باسم «أقمار غاليليو»، ويمكن رؤيتها من الأرض بالمنظار في ليلة صافية.

تتضمن هذه الصورة المركبة أكبر أربعة أقمار لكوكب المشتري والمعروفة باسم أقمار غاليليو. شوهدت أقمار غاليليو لأول مرة من قبل عالم الفلك الإيطالي غاليليو غاليلي في عام 1610م. يظهر من اليسار إلى اليمين أقمار كوكب المشتري، آيو هو الأقرب، يليه أوروبا، وجانيميد، وكاليستو.

2. كوكـــب زحـــل

يبعـد زحـل 10.07–9.075 وحـدة فلكيـة (1.5065–1.3576 بليـون كـم) مـن الشـمس، وهـو يتميـز بنظـام حلقاتـه الواسـع، ولـه العديـد مـن أوجـه التشـابه مـع كوكـب المشـتري، مثـل تكويـن الغـلاف الجـوي والغـلاف المغناطيسـي. مـع أن حجـم زحـل يبلـغ 60 % مـن حجـم كوكـب المشـــتري، إلا أنـه أقـل مـن ثلـث كتلتـه، حيـث يبلـغ 95 كتلـة الأرض.

زحـل هـو الكوكـب الوحيـد في المجموعـة الشمسـية الأقـل كثافـة مـن المـاء. تتكـون حلقـات زحـل مـن جزيئـات صغيـرة مـن الجليـد والصخـور. لـدى زحـل 145 قمـرًا طبيعيًـا مؤكـدًا يتكـون معظمهـا مـن الجليـد. يظهـر اثنـان منهـا، تيتـان وإنسـيلادوس، علامـات علـى النشـاط الجيولوجـي؛ وهـي، بالإضافـة إلـى خمسـة أقمـار زحـل أخـرى (إيابيتـوس، ريـا، ديـون، تيثيـس، وميمـاس)، كبيـرة بمـا يكفـي لتكـون مسـتديرة. تيتـان هـو ثانـي أكبـر قمـر في المجموعـة الشمسـية، وهـو أكبـر مـن عطـارد والقمـر الطبيعـي الوحيـد في المجموعـة الشمسـية الـذي يتمتـع بغـلاف جـوي كبيـر.



هذه الصُورة الآسرة ذات الألوان الطبيعيّة لِكوكب زُحل صُنعت عبر دمج عدّة صُور التُقطت بعد فترةٍ قصيرةٍ من بدء سابر كاسيني بِمُهمّته الطويلة القاضية بِمُراقبة الاعتدال الشمسي، في شهر يوليو 2008م. (في الواقع بلغ زُحل اعتدالهُ الشمسي يوم 11 أغسطس 2009م).

زحل هو الكوكب السادس من الشمس وثاني أكبر كوكب في المجموعة الشمسية بعد كوكب المشتري. إنه عملاق غازي يبلغ متوسط نصف قطره نحو تسعة أضعاف ونصف قطر الأرض. تبلغ كثافته ثُمن متوسط كثافة الأرض فقط، ولكنها أكبر منه بـ 95 مرة.

يُعتقد أن باطن زحل يتكون من نواة صخرية، محاطة بطبقة عميقة من الهيدروجين المعدني، وطبقة متوسطة من الهيدروجين السائل والهيليوم السائل، وأخيرًا طبقة خارجية غازية. يتمتع زحل بلون أصفر شاحب بسبب وجود بلورات الأمونيا في غلافه الجوي العلوي.

يُعتقد أن التيار الكهربائي داخل طبقة الهيدروجين المعدني يؤدي إلى ظهور المجال المغناطيسي لكوكب زحل، وهو أضعف من المجال المغناطيسي للأرض، ولكنه ذو عزم مغناطيسي أكبر بـ 580 مرة من الأرض بسبب حجم زحل الأكبر. تبلغ قوة المجال المغناطيسي لزحل نحو واحد على عشرين من قوة كوكب المشتري.

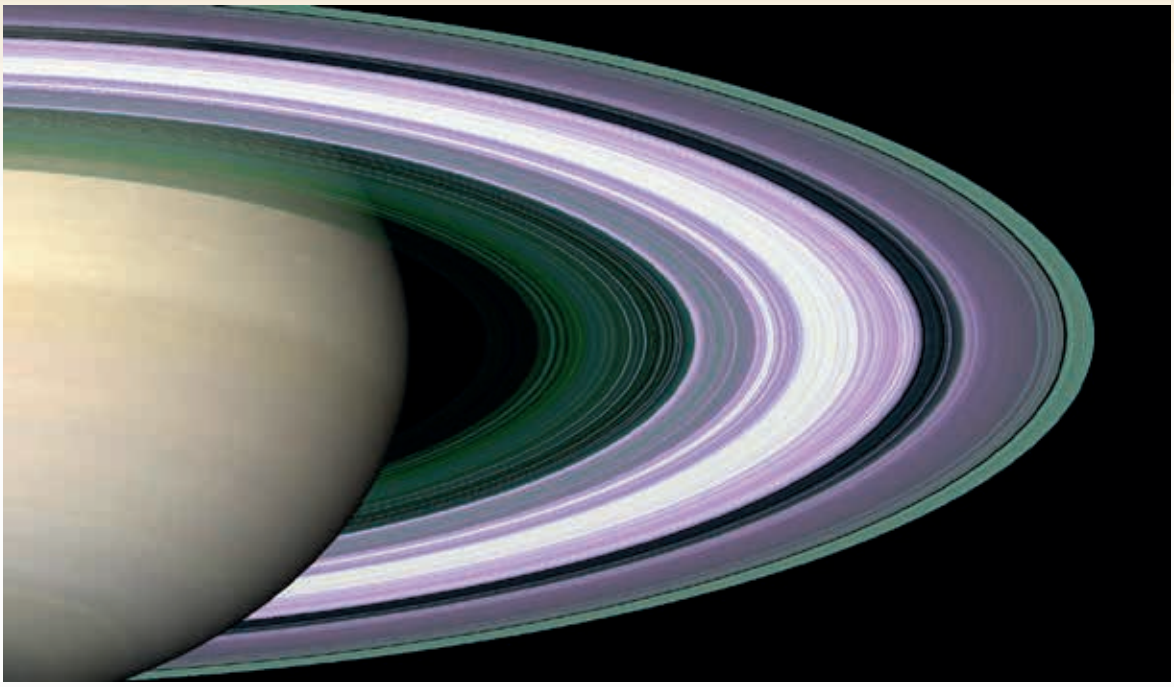
الغلاف الجوي الخارجي لطيف عمومًا ويفتقر إلى التباين، مع إمكانية ظهور سمات طويلة الأمد. يمكن أن تصل سرعة الرياح على زحل إلى 1800 كيلومتر في الساعة.

يمتلك الكوكب نظامًا حلقيًا بارزًا، يتكون أساسًا من جزيئات الجليد، مع كمية أقل من الحطام الصخري والغبار. من المعروف أن ما لا يقل عن 146 قمرًا يدور حول الكوكب، منها 63 قمرًا أمكن تسميتها رسميًا؛ وهذا لا يشمل مئات الأقمار الصغيرة الموجودة في حلقاته.

تيتان هو أكبر قمر لزحل وثاني أكبر قمر في المجموعة الشمسية، وهو أكبر من كوكب عطارد (رغم أنه أقل كتلة)، وهو القمر الوحيد في المجموعة الشمسية الذي يتمتع بغلاف جوي كبير.

حلقات زحل هي النظام الحلقي الأكثر شمولًا لأي كوكب في المجموعة الشمسية. وهي تتكون من عدد لا يحصى من الجسيمات الصغيرة، التي تتراوح أحجامها من الميكرومترات إلى الأمتار، والتي تدور حول زحل. تتكون جزيئات الحلقة بالكامل تقريبًا من جليد الماء، مع بقايا من المواد الصخرية.

لا يوجد حتى الوقت الحالي إجماع حول آلية تشكيلها. مع أن النماذج النظرية تشير إلى أن الحلقات من المحتمل أن تكون قد تشكلت في وقت مبكر من تاريخ المجموعة الشمسية، إلا أن البيانات الأحدث من كاسيني تشير إلى أنها تشكلت في وقت متأخر نسبيًا.



في هذه الصورة المحاكاة لحلقات زحل، يُستخدم اللون لتقديم معلومات حول أحجام جسيمات الحلقة في مناطق مختلفة بناءً على التوهين المُقاس لثلاث إشارات راديوية.

على الرغم من أن الانعكاس من الحلقات يزيد من سطوع زحل، إلا أنها غير مرئية من الأرض بالرؤية المجردة. في عام 1610م، بعد عام من توجيه غاليليو غاليلي التلسكوب إلى السماء، أصبح أول شخص يراقب حلقات زحل، مع أنه لم يتمكن من رؤيتها جيدًا بما يكفي لتمييز طبيعتها الحقيقية. وفي عام 1655م، كان كريستيان هايغنز أول من وصفها بأنها قرص يحيط بزحل. يمكن إرجاع المفهوم القائل بأن حلقات زحل تتكون من سلسلة من الحلقات الصغيرة إلى بيير سيمون لابلاس، مع أن الفجوات الحقيقية قليلة، فمن الأصح التفكير في الحلقات كقرص حلقي ذو كثافة محلية قصوى ودنيا متحدة المركز وساطعة. على مقياس الكتل داخل الحلقات هناك مساحة فارغة كبيرة.

تحوي الحلقات على فجوات عديدة حيث تنخفض كثافة الجسيمات بشكل حاد: اثنتين تفتحهما أقمار معروفة مدمجة بداخلهما، والعديد من الفجوات الأخرى في مواقع معروفة بالرنين المداري المزعزع للاستقرار مع أقمار زحل. ولا تزال هناك فجوات أخرى غير مفسرة. من ناحية أخرى، فإن الرنينات المستقرة هي المسؤولة عن طول عمر العديد من الحلقات، مثل حلقتي Titan Ringlet وG Ring.

توجد حلقة فيبي خلف الحلقات الرئيسة، والتي يُفترض أنها نشأت من فيبي وبالتالي تشترك في حركتها المدارية التراجعية. وهي تتوافق مع مستوى مدار زحل. زحل لديه ميل محوري قدره 27 درجة، لذلك تميل هذه الحلقة بزاوية 27 درجة إلى الحلقات الأكثر وضوحًا التي تدور فوق خط استواء زحل.

وفي سبتمبر 2023م، أبلغ علماء الفلك عن دراسات تشير إلى أن حلقات زحل قد تكون نتجت عن اصطدام قمرين «قبل بضع مئات الملايين من السنين».

3. أورانـــــوس

يبعد كوكب أورانوس 18.27–20.06 وحدة فلكية (2.733–3.001 بليون كيلومتر) عن الشمس، وتعادل كتلته 14 ضعف كتلة الأرض، لديه أدنى كتلة بين الكواكب الخارجية. وهو فريد من نوعه بين الكواكب، فهو يدور حول الشمس من جانبها؛ يزيد ميله المحوري عن تسعين درجة إلى مسير الشمس. وهذا يعطي الكوكب تباينًا موسميًا شديدًا حيث يشير كل قطب نحو الشمس ثم بعيدًا عنها.

يحوي على نواة أكثر برودة بكثير من الكواكب العملاقة الأخرى ويشع القليل جدًا من الحرارة في الفضاء. ونتيجة لذلك، فهو يتمتع بأبرد جو كوكبي في

المجموعة الشمسية. لدى أورانوس 27 قمرًا طبيعيًا معروفًا، أكبرها هي تيتانيا وأوبيرون وأومبرييل وأرييل وميراندا. مثل الكواكب العملاقة الأخرى، فهو يمتلك نظامًا حلقيًا وغلافًا مغناطيسيًا.

هذه صورة لكوكب أورانوس التقطتها المركبة الفضائية فوياجر2- في عام 1986م.

أورانوس هو الكوكب السابع من الشمس وهو عملاق غازي سماوي جليدي. يتكون معظم الكوكب من الماء والأمونيا والميثان في مرحلة فوق حرجة من المادة، والتي يطلق عليها في علم الفلك «الجليد» أو المواد المتطايرة. يحوي الغلاف الجوي للكوكب على بنية سحابية معقدة، ولديه أدنى درجة حرارة دنيا تبلغ 49 كلفن (– 224 درجة مئوية) من بين جميع كواكب المجموعة الشمسية.

تبلغ قيمة ميله المحوري 97.8 درجة مع معدل دوران رجعي قدره 17 ساعة. وهذا يعني أنه خلال فترة مدارية تبلغ 84 سنة أرضية حول الشمس، يتلقى قطباه نحو 42 سنة من ضوء الشمس المستمر، تليها 42 سنة من الظلام المستمر.

يمتلك أورانوس ثالث أكبر قطر ورابع أكبر كتلة بين كواكب المجموعة الشمسية. بناءً على النماذج الحالية، يوجد داخل طبقة الوشاح المتطايرة نواة صخرية، ويحيط بها غلاف جوي سميك من الهيدروجين والهيليوم.

اكتشفت كميات ضئيلة من الهيدروكربونات (يعتقد أنها تنتج عن طريق التحلل المائي) وأول أكسيد الكربون مع ثاني أكسيد الكربون (يعتقد أنه نشأ من المذنبات) في الغلاف الجوي العلوي.

هناك العديد من الظواهر المناخية غير المفسرة في الغلاف الجوي لأورانوس، مثل ذروة سرعة الرياح البالغة 900 كم/ساعة، والتغيرات في الغطاء القطبي وتكوين السحب غير المنتظم. كما يتمتع الكوكب بحرارة داخلية منخفضة جدًا مقارنة بالكواكب العملاقة الأخرى، وهو أمر لا يزال غير مفسر.

مثل الكواكب العملاقة الأخرى، يمتلك أورانوس نظامًا حلقيًا، يدور حوله أقمار طبيعية، وغلاف مغناطيسي. نظام حلقاته مظلم جدًا، حيث ينعكس نحو 2 % فقط من الضوء الوارد، ويحوي على 13 قمرًا داخليًا معروفًا.

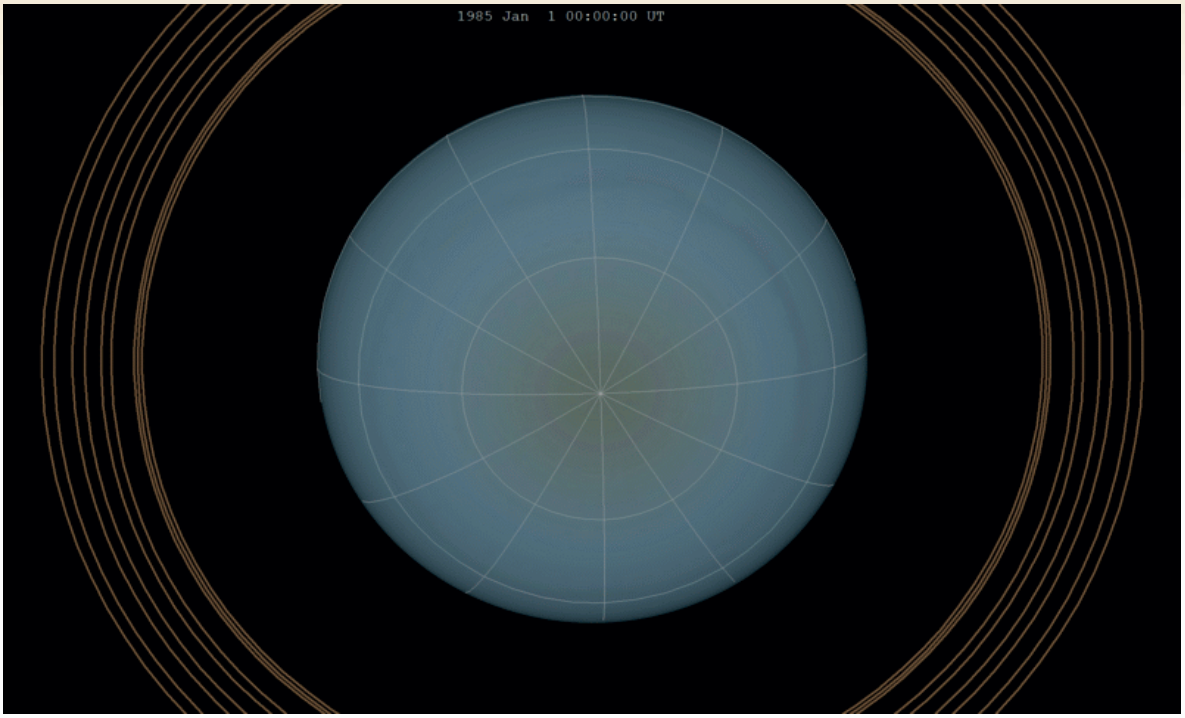
علاوة على ذلك، توجد الأقمار الخمسة الرئيسة الأكبر للكوكب: ميراندا، وأرييل، وأومبرييل، وتيتانيا، وأوبيرون؛ وتدور على مسافة أكبر بكثير من أورانوس، وهي الأقمار التسعة غير النظامية المعروفة. الغلاف المغناطيسي

للكوكب غير متناظر إلى حد كبير ويحوي على العديد من الجزيئات المشحونة، مما قد يتسبب في سواد حلقاته وأقماره.

أورانوس مرئي بالعين المجردة، لكنه خافت جدًا ولم يصنف كوكبًا حتى عام 1781م، عندما رصده وليم هيرشل لأول مرة. وبعد نحو سبعة عقود من اكتشافه، تم التوصل إلى إجماع على تسمية الكوكب باسم أورانوس، أحد الآلهة اليونانية البدائية.

اعتبارًا من عام 2023م، أمكن زيارته عن قرب مرة واحدة فقط عندما طار السابر فوياجر- 2 بالقرب منه في عام 1986م. على الرغم من إمكانية حل المشكلة ومراقبته في الوقت الحاضر بواسطة التلسكوبات، إلا أن هناك رغبة كبيرة في زيارة الكوكب مرة أخرى، كما يتضح من قرار المسح العقدي لعلوم الكواكب بجعل مهمة أورانوس المدارية والسابر المقترحة أولوية قصوى في مسح 2023-2032م.

محور دوران أورانوس موازٍ تقريبًا لمستوى المجموعة الشمسية، مع ميل محوري قدره 97.77 درجة (كما هو محدد بالدوران التقدمي). وهذا ما يمنحه تغيرات موسمية تختلف تماماً عن تلك التي تحدث في الكواكب الأخرى. (لدى بلوتو والكويكب الأولي 2 بالاس أيضًا ميل محوري شديد). بالقرب من الانقلاب، يواجه أحد القطبين الشمس بشكل مستمر والآخر يتجه بعيدًا، مع وجود شريط ضيق فقط حول خط الاستواء يشهد دورة ليل-نهار سريعة، مع الشمس منخفضة في الأفق.



محاكاة لأورانوس وحلقاته، يُرى من الأرض من عام 1985م إلى عام 2030م، معكوس القطب المرئي.

وعلى الجانب الآخر من مدار أورانوس، ينعكس اتجاه القطبين نحو الشمس. ويحصل كل قطب على نحو 42 عامًا من ضوء الشمس المستمر، يليها 42 عامًا من الظلام. بالقرب من وقت الاعتدالين، تواجه الشمس خط استواء أورانوس، مما يعطي فترة من دورات النهار والليل مماثلة لتلك التي شوهدت في معظم الكواكب الأخرى.

إحدى نتائج اتجاه المحور هذا هي أنه، بمتوسط سنة أورانوس، تتلقى المناطق القريبة من القطبية من أورانوس مدخلات طاقة أكبر من الشمس مقارنة بالمناطق الاستوائية. ومع ذلك، فإن أورانوس أكثر سخونة عند خط الاستواء منه عند قطبيه. الآلية الأساسية التي تسبب هذا غير معروفة.

سبب الميل المحوري غير المعتاد لأورانوس غير معروف أيضًا على وجه اليقين، ولكن التكهنات المعتادة هي أنه أثناء تكوين المجموعة الشمسية، اصطدم كوكب أولي بحجم الأرض بأورانوس، مما تسبب في انحراف الاتجاه.

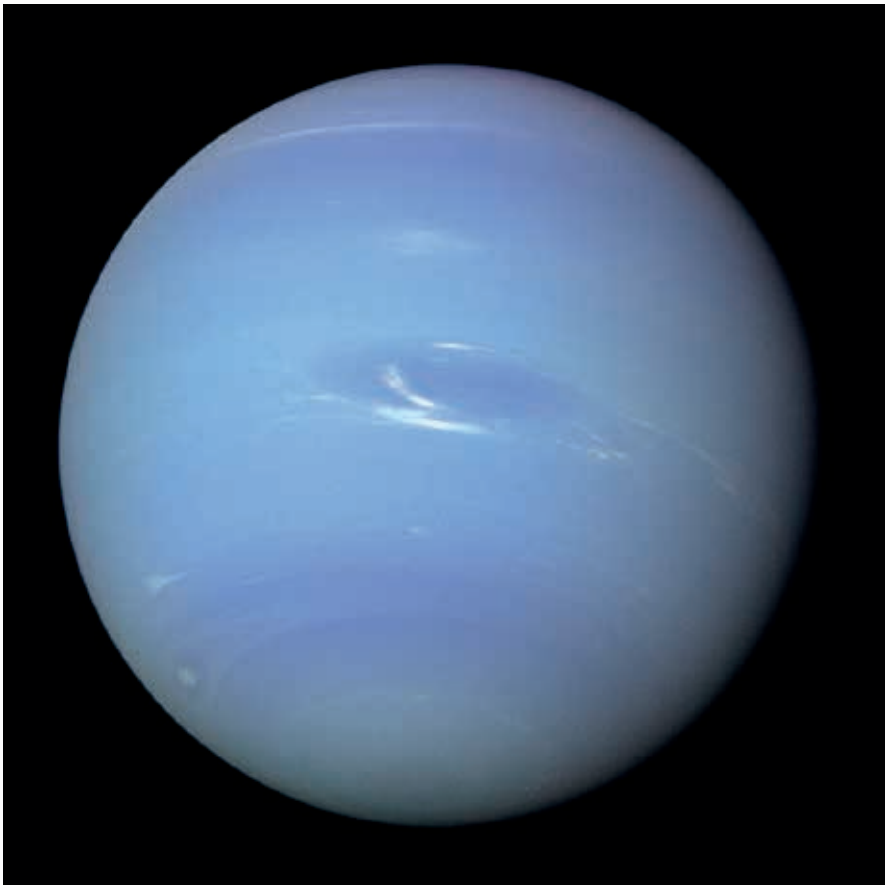
تشير الأبحاث التي أجراها جاكوب كيجيريس من جامعة دورهام إلى أن الميل نتج عن اصطدام صخرة أكبر من الأرض بالكوكب منذ 3 إلى 4 بلايين سنة.

كان القطب الجنوبي لأورانوس موجهًا بشكل مباشر تقريبًا نحو الشمس في وقت تحليق فوياجر 2 في عام 1986م. وتسمية هذا القطب بـ «الجنوبي» تستخدم التعريف المعتمد حاليًا من قبل الاتحاد الفلكي الدولي، أي القطب الشمالي لكوكب أو قمر طبيعي. هو القطب الذي يشير فوق المستوى الثابت للنظام الشمسي، بغض النظر عن اتجاه دوران الكوكب. يتم استخدام اتفاقية مختلفة في بعض الأحيان، حيث يتم تحديد القطبين الشمالي والجنوبي للجسم وفقًا لقاعدة اليد اليمنى فيما يتعلق باتجاه الدوران.

4. كوكب نبتون

يبعد كوكب نبتون 30.47–29.89 وحدة فلكية (4.558–4.471 بليون كيلومتر) من الشمس، مع أنه أصغر قليلًا من أورانوس، إلا أنه أكبر كتلة (17 مرة ضعف كتلة الأرض) وبالتالي أكثر كثافة. فهو يشع حرارة داخلية أكثر من أورانوس، ولكن ليس بقدر كوكب المشتري أو زحل. لدى نبتون 14 قمرًا طبيعيًا معروفًا. أكبرها، تريتون، نشط جيولوجيًا، مع وجود ينابيع من النيتروجين السائل.

تريتون هو القمر الطبيعي الكبير الوحيد ذو مدار رجعي، مما يشير إلى أنه لم يتشكل مع نبتون، ولكن من المحتمل أنه تم التقاطه من حزام كويبر. يرافق نبتون في مداره عدة كواكب صغيرة، تسمى طروادة نبتون، والتي إما أن تقود الكوكب أو تتبعه بنحو سدس الطريق حول الشمس، وهي مواقع تعرف باسم نقاط لاغرانج.



التقطت الصورة لكوكب نبتون بواسطة مركبة ناسا فوياجر2- في عام 1989م.

نبتون هو الكوكب الثامن من الشمس وأبعد كوكب معترف به من قبل الاتحاد الفلكي الدولي في المجموعة الشمسية. وهو رابع أكبر كوكب في المجموعة الشمسية من حيث القطر، وثالث أكبر كوكب من حيث الكتلة، وأكثر الكواكب العملاقة كثافة.

تبلغ كتلته 17 مرة كتلة الأرض، وأضخم بقليل من توأمه أورانوس. نبتون أكثر كثافة وأصغر حجمًا من أورانوس لأن كتلته الأكبر تسبب المزيد من ضغط الجاذبية على غلافه الجوي. ولأنه يتكون أساسًا من غازات وسوائل، فليس له سطح صلب محدد جيدًا.

يدور الكوكب حول الشمس مرة كل 164.8 سنة على مسافة مدارية تبلغ 30.1 وحدة فلكية (4.5 بليون كيلومتر). سمي على اسم إله البحر الروماني وله الرمز الفلكي ♆ الذي يمثل رمح نبتون.

نبتون غير مرئي بالعين المجردة، وهو الكوكب الوحيد في المجموعة الشمسية الذي اكتشف من خلال التنبؤات الرياضياتية وليس من خلال الرصد التجريبي. أدت التغيرات غير المتوقعة في مدار أورانوس إلى أن يفترض ألكسيس بوفارد أن مداره كان عرضة لاضطراب الجاذبية بسبب كوكب غير معروف.

بعد وفاة بوفارد، أمكن التنبؤ بموقع نبتون من أرصاده، بشكل مستقل، من قبل جون كوتش آدامز وأوربان لو فيرييه. جرى رصد نبتون لاحقًا باستخدام التلسكوب في 23 سبتمبر 1846م بواسطة يوهان غالي ضمن درجة من الموقع الذي تنبأ به لو فيرييه.

اكتشف أكبر أقماره، تريتون، بعد ذلك بوقت قصير، مع أنه لم يتحدد موقع أي من أقمار الكوكب الأربعة عشر المتبقية عن طريق التلسكوب حتى القرن العشرين. بعد الكوكب عن الأرض يمنحه حجمًا ظاهريًا صغيرًا جدًا، مما يجعل من الصعب دراسته باستخدام التلسكوبات الأرضية.

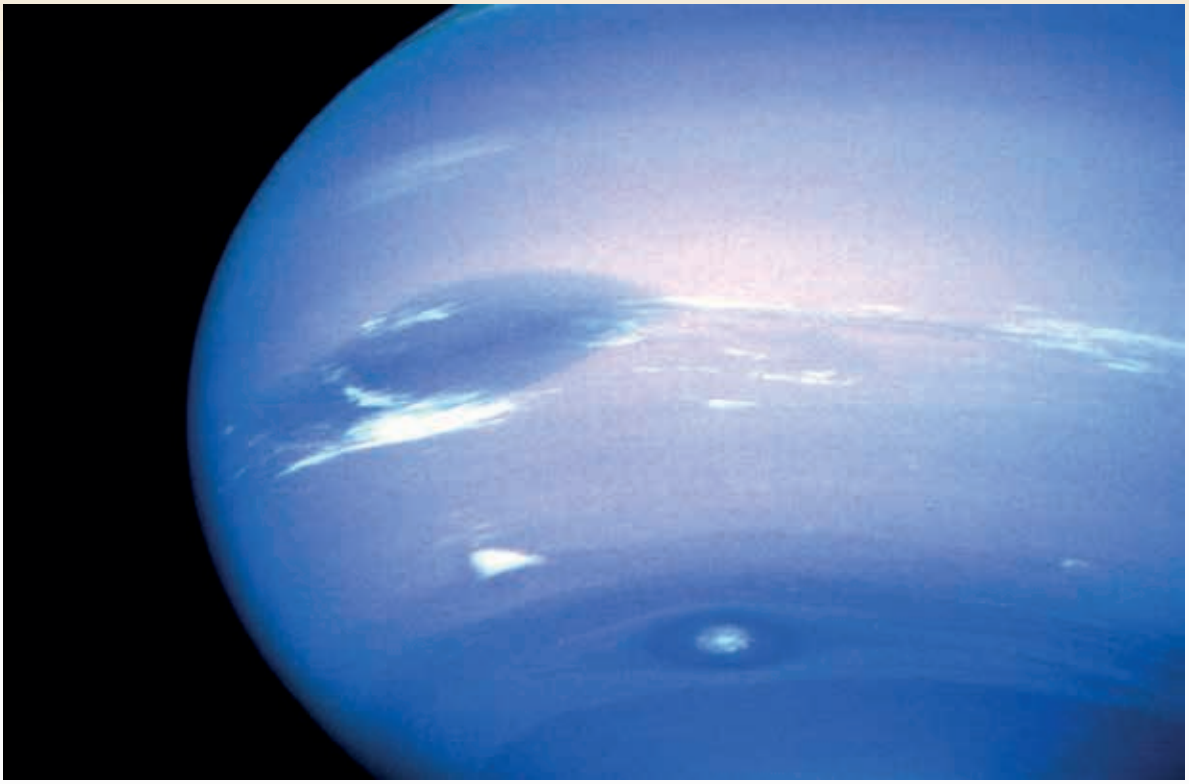
أمكن زيارة نبتون بواسطة فوياجر- 2، عندما حلقت بالقرب من الكوكب في 25 أغسطس 1989م؛ تبقى فوياجر- 2 المركبة الفضائية الوحيدة التي زارت نبتون. وقد أتاح ظهور تلسكوب هابل الفضائي والتلسكوبات الأرضية الكبيرة ذات البصريات التكيفية إجراء عمليات رصد تفصيلية إضافية من بعيد.

مثل الكواكب الغازية العملاقة (المشتري وزحل)، يتكون الغلاف الجوي لنبتون أساسا من الهيدروجين والهيليوم، بالإضافة إلى آثار من الهيدروكربونات وربما النيتروجين، ولكنه يحوي على نسبة أعلى من الجليد مثل الماء والأمونيا والميثان.

على غرار أورانوس، يتكون الجزء الداخلي منه أساسا من الجليد والصخور؛ يُعتبر كلا الكوكبين عادةً «عمالقة جليدية» لتمييزهما. بالإضافة إلى تشتت رايلي، فإن آثار الميثان في المناطق الخارجية مسؤولة جزئيًا عن المظهر الأزرق للكوكب.

اللون الأزرق على نبتون أكثر تشبعًا من اللون الموجود على أورانوس بسبب الضباب الخفيف في الغلاف الجوي الأكثر نشاطًا لنبتون.

على النقيض من الغلاف الجوي الضبابي الذي لا يتميز نسبيًا لأورانوس، يتميز الغلاف الجوي لنبتون بأنماط مناخية نشطة ومرئية. على سبيل المثال، في وقت تحليق فوياجر - 2 في عام 1989م، كان نصف الكرة الجنوبي للكوكب يحوي على بقعة مظلمة كبيرة مماثلة للبقعة الحمراء العظيمة على كوكب المشتري. في عام 2018م، جرى تحديد ودراسة بقعة داكنة رئيسة أحدث وبقعة داكنة أصغر حجمًا.



البقعة المظلمة الكبرى (أعلى)، وبقعة سكوتر (سحابة بيضاء متوسطة)،
والبقعة المظلمة الصغيرة (أسفل)، مع تباين مبالغ فيه.

هذه الأنماط الجوية مدفوعة بأقوى رياح مستدامة لأي كوكب في المجموعة الشمسية، مع سرعات رياح مسجلة تصل إلى 2100 كم/ساعة (580 م/ث). نظرًا لبعده الكبير عن الشمس، يعد الغلاف الجوي الخارجي لنبتون واحدًا من أبرد الأماكن في المجموعة الشمسية، حيث تقترب درجات الحرارة عند قمم السحب من 55 كلفن (– 218 درجة مئوية).

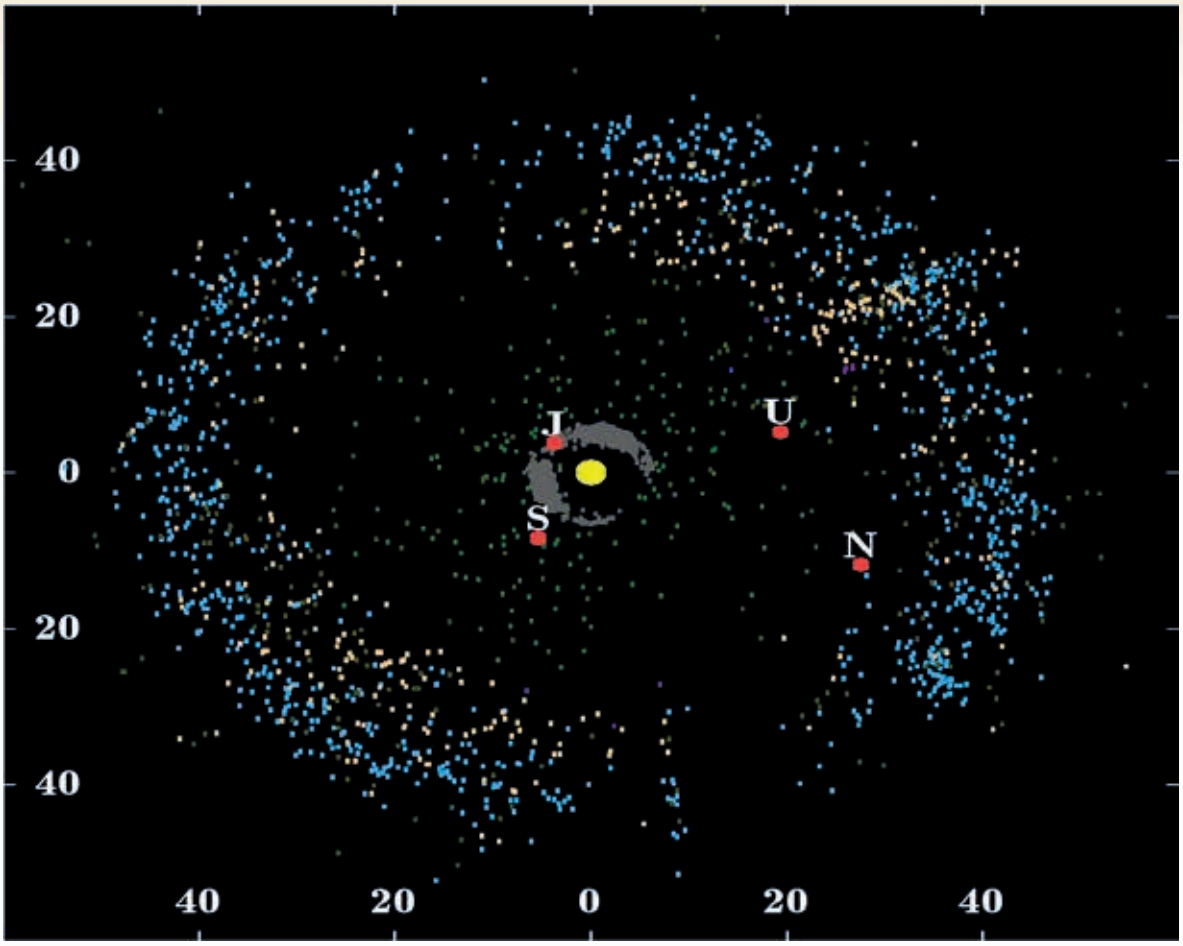
تبلغ درجات الحرارة في مركز الكوكب نحو 5400 كلفن (5100 درجة مئوية). يحوي نبتون على نظام حلقات خافت ومجزأ (يُسمى «الأقواس»)، والذي اكتشف في عام 1984م، ثم جرى تأكيده لاحقًا بواسطة فوياجر – 2.

5. حـــزام كويبـــر

حـزام كويبـر عبـارة عـن حلقـة كبيـرة مـن الحطـام تشـبه حـزام الكويكبـات، ولكنهـا تتكون بشـكل رئيس مـن أجـرام تتكـون أساسًـا مـن الجليـد. وتمتـد بـين 30 و50 وحـدة فلكيـة (4.5 و7.5 بليـون كيلومتـر) مـن الشـمس. وهـي تتألـف مـن أجـرام صغيـرة في المجموعـة الشمسـية، مـع أن أكبـر القليـل منهـا قـد يكـون كبيـرًا بمـا يكفـي ليكـون كواكـب قزمـة.

تشـير التقديـرات إلـى أن هنـاك أكثـر مـن 100000 جـرم في حـزام كويبـر يبلـغ قطرهـا أكثـر مـن 50 كيلومتـرًا، ولكـن يُعتقـد أن الكتلـة الإجماليـة لحـزام كويبـر لا تتجـاوز عُشـر أو حتـى جـزء مـن مائـة مـن كتلـة الأرض. العديـد مـن أجـرام حـزام كويبـر لهـا أقمـار طبيعيـة، ومعظمهـا لهـا مـدارات مائلـة بشـكل كبيـر (~10°) علـى مسـتوى مسـير الشـمس.

حـزام كويبـر هـو قـرص محيـط بالنجـم في المجموعـة الشمسـية الخارجيـة، يمتـد مـن مـدار نبتـون عنـد 30 وحـدة فلكيـة (AU) إلـى نحـو 50 وحـدة فلكيـة مـن الشـمس. إنـه مشـابه لحـزام الكويكبـات، ولكنـه أكبـر بكثيـر – عرضـه 20 مـرة وكتلتـه 20 - 200 مـرة.



أجرام حزام كويبر (باللون الأزرق). يعرض الرسم المواقع المعروفة للأجسام الموجودة في المجموعة الشمسية الخارجية ضمن 60 وحدة فلكية (AU) من الشمس (في الوسط باللون الأصفر). الفترة اعتبارًا من 1 يناير 2015.

يتكون حزام الكويكبات إجمالًا من أجرام صغيرة أو بقايا تكونت مع تشكل المجموعة الشمسية. بينما العديد من الكويكبات تتكون أساسًا من الصخور والمعادن، فإن معظم أجرام حزام كويبر تتكون إلى حد كبير من مواد متطايرة مجمدة (تسمى «الجليد»)، مثل الميثان والأمونيا والماء.

يعد حزام كويبر موطنًا لمعظم الأجرام التي يقبلها علماء الفلك عمومًا على أنها كواكب قزمة: أوركوس، وبلوتو، وهوميا، وكواوار، وماكيماكي. ربما تكون بعض أقمار المجموعة الشمسية، مثل تريتون نبتون وفيبي زحل، قد نشأت في المنطقة نفسها.

سُمِّيَ حزام كويبر على اسم عالم الفلك الهولندي جيرارد كويبر، الذي توقع وجود حزام مماثل في عام 1951م. ومع ذلك، لم ينشر عالم الفلك خوليو أنجيل فرناندیز إلا في عام 1980م ورقة بحثية تشير إلى وجود حزام مذنب خلف نبتون، والذي يمكن أن يكون مصدرًا للمذنبات قصيرة المدى. ومع أن حزام كويبر سمي على اسم جيرارد كويبر، إلا أن فرناندیز كان الباحث الذي تنبأ بوجوده لأول مرة.

في عام 1992م، اكتشف الكوكب الصغير (15760) ألبيون، وهو أول جرم في حزام كويبر (KBO) بعد بلوتو (في عام 1930م) وشارون (في عام 1978م). منذ اكتشافه، ارتفع عدد أجرام حزام كويبر المعروفة إلى الآلاف، ويُعتقد أن هناك أكثر من 100000 جرم في حزام كويبر يزيد قطرها عن 100 كيلومتر.

كان يُعتقد في البداية أن حزام كويبر هو المستودع الرئيسي للمذنبات الدورية، تلك التي تدوم مداراتها أقل من 200 عام. لكن أظهرت الدراسات التي أجريت منذ منتصف التسعينيات أن الحزام مستقر ديناميكيًا وأن المكان الأصلي للمذنبات هو القرص المبعثر، وهي منطقة نشطة ديناميكيًا نشأت عن الحركة الخارجية لنبتون قبل 4.5 بليون سنة؛ تمتلك الأجرام القرصية المتناثرة مثل إيريس مدارات شديدة الانحراف تأخذها إلى مسافة تصل إلى 100 وحدة فلكية من الشمس.

يختلف حزام كويبر عن سحابة أورت المفترضة، والتي يُعتقد أنها أبعد بألف مرة ومعظمها كروية. يُشار إلى الأجرام الموجودة داخل حزام كويبر، بالإضافة إلى أعضاء القرص المتناثر وأي أجرام محتملة في سحابة هيلز أو سحابة أورت، بشكل جماعي باسم الأجرام العابرة لكوكب نبتون (TNOs).

بلوتو هو أكبر وأضخم عضو في حزام كويبر، وأكبر وثاني أكبر كوكب معروف من ناحية الكتلة، ولا يتفوق عليه سوى إيريس في القرص المبعثر. كان بلوتو في الأصل يعد كوكبًا، لكن وضعه كجزء من حزام كويبر أدى إلى إعادة تصنيفه ككوكب قزم في عام 2006. وهو مشابه من الناحية التركيبية للعديد من الأجرام الأخرى في حزام كويبر، وفترته المدارية مميزة لفئة من أجرام حزام كويبر، المعروفة باسم «البلوتونيات»، والتي تشترك في الرنين نفسه 2:3 مع نبتون.

يمكن التعامل مع حزام كويبر ونبتون على أنها علامة على مدى اتساع المجموعة الشمسية، والبدائل هي الغلاف الشمسي والمسافة التي يتطابق فيها تأثير جاذبية الشمس مع تأثير جاذبية النجوم الأخرى (تقدر بما بين 50000 و125000 وحدة فلكية).

6. المذنبـــات

المذنب هو جُرم جليدي صغير في المجموعة الشمسية يسخن ويبدأ في إطلاق الغازات عند مروره بالقرب من الشمس، بما يسمى إطلاق الغازات. ينتج عن ذلك غلاف جوي أو ذؤابة ممتدة وغير مرتبطة بالجاذبية تحيط بالنواة، وفي بعض الأحيان ينفجر ذيل من الغاز والغبار الغازي من الذؤابة.

ترجع هذه الظواهر إلى تأثيرات الإشعاع الشمسي وبلازما الرياح الشمسية المتدفقة التي تؤثر على نواة المذنب. تتراوح نوى المذنبات من بضع مئات من الأمتار إلى عشرات الكيلومترات وتتكون من مجموعات فضفاضة من الجليد والغبار والجسيمات الصخرية الصغيرة.

المذنب C/2006 P1 (McNaught) مأخوذ من فيكتوريا، أستراليا عام 2007.

وقد يصل حجم الذؤابة إلى 15 مرة قطر الأرض، في حين قد يمتد الذيل إلى ما هو أبعد من وحدة فلكية واحدة. إذا كان المذنب قريبًا ومشرقًا بما فيه الكفاية، فيمكن رؤيته من الأرض دون مساعدة التلسكوب ويمكن أن يرسم قوسًا يصل إلى 30 درجة عبر السماء. أمكن رصد المذنبات وتسجيلها منذ العصور القديمة من قبل العديد من الثقافات والأديان.

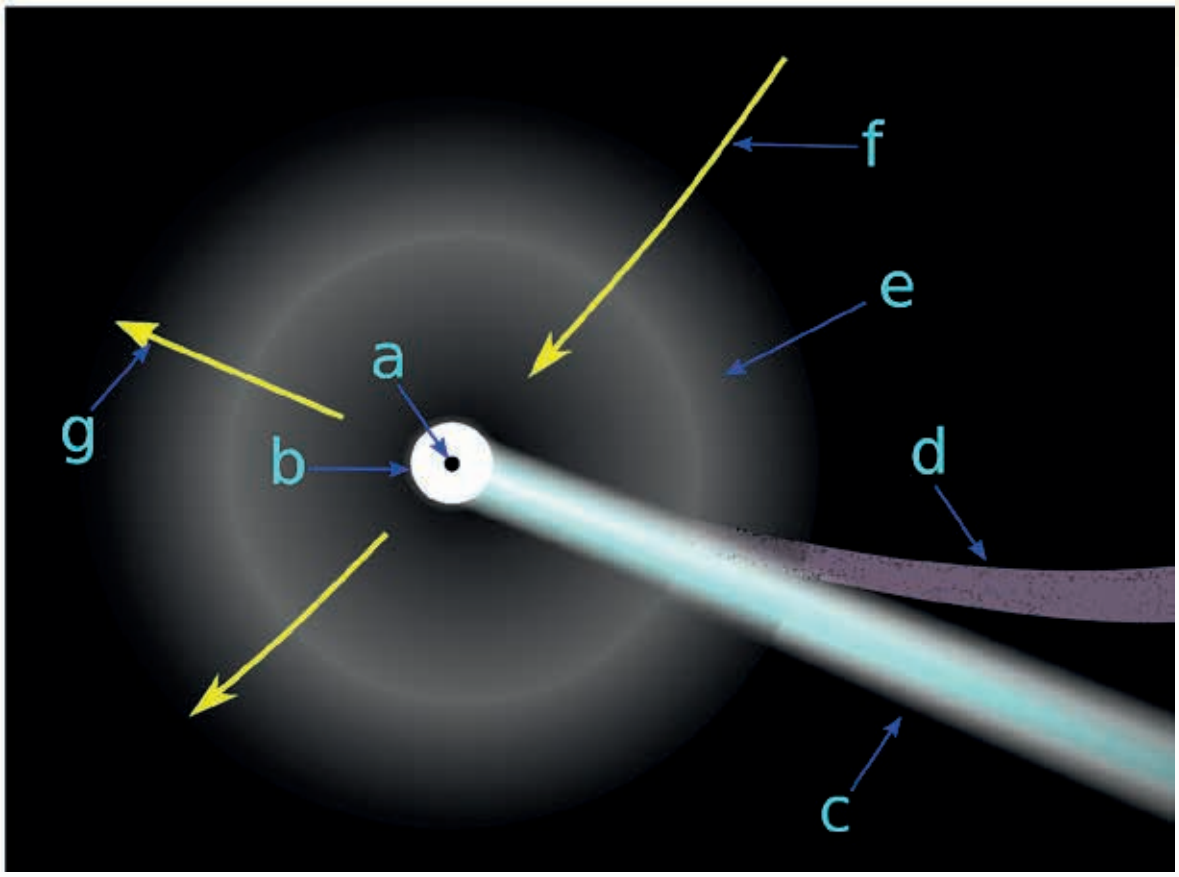
عادة ما يكون للمذنبات مدارات إهليلجية شديدة الانحراف، ولديها نطاق واسع من الفترات المدارية، تتراوح من عدة سنوات إلى عدة ملايين من السنين. تنشأ المذنبات قصيرة الدورة في حزام كويبر أو القرص المتناثر المرتبط به، والذي يقع خارج مدار نبتون.

ويعتقد أن المذنبات طويلة الأمد تنشأ في سحابة أورت، وهي سحابة كروية من الأجرام الجليدية تمتد من خارج حزام كويبر إلى منتصف الطريق إلى أقرب نجم.

تتحرك المذنبات طويلة الأمد نحو الشمس بسبب اضطرابات الجاذبية الناتجة عن مرور النجوم والمد المجري. قد تمر المذنبات الزائدية مرة واحدة عبر المجموعة الشمسية الداخلية قبل أن تنطلق إلى الفضاء بين النجوم.

فقدت المذنبات المنقرضة التي مرت بالقرب من الشمس عدة مرات تقريبًا كل ثلوجها وغبارها المتطاير، وقد تشبه الكويكبات الصغيرة. ويعتقد أن الكويكبات لها أصل مختلف عن المذنبات، حيث إنها تشكلت داخل مدار كوكب المشتري وليس في المجموعة الشمسية الخارجية.

ومع ذلك، فإن اكتشاف مذنبات الحزام الرئيس قد أدى إلى عدم وضوح التمييز بين الكويكبات والمذنبات. في أوائل القرن الحادي والعشرين، اكتشفت بعض الأجرام الصغيرة لها مدارات المذنبات طويلة الأمد، ولكن خصائص كويكبات المجموعة الشمسية الداخلية، كانت تسمى مذنبات مانكس. ولا تزال تُصنف على أنها مذنبات، مثل C/2014 S3 (PANSTARRS). أمكن العثور على سبعة وعشرين مذنبًا في جزيرة مانكس في الفترة من 2013 إلى 2017.



رسم تخطيطي يوضح الخصائص الطبيعية للمذنب: a) النواة، b) الذؤابة، c) ذيل الغاز/الأيون d) ذيل الغبار، e) غلاف الهيدروجين، f) اتجاه السرعة المدارية، g) الاتجاه نحو الشمس.

ذكرنا أن منشأ المذنبات هو سحابة أورت (تُسمى سحابة أورت أحيانًا بسحابة أوبيك-أورت) ويُعتقد أنها سحابة واسعة من الكواكب المصغرة الجليدية المحيطة بالشمس على مسافات تتراوح من 2000 إلى 200000 وحدة فلكية (0.03 إلى 3.2 سنة ضوئية).

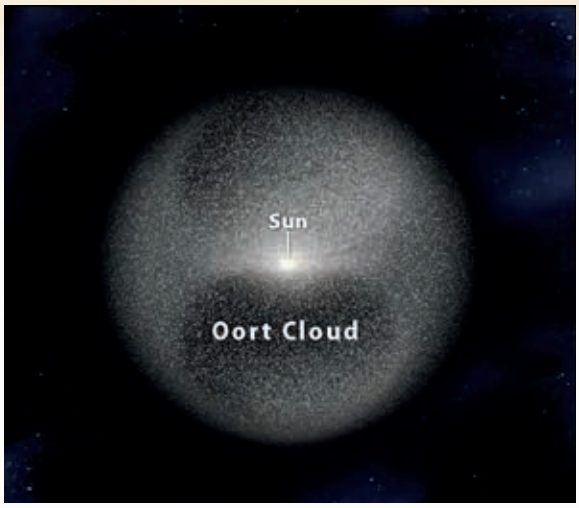
اقترح مفهوم مثل هذه السحابة في عام 1950م من قبل عالم الفلك الهولندي جان أورت، الذي سُميت المنطقة على اسمه. اقترح أورت أن الأجرام الموجودة في

هذه السحابة تجدد وتحافظ على ثبات عدد المذنبات طويلة الأمد التي تدخل المجموعة الشمسية الداخلية، حيث يجري استهلاكها وتدميرها في النهاية أثناء الاقتراب من الشمس.

يُعتقد أن السحابة تتكون من منطقتين: سحابة أورت الداخلية على شكل قرص يتوافق مع مسير الشمس (وتسمى أيضًا سحابة هيلز) وسحابة أورت الخارجية، وهي كروية تحيط بالمجموعة الشمسية بكامله. وتقع كلتا المنطقتين خارج الغلاف الشمسي يتوافق في الفضاء بين النجوم.

حزام كويبر، القرص المتناثر والأجرام المنفصلة - ثلاثة خزانات أخرى من الأجرام العابرة للنبتون - أقرب إلى الشمس بأكثر من ألف مرة من الجزء الأعمق من سحابة أورت.

يحدد الحد الخارجي لسحابة أورت الحدود الكونية للنظام الشمسي. حيث تحدد هذه المنطقة من خلال مجال تل الشمس، ومن ثم تقع عند السطح البيني بين سيطرة الجاذبية الشمسية والمجرية.



يعتقد العلماء أن بنية سحابة أورت موجودة في الأطراف الخارجية للمجموعة الشمسية. من المحتمل أن تقع مثل هذه المناطق حول نجوم أخرى، لكن الباحثين لم يكتشفوا أيًا منها بشكل مباشر حتى الوقت الحالي.

لا ترتبط سحابة أورت الخارجية بالمجموعة الشمسية إلا بشكل فضفاض، وتتأثر مكوناتها بسهولة بقوى الجاذبية لكل من النجوم المارّة ودرب التبانة نفسها. عملت هذه القوى على تهدئة المدارات شديدة الانحراف للمواد المقذوفة من المجموعة الشمسية الداخلية خلال المراحل الأولى من تطورها وجعلها أكثر دائرية.

تعود المدارات الدائرية للمواد الموجودة في قرص أورت إلى حد كبير إلى عزم الجاذبية المجري. وعلى المنوال نفسه، فإن التداخل المجري في حركة أجرام أورت يؤدي أحيانًا إلى إزاحة المذنبات من مداراتها داخل السحابة، مما يرسلها إلى المجموعة الشمسية الداخلية.

واستنادًا إلى مداراتها، يبدو أن معظم المذنبات قصيرة الدورة، وليس كلها، جاءت من سحابة أورت. وربما نشأت مذنبات أخرى قصيرة الأمد من السحابة الكروية الأكبر بكثير.

يفترض علماء الفلك أن المادة الموجودة حاليًا في سحابة أورت تشكلت بالقرب من الشمس، في القرص الكوكبي الأولي، ثم انتشرت بعيدًا في الفضاء من خلال تأثير جاذبية الكواكب العملاقة.

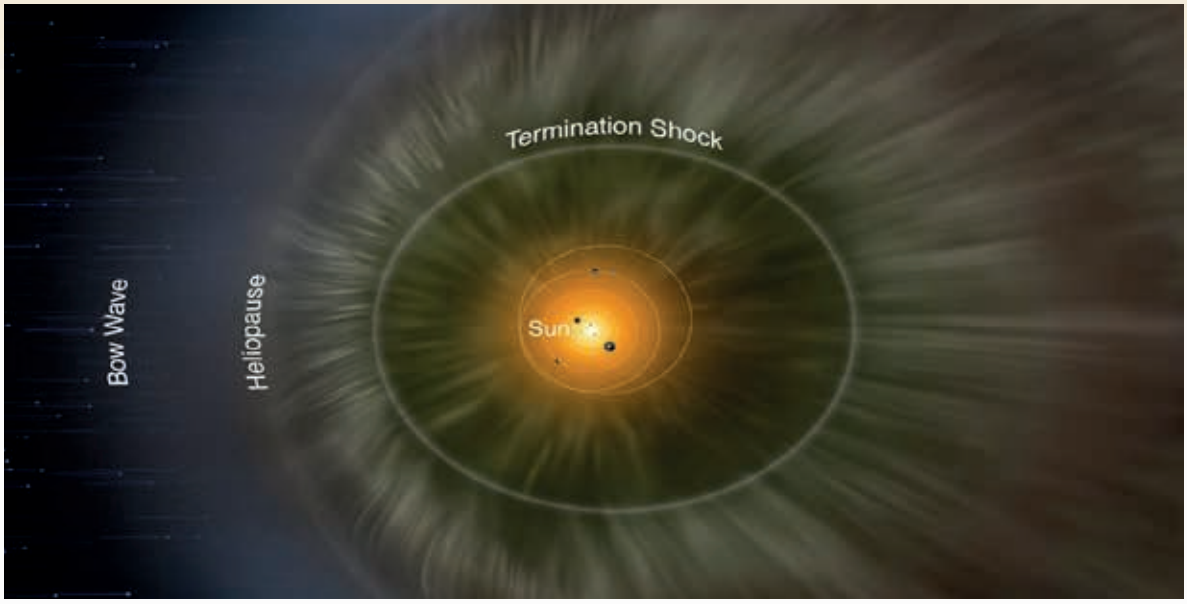
لا يمكن إجراء مراقبة مباشرة لسحابة أورت باستخدام تكنولوجيا التصوير الحالية. ومع ذلك، يُعتقد أن السحابة هي المصدر الذي يغذي معظم المذنبات طويلة الأمد ومن نوع هالي، والتي يجري استهلاكها في النهاية عند اقترابها من الشمس بعد دخولها المجموعة الشمسية الداخلية. قد تؤدي السحابة أيضًا الوظيفة نفسها للعديد من مذنبات عائلة المشتري.

7. حافـــة الغـــــلاف الشمســـي

فقاعة الرياح النجمية للشمس، أو الغلاف الشمسي، وهي منطقة من الفضاء تهيمن عليها الشمس، لها حدودها عند صدمة النهاية، والتي تقع على بعد 80–100 وحدة فلكية تقريبًا من الشمس عكس اتجاه الريح للوسط بين النجوم ونحو 200 وحدة فلكية من الشمس باتجاه الريح. وهنا تصطدم الرياح الشمسية بالوسط البينجمي فتتباطأ بشكل كبير وتتكاثف وتصبح أكثر اضطرابًا لتشكل هيكلًا بيضاويًا عظيمًا يعرف بالغلاف الشمسي.

وقد جرى النظر إلى هذا الهيكل ليبدو وكأنه يتصرف مثل ذيل المذنب، ويمتد إلى الخارج لمسافة 40 وحدة فلكية أخرى على الجانب المعاكس للريح ولكنه يتخلف عدة مرات في اتجاه الريح.

تشير الأدلة المستقاة من المركبة الفضائية كاسيني ومستكشف الحدود بين النجوم إلى أنها اضطرت إلى شكل فقاعة بسبب العمل المقيد للمجال المغناطيسي بين النجوم، لكن شكلها الفعلي لا يزال مجهولًا.



(تصوّر فني) بعيدًا عن مدار نبتون، تتفاعل الرياح الشمسية والوسط النجمي لتكوين منطقة تُعرف باسم الغلاف الشمسي الداخلي، ويحدها من الداخل صدمة النهاية، ومن الخارج حافة الشمس.

الحد الخارجي للغلاف الشمسي، أو الغلاف الشمسي، هو النقطة الأخيرة التي تنتهي عندها الرياح الشمسية أخيرًا وهي بداية الفضاء بين النجوم. اجتازت فوياجر – 1 وفوياجر – 2 صدمة النهاية ودخلتا الغلاف الشمسي عند 84 و 94 وحدة فلكية من الشمس، على التوالي. جرى الإبلاغ عن عبور فوياجر – 1 لحافة الشمس في أغسطس 2012م، وفوياجر– 2 في ديسمبر 2018م.

من المحتمل أن يتأثر شكل الحافة الخارجية للغلاف الشمسي بديناميكيات الموائع الناتجة عن التفاعلات مع الوسط النجمي وكذلك المجالات المغناطيسية الشمسية السائدة في الجنوب، على سبيل المثال. يتشكل بشكل صريح حيث يمتد نصف الكرة الشمالي بمقدار 9 وحدات فلكية أبعد من نصف الكرة الجنوبي. خلف الغلاف الشمسي، عند نحو 230 وحدة فلكية، تقع صدمة القوس، وهي «استيقاظ» بلازما خلفتها الشمس أثناء انتقالها عبر درب التبانة.

الفصل الثالث

ماهيـة القمـــر

مُقَدِّمَة

بالتعريف؛ القمر هو جرمٌ يدور **حول كوكب** أو أي **جرم** آخر ليس **نجماً**. وقد **حبا المولى ﷻ كوكب الأرض** بقمرٍ **منيرٍ** وحيدٍ **ومفيدٍ لحياة الناس** وكافة **المخلوقات** الأخرى في كل **أطواره وأشكاله**.

فالإيقاعات اليومية والشهرية للقمر الطبيعي للأرض، هي التي ترشد حُرَّاس الزمن منذ آلاف السنين. كما رُصد تأثيره في دورات الأرض، ولا سِيَّما المد والجزر في محيطات وبحار الأرض، من قِبل العديد من الثقافات في العديد من العصور.

قمر الأرض هو حجر الزاوية في علم الكواكب؛ إذْ يحتفظ أقرب جيراننا في الفضاء هذا بسجل للتاريخ الجيولوجي الذي شكل نظامنا الشمسي كله، بما في ذلك كوكبنا.

وبالمقارنة مع الأرض، فإن القمر هو عالم نشط بهدوء. تؤدي قُوى المد والجزر وصدمات النيازك والتغيرات الحرارية في الصخور بالقُرْب من السطح إلى اضطرابات زلزالية.

سُـجلت أبـرد درجـات الحـرارة في النظـام الشمسـي عنـد قطبـي القمـر. كمـا اكتشـف أن بعـض الحفـر القطبيـة، المظلمـة بظـلال دائمـةٍ، تـؤوي جليـداً مائيّـاً مخفيـاً.

وإذا تسـاءل البعـض: مـاذا سـيحدث لـو لـم يكـن هنـاك قمـر لـلأرض؟ فـإن الأرض سـتكون مختلفـة تمامـاً إذا لـم يكـن لهـا قمـر. إذْ تمنـع جاذبيـة القمـر كوكبنـا مـن التذبـذب حـول محـوره كثيـراً، ممـا يسـاعد علـى اسـتقرار مناخنـا.

إذا اعتبرنا أن الأرض بحجم كرة القدم، فإن القمر سيكون بحكم كرة التنس. تُظهر هذه الصورة الحقيقية الجانب البعيد من القمر، الذي تضيئه الشمس، أثناء عبوره بين الكاميرا والتلسكوب الخاص بكاميرا التصوير متعدد الألوان (EPIC) للمركبة الفضائية ديسكوفر DISCOVR، والأرض، على بُـعْد مليون ميل. وقد التقطت في 5 أغسطس 2015.

لقد مشى اثنا عشر شخصاً على سطح القمر (جميعهم رُوَّاد الفضاء في برنامج أبولو التابع لوكالة ناسا في الستينات والسبعينات من القرن الماضي). والخطط جارية حالياً لعودة البشر إلى القمر من خلال برنامج أرتميس Artemis التابع لوكالة الفضاء ناسا.

ليس كوكب الأرض هو من يملك قمراً فقط، وإنما لبعض الكواكب الأخرى أقمار أيضاً. ففي عام 2010م، اكتشف علماء الفلك 166 قمراً تدور حول الكواكب في نظامنا الشمسي. حيث يحظى المشتري بحصة الأسد من الأقمار، فهو يملك 63 قمراً، ويمتلك كوكب زحل 60 قمراً، وأورانوس لديه 27 قمراً، ونبتون لديه 13 قمراً، وكوكب المريخ لديه اثنان فقط، والأرض لها واحد فقط، وكوكبا الزهرة وعطارد ليس لديهما أي قمر.

الكواكب القزمة هي أجرام تشبه الكواكب ولا تتناسب مع التعريف الكامل للكوكب ومع ذلك لدى بعضها أقمار أيضاً. بلوتو هو أشهر كوكب قزم، ولدى بلوتو ثلاثة أقمار. العديد من الأقمار الأخرى في نظامنا الشمسي تدور حول أجرام أصغر. ونظراً لأن الأقمار صغيرة نسبيّاً، لذلك لم يكتشف -حتى كتابة هذا العمل- أيٌّ منها خارج المجموعة الشمسية، ولكن من المحتمل وجود تريليونات من الأقمار في جميع أنحاء الكون.

نشـــأة القمـــر

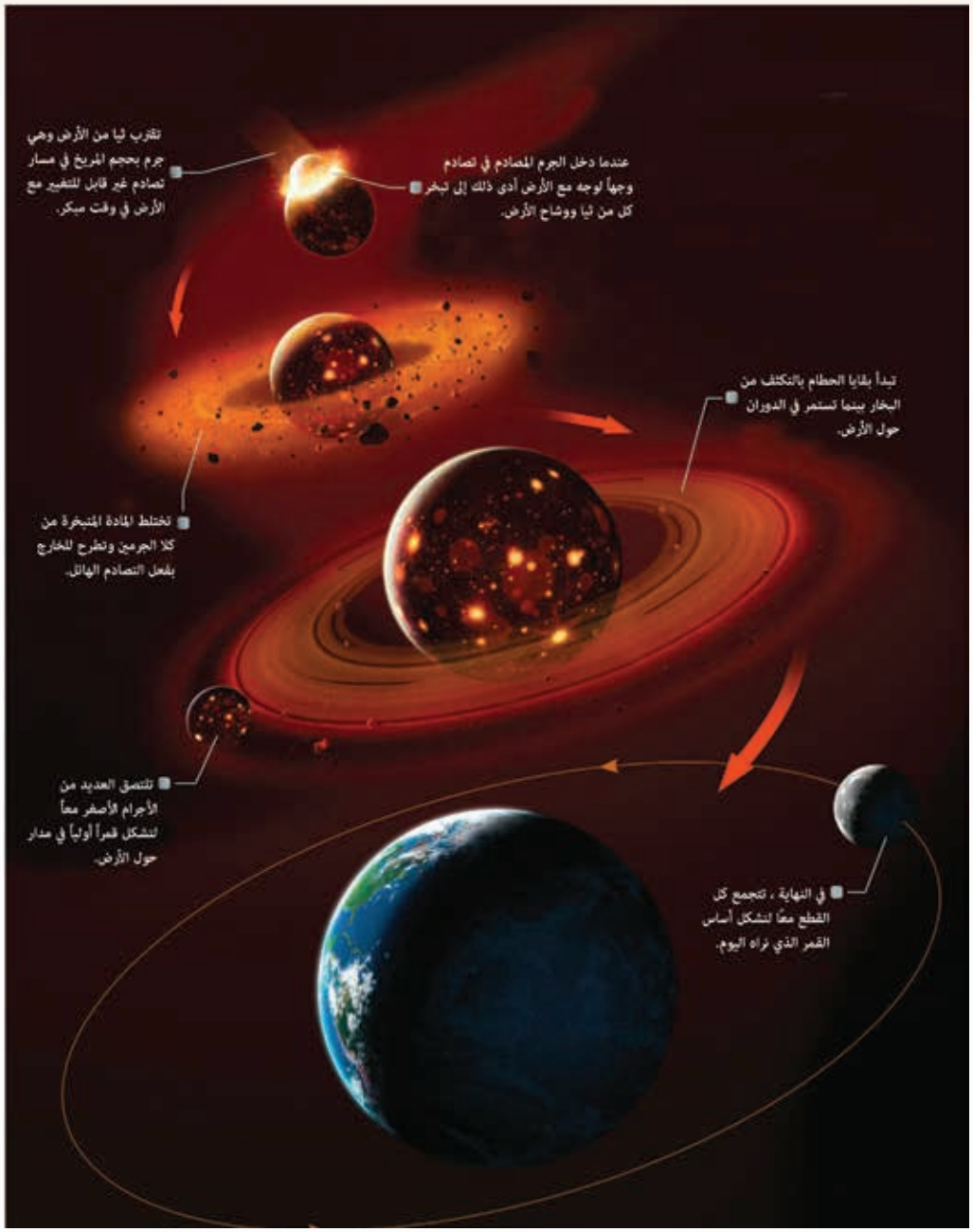
ظهـر في أحـد أفـلام الخيـال العلمـي نظريـة تقـول إنّ القمـر نشـأ عـن بيضـة طائـر فضائـي! وهـذه فرضيـة غريبـة جـدّاً! لا أظـن أنـك توافـق عليهـا.

حسناً لنرَ ماذا يقول العلماء حول نشأة القمر.

كانـت الأرض قبـل 4.425 بليـون سـنة صخـوراً وحممـاً ملتهبـة. تلملـم شـعثها، وتجمّـع مادتهـا، وإذْ بجـرم طائـش لا ينظـر أمامـه بحجـم المريـخ، يُدعـى ثيـا Theia، يصـدم كوكـب الأرض. أدى هـذا الصـدم العمـلاق Giant-Impact إلـى تناثـر كميـةٍ هائلـةٍ مـن الشـظايا في مـدار حـول الأرض بشـكل حلقـة كبيـرة. هـرب جـزء مـن هـذه الشـظايا إلـى الفضـاء، لكـن البـاقـي تماسـك بهيئـة جـرم كـروي واحـد في غُضـون نحـو 100 مليـون سـنة في مـدار حـول الأرض، وهكـذا ولـد قمرنـا العزيـز.

في الواقـع لـم يسـبب هـذا الصـدم العمـلاق إلـى تشـكيل القمـر وحسـب، وإنمـا جعـل الأرض «تـدوخ» ويميـل محورهـا بمقـدار 23.5 درجـة، ممـا تسـبب في حـدوث فصـول السـنة.

الغريب في الأمر أن علماء الفلك اختاروا اسم (ثيا) لذلك الكوكب الأهوج الذي صدم الأرض، وهو اسم «مؤنث» وليس مذكّر، وصاحبته – كما ورد في الأسطورة اليونانية- مسؤولة عن «البصر!» ومنح الذهب والفضة والأحجار الكريمة بريقها ولمعانها! كما أن ثيا هي أم سيلين، إلهة القمر في الأساطير اليونانية.



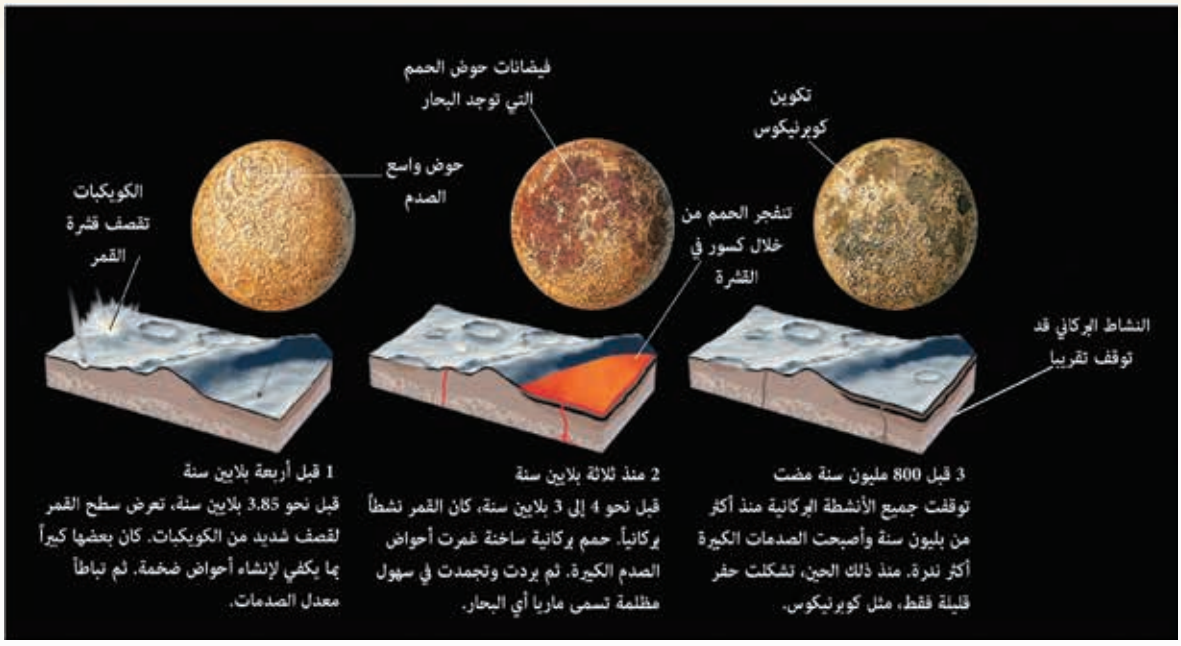
نشأ القمر عن طريق التصادم بين الارض في بداية نشأتها مع كوكب بدائي بحجم كوكب المريخ

• الدليـــل على نظريـــة الصـــدم العمـــلاق

فرضية الصدم العملاق هذه مقبولة حالياً على نطاق واسع من قِبل المجتمع العلمي. وذلك لأن نسب نظائر الأكسجين للقمر متطابقة جدًا مع نظائر الأرض. إذْ أن نسب نظائر الأكسجين، التي يمكن قياسها بدقة شديدة، تقدم توقيعاً فريداً ومميزاً لكل جرم في النظام الشمسي. فلو كان ثيا كوكباً أوليّاً منفصلاً، فمن المحتمل أن يكون له توقيع نظير أكسجين مختلف عن كوكب الأرض البدائي، كما هو الحال بالنسبة للمادة المختلطة المقذوفة. كما أن نسبة نظير التيتانيوم للقمر (50Ti / 47Ti) تبدو قريبة جدّاً من نظير التيتانيوم للأرض (في حدود 4 أجزاء في المليون) لدرجة أن القليل من كتلة الجرم المتصادم من المحتمل أن تكون جزءاً من القمر.

دعمت دراسة أجريت عام 2012م حول استنفاد نظائر الزنك على القمر أصل الصدم العملاق للأرض والقمر. وفي عام 2013م، صدرت دراسة أشارت إلى أن الماء في الصهارة القمرية لا يمكن تمييزه عن الماء الموجود في الكوندريت الكربوني وتقريباً الماء نفسه الموجود في الأرض في التركيب النظيري.

لكن حدث تحدٍّ لفرضية الصدم العملاق مرة أخرى في سبتمبر 2013م، مع شعور متزايد من العلماء بأن أصول القمر أكثر تعقيداً.



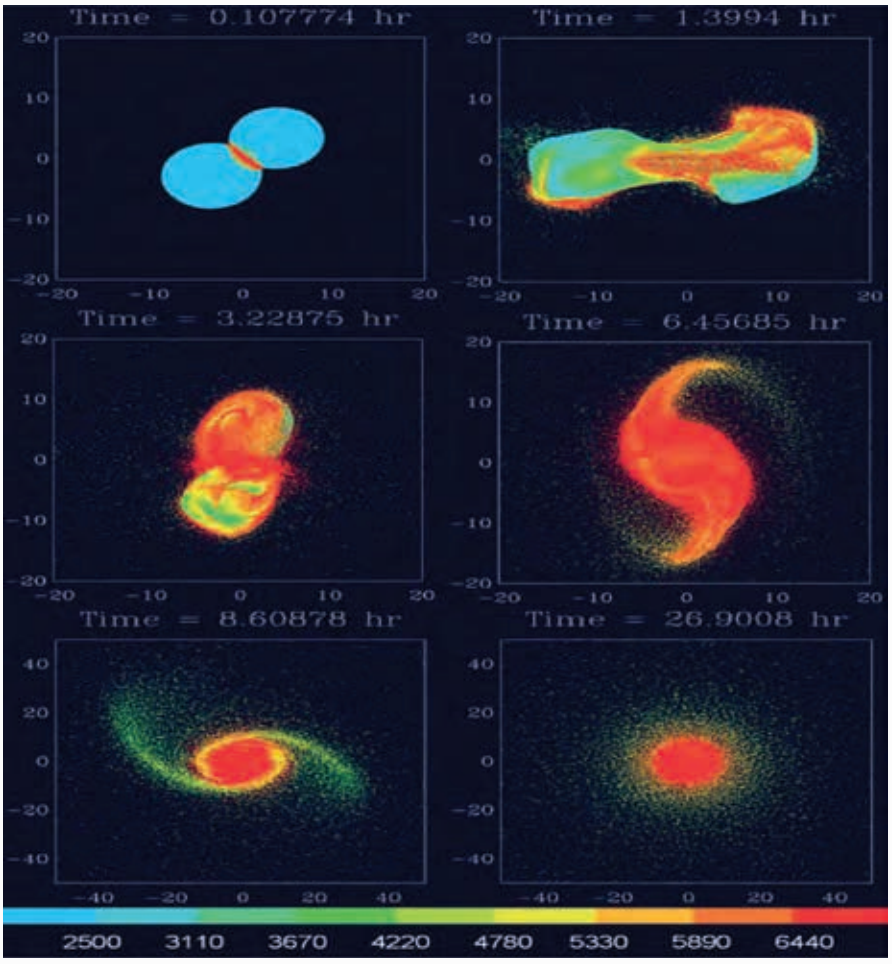
عندما تشكل القمر أول مرة كان مغطىً بمحيط عميق من الصهارة الساخنة. قبل نحو 4.4 بليون سنة، بدأت بلّورات الصخور في التصلب وغرقت البلّورات الأكثر كثافة. في حين طفت بلورات صخرية أخف وبدأت في تكوين القشرة.

• كيف عرف العلماء أن حجم القمر كان بحجم المريخ؟

تتطلب فرضية الصدم العملاق حدوث تصادم بين الأرض البدائية (التي حجمها يعادل نحو 90 % من حجم الأرض الحالية)، مع جرم آخر يعادل حجمه حجم المريخ (أي نصف حجم الأرض وعُشر كتلته). نسبة الحَجم هذه ضرورية حتى يتشكل النظام الناتج عن زخمٍ زاويٍ كافٍ لمطابقة التكوين المداري الحالي.

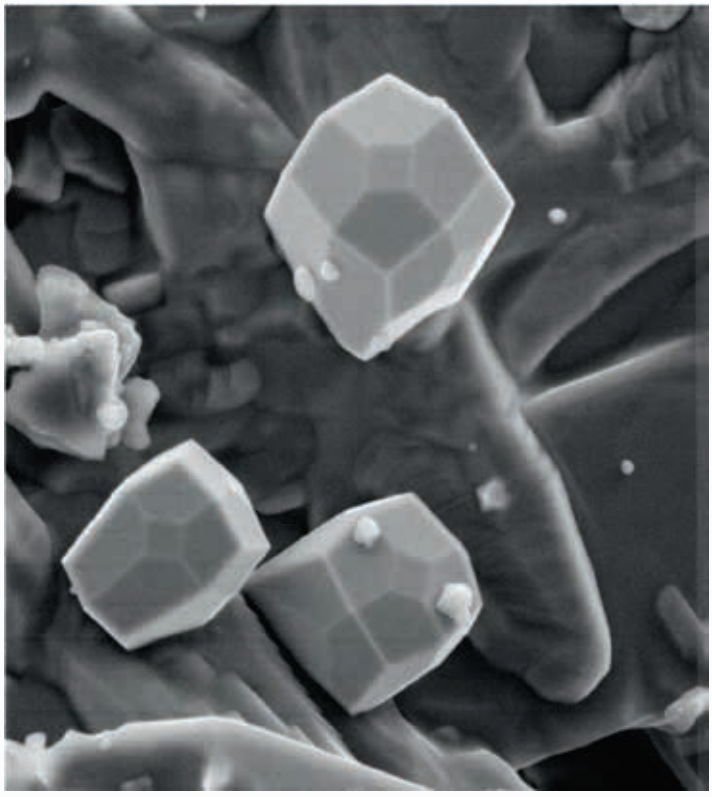
كما تظهر عمليات المحاكاة الحاسوبية الحاجة إلى ضربة خاطفة تجعل جزءاً من الصدم يشكل ذراعاً طويلة من المادة التي تنفصل بعد ذلك. يؤدي الشكل غير المتماثل للأرض بعد الاصطدام إلى استقرار هذه المادة في مدارٍ

حول الكتلة الرئيسة. الطاقة المتضمنة في هذا الاصطدام مثيرة للإعجاب، لأن تريليونات الأطنان من المواد قد تكون تبخرت وانصهرت.



محاكاة حاسوبية لتصادم منخفض السرعة بعيداً عن المركز بين اثنين من الكواكب الصخرية الأولية التي تحوي على 45 % و 55 % من كتلة الأرض. يشير مقياس اللون إلى أنّ درجة حرارة الجسيمات ترتفع من نحو 2000 كلفن إلى أكثر من 6500 كلفن بعد الصدم الأولي، يتصادم الكوكبان الأوليان مرة أخرى، ويندمجان ويشكلان كوكباً أرضيّاً سريع الدوران محاطاً بقرص من الحطام فقير بالحديد. يمثل هذا القرص، الذي يحوي على نحو ثلاثة أضعاف الكتلة الحالية للقمر، خزان المواد التي يعتقد أن القمر تشكل منها. التركيب النهائي للقرص والكوكب متطابقان تقريباً.

تُفسّر النواة الحديدية الصغيرة نسبيّاً للقمر (مقارنة بالكواكب والأقمار الصخرية الأخرى في النظام الشمسي) من خلال اندماج نواة كوكب ثيا في الغالب مع نواة الأرض. كما يُفسّر نقص المواد المتطايرة في العينات القمرية جزئيّاً من خلال طاقة الاصطدام. كانت الطاقة المحررة أثناء إعادة تكوين المواد في مدار حول الأرض كافية لصهر جزء كبير من القمر، مما أدّى إلى تكوين محيط من الصهارة.



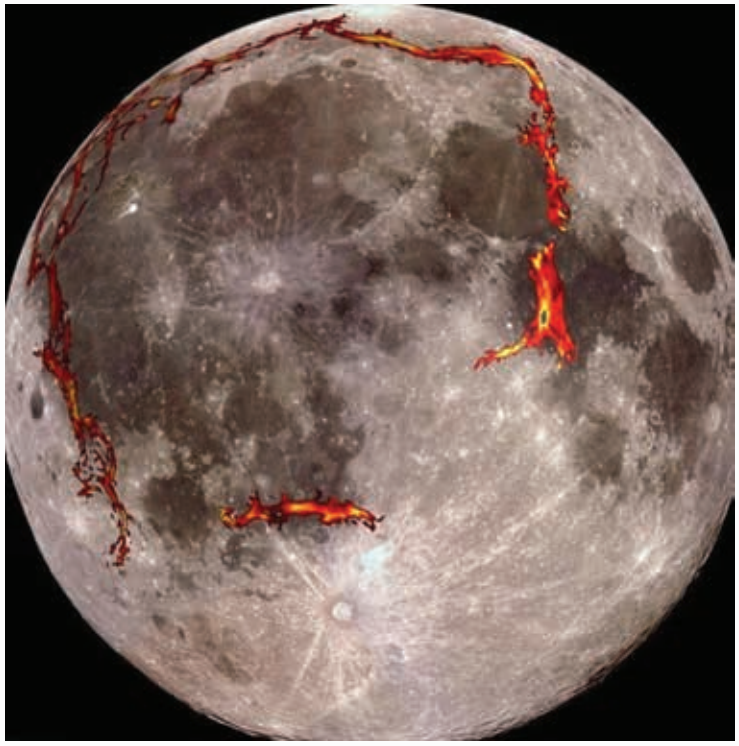
صورة بالمجهر الإلكتروني لمسح بلّورات الحديد التي تنمو في فجوة صغيرة أو تجويف في بريشيا معاد بلورتها (صخرة مجزأة) من موقع هبوط أبولو- 15 هادلي أبينين على سطح القمر. أكبر بلورة يبلغ قطرها ثلاثة ميكرون. تشير البلّورات المطورة تماماً مثل هذه إلى تكوين بطيء من بخار ساخن أثناء تبريد الصخور. ترتكز البلّورات على شبكة متشابكة من البيروكسين (وهو سيليكات الكالسيوم والمغنيسيوم والحديد).

كان القمر المشكل حديثاً يدور حول الأرض على مسافةٍ تعادل عُشر المسافة التي يدور حولها اليوم، ويتباعد نحو الخارج بسبب احتكاك المد والجزر الذي ينقل الزخم الزاوي من دوران كلا الجرمين إلى الحركة المدارية للقمر.

وهكذا صار دوران القمر مقيداً بشكل مدّي بالأرض، بحيث يواجه جانب واحد من القمر وجه الأرض باستمرار. أيضاً، كان القمر قد اصطدم ودمج أقماراً صغيرة موجودة مسبقاً للأرض، التي كانت ستشارك في تكوين الأرض، بما في ذلك الوفرة النظيرية. وبالتالي صارت جيولوجية القمر منذ ذلك الوقت أكثر استقلالية عن الأرض.

عُمـر القمــر

يعد تحديد عمر القمر أمراً بالغ الأهمية لفهم تطور النظام الشمسي وتكوين الكواكب الصخرية، بما في ذلك الأرض. ومع ذلك، على الرغم من أهميته، لم يتم تحديد عمر القمر بدقة. تشكل القمر من حطام تصادم بين الأرض وكوكب أصغر يسمى ثيا Theia، مما أدى إلى إطلاق الصخور المنصهرة التي تجمدت في النهاية إلى جسم كامل بدأ يدور حول الأرض. هذا يعني أن الصخور التي يتكون منها القمر جاءت من الأرض، ويمكن استخدامها حتى الآن.



تتعرض القشرة الخارجية للقمر للكسور بصورة مستمرة بسبب التفاعلات التكتونية في طبقات سطح القمر؛ مما يؤكد أن طبقات القمر ليست ساكنة و يوجد ما يحركها من الأسفل و هي حمم بركانية تؤدي إلى شق الصخور و الخروج منها.

تشـكل النظـام الشمسـي بأكملـه تقريبًـا منـذ 4.6 مليـار سـنة، عندمـا انهـار السـديم الشمسـي. لكـن علمـاء الفلـك يعتقـدون أن القمـر تشـكل بعـد ذلـك، عندمـا اصطـدم كوكـب أولـي بحجـم المريـخ بـالأرض. تناثـر الحطـام النـاتج عـن الاصطـدام في مـدار حـول الأرض ثـم تحـول إلـى القمـر، الـذي لا يـزال يـدور حولنـا حتـى اليـوم.

يعتقـد علمـاء الفلـك أن هـذا الاصطـدام حـدث منـذ حوالـي 4.53 مليـار سـنة، أي بعـد حوالـي 30-50 مليـون سـنة مـن تشـكل باقـي النظـام الشمسـي. كان هـذا بعـد وقـت قصيـر نسـبياً مـن تكويـن النظـام الشمسـي، وقبـل زمـن طويـل مـن تشـكل الحيـاة علـى الأرض.

تم العثـور علـى دليـل علـى هـذا الاصطـدام مـن قِبـل رُوَّاد الفضـاء في مهمـات هبـوط أبولـو علـى سـطح القمـر. لقـد اكتشـفوا صخـور القمـر التـي تحتـوي علـى تركيبـات نظائـر الأكسـجين التـي تشـبه الأرض تقريبـاً. هـذا يعنـي أن أجـزاء مـن القمـر كانـت ذات يـوم جـزءًا مـن الأرض. أعلـن العلمـاء النتائـج التـي توصلـوا إليهـا في عـام 1969 في مجلـة Science، قائلـين إن عمـر القمـر لا يقـل عـن 4 مليـارات سـنة. قامـت الأبحـاث الحديثـة بقيـاس محتـوى التنغسـتن في الصخـور العائـدة مـن القمـر. Tungsten-182 هـو مـا تحصـل عليـه عندمـا يتحلـل الهافنيـوم 182. لذلـك قـام العلمـاء بقيـاس نسـب التنجسـتن إلـى الهافنيـوم لتحديـد وقـت تشـكل القمـر بالضبـط. هـذا هـو الزمـان الـذي يبلـغ فيـه الرقـم 4.527 مليـار سـنة (تزيـد أو تقـل عـن 10 ملايـين سـنة).

القمر عند العرب

احتفل العرب بالقمر كثيراً، فاهتموا بشروقه وغروبه، فكان رفيق دروبهم في ليالي السفر، وأدخلوه أشعارهم وأمثالهم. من هذه الأمثال قولهم (وهل يخفى القمر؟) الذي يضرب للأمر المشهور.

ومن المؤكد أن قمر العرب لا يخفي شهرتهم وإنجازاتهم التي حققوها علمياً في هذا الموضوع. فقد توصل أبو الوفاء البوزجاني (قبل تيخو براهي) إلى أن هناك شيئاً من الخلل في حركة القمر يعود إلى الجاذبية وخواص الجذب، وقد كانت هذه الدراسات، على بساطتها، ممهدة لمن أتى بعده ليكتشف قانون الجاذبية ويضع أبحاثها في إطار أكثر علمية.

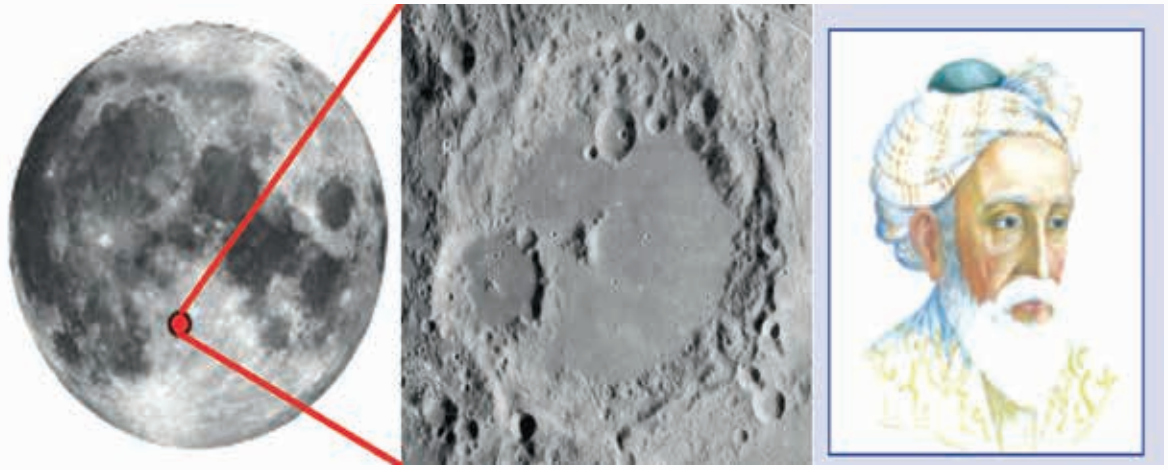
وشرح ابن سينا والحسن بن الهيثم الهالة التي تحيط بالقمر، وعزا ابن الهيثم وجودها للانكسار، حينما يكون الجو مشبعاً بالبلّورات الصغيرة من الثلج أو الجليد، فإن الضوء الذي يمر خلالها ينكسر وينحرف بزاوية معلومة، ومن ثم يصل الضوء إلى العين كأن مبعثه فقط حول الشمس أو القمر.

وتحدث أبو جعفر الفلكي المسعودي والبيروني عن ظاهرة المد والجزر في البحار والأنهار وعزوها إلى التغير الدوري لوجه القمر. وقرر البيروني أن القمر جرمٌ معتمٌ لا يضيء بذاته وإنما يُضيء بانعكاس أشعة الشمس عليه. وكان البيروني يشرح كل ذلك بوضوح تامٍّ، ودقة متناهية في تعبيرات سهلةٍ لا تعقيد فيها ولا التواء.

ودرس كل من البتاني (بطليموس العرب) وابن باجة والقزويني الخسوف والكسوف، وقد اعتمد الأوروبيون على نتائج البتاني في ذلك لدراسة حركة

القمـر. وقـد أثبـت ابـن يونـس الصّفـدي المصـري مـن خـلال دراسـته الخسـوفات والكسـوفات أن حركـة القمـر تتزايـد.

وفي مرصد أبناء موسى بن شاكر في بغداد الذي أقاموه على طرف الجسر المتصل بباب الطاق، تمكّنوا من استخراج حساب العرض الأكبر من عروض القمر.



تكريماً لجهود علماء الفلك العرب والمسلمين فقد أطلقت أسماؤهم على العديد من الفوهات القمرية. في الصورة فوهة البتاني وموقعها على القمر.

• منـــــازل القمـــــر

للشهور الهجرية نظام ثابت محكم مرتبط بسير القمر في منازله بتقدير من الله سبحانه وتعالى ﴿ وَٱلْقَمَرَ قَدَّرْنَٰهُ مَنَازِلَ حَتَّىٰ عَادَ كَٱلْعُرْجُونِ ٱلْقَدِيمِ ﴿٣٩﴾ ﴾ (يس: 39).

منازل القمر هي صور نجوم (بما فيها صور البروج)، وكل **برج يحوي منزلتين وثلثًا**. ينتقل **القمر** بين هذه **النجوم بدقة بمقدار 12,8 درجة** على وجه **التقريب**؛

أي أنه ينزل كل ليلة في **منزلة من هذه المنازل**، ويعود إلى موقعه **الأصلي** بعد 28 **منزلة**، ثم **يستتر ليلة** 28 إذا كان **الشهر** 29 **يوماً**، أو **ليلة** 29 إذا كان **الشهر** 30 **يومًا**. ولعلَّ قوله تعالى ﴿هُوَ ٱلَّذِى جَعَلَ ٱلشَّمۡسَ ضِيَآءً وَٱلۡقَمَرَ نُورٗا وَقَدَّرَهُۥ مَنَازِلَ لِتَعۡلَمُواْ عَدَدَ ٱلسِّنِينَ وَٱلۡحِسَابَ﴾ (**يونس**: 5). هي التي جعلت **المسلمين يتمسكون** بجعل **القمر** معيارًا **للزمان في تقويمهم**.

وقد أعطى العرب لمنازل القمر أسماء منذ القدم وما تزال تُعرف بهذه الأسماء حتى اليوم مع تعديل طفيف في بعضها وهي: الشرطان، البُطين، الثّريّا، الدَّبران، الهقعة، الهنعة، الذراع، النثرة، الطَّرف، الجبْهة، الزَّبرة، الصّرفة، العوّا، السِّماك، الغَفْر، الزبانا، الإكليل، القلب، الشولة، النّعائم، البَلَدة، سعد الذابح، سعد بُلَع، سعد السُّعود، سعد الأخبية، الفرْعَ المُقدَّم، الفرْع المؤَخَّر، الرِّشاء.

ورد لفظ (القمر) في القرآن الكريم خمس مرات، تناولت حجمه ونوره وانشقاقه وخسوفه ومداره، وورد لفظ (الأهلة) مرة واحدة واستخدامها في عملية التوقيت. وقد اعتمدت فريضتان من أصل خمس على حركة القمر الشهرية هما الحج والصيام، في حين اعتمدت فريضة الصلاة على حركة الشمس اليومية. لذلك فقد دفع هذا الترابط بين العبادة وحركة الأجرام بالعلماء العرب والمسلمين ليركزوا على دراسته بكل الوسائل والتقانات المتاحة بين أيديهم.

يعتمد التقويم الإسلامي على الأشهر القمرية. نظراً لأن 12 شهراً قمريّاً تستغرق نحو 354 يوماً فقط، وتقع الأعياد الإسلامية المقدسة قبل 10 أو 11 يوماً من كل عام حسب التقويم المشترك. وغالباً ما يرتبط رمز الهلال بالإسلام. وقد بدأ هذا الارتباط عندما فتح العثمانيون المسلمين مدينة القسطنطينية (إسطنبول الحالية) عام 1453 واعتمدوا الهلال كشعارٍ لهم.

ومع تدرج القمر في هذه المنازل فقد أعطيت له أسماء عديدة نذكر منها: **الهلال، والطالع، والرمد، والقمر، الباهر، البدر، الطوس، الجَلَم، الغاسق، الوبّاص، ونمير، والزّبرقان، والمُنشَق، الواضح، الباحور، الأبرص، الزمهرير، السنمار، الساهور، والسهرة، وطويس، وأويس، وزريق، وذخير، والعقيب، وسمير.**

يرسم لنا المؤلف عثمان ناكاش (القرن 16م) في كتابه (مطالع السعادة وينابيع السيادة) كيفية حدوث أطوار القمر خلال الشهر العربي.

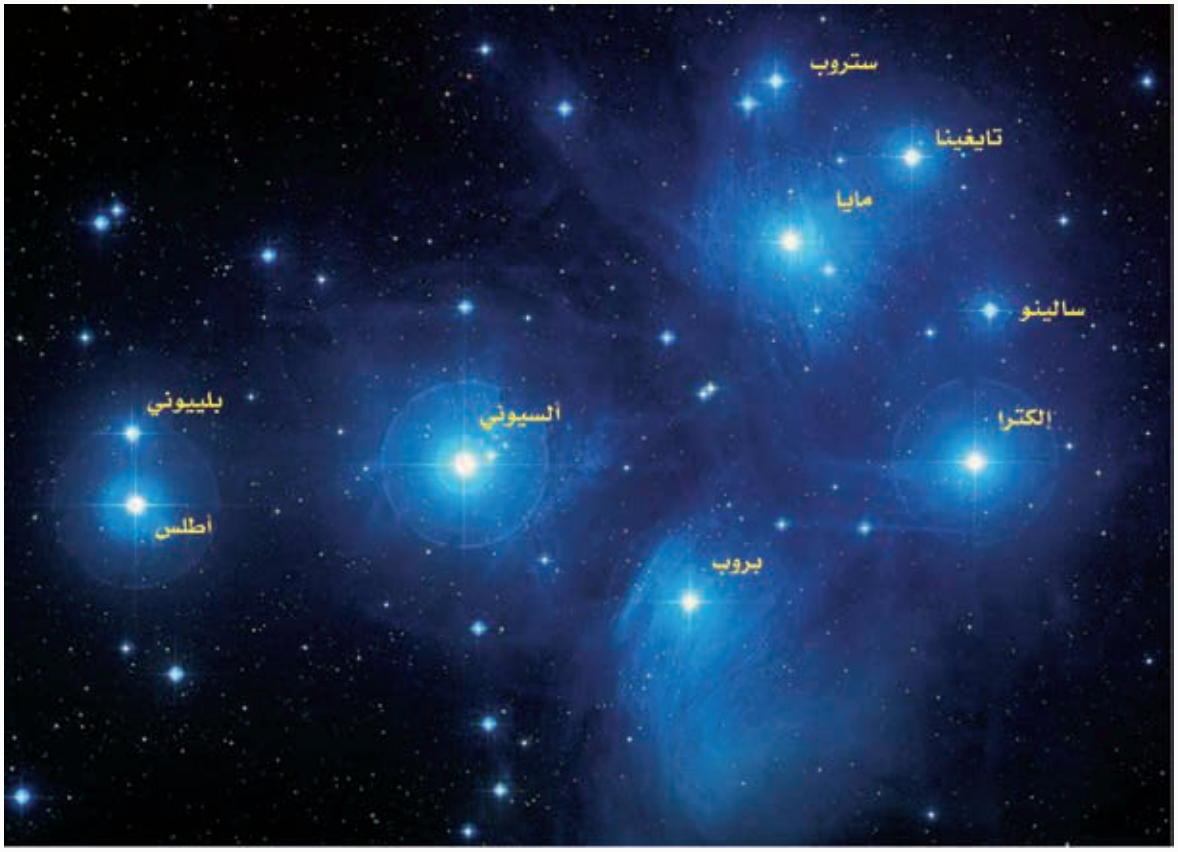
تنقســـــم منـــــازل القمـــــر إلى قســـمين:

1. **منازل شامية:** وعددها 14 نجماً، وتبدأ من نجم الشرطين في فصل الربيع حتى نجم السمّاك في فصل الخريف.

2. **منازل يمانية:** وعددها كذلك 14 نجماً تبدأ من نجم الغفر في فصل الخريف حتى نجم الرشاء في فصل الربيع، ولا يجتمع نجم يماني مع نجم شامي في وقت واحد.

الثريا هو أشهر منازل القمر وتسمى بالنجم فإذا أطلق النجم ولم يضف فالمراد به الثريا. وهي أول طوالع فصل الصيف وهي ستة نجوم صغار متقاربة تشبه عنقود العنب لذلك شُبّهت بالعنقود بالشعر القديم: في وقتها يشتد الحر وتكثر العواصف وتقل الأمطار، وحينما أقول تقل الأمطار لا يعني ذلك أنها هي المسببة لقلة الأمطار، وإنما هي علامة يُهتدى بها فقط، كما يجف العشب وتختفي الحشرات الربيعية ويتكون طلع النخيل في هذا الوقت كما اشتهر أو أنه أيضاً بسرعة برء الجروح، وفي نوء الثريا تكون غزارة الأمطار بإذن الله تعالى.

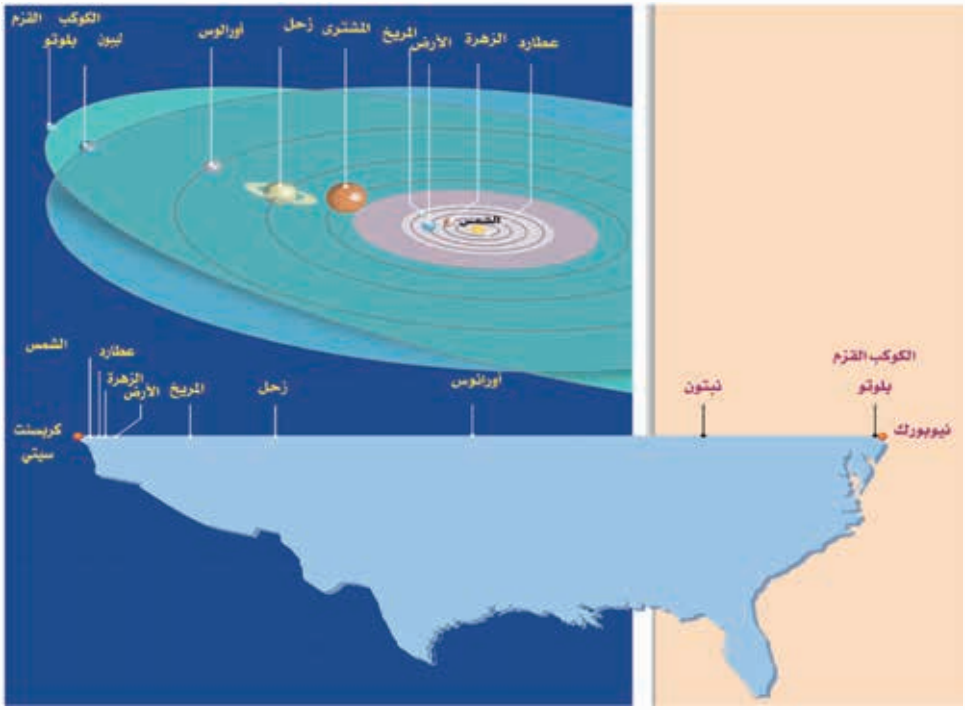
تقول العرب: «إذا طلع النَّجْم - يعني الثريا- فالحرُّ في حَدْم، والعُشْب في حَطْم، والعانات في كَدْم».



في الواقع ، فإن الثريا أو الشقيقات السبع ليست نجماً واحداً، وإنما هي عنقود نجمي مفتوح يقع في كوكبة الثور فوق كتف الجبار اليمنى، وهو أحد ألمع وأشهر العناقيد النجمية المفتوحة. يتكوّن العنقود من نجوم فتيّة زرقاء ساخنة، تكوّنت كلّها في الوقت نفسه تقريباً من سحابة جزيئية قبل نحو 100 مليون سنة. يُمكن رؤية العنقود بالعين المجرّدة.

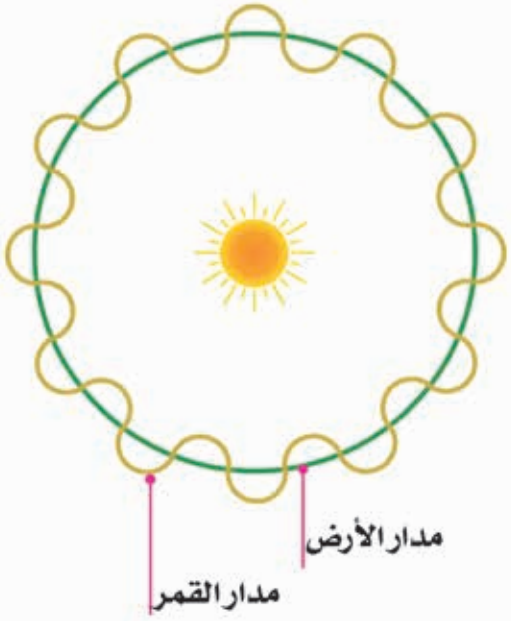
حركـــــة القمـــــر في الفضـــــاء

كان يسـود في أوروبـا في القـرن التاسـع عشـر اعتقـاد أن منتصـف الشـهر القمـري وعندمـا يصيـر القمـر بـدراً فإنـه يثيـر الاضطرابـات العقليـة لـدى المرضـى النفسـيين، لذلـك كان المجانـين يتعرضـون للضـرب في المصحـات قبـل اكتمـال القمـر وأثنـاء ذلـك وبعـده لتهدئتهـم. وقـد نسـبت كلمـة «مجنـون» في اللاتينيـة إلـى «القمـر»، «لونـــــا»، عبـر الكلمـة الفرنسـية القديمـة «Lunatique» التـي ظهـرت لأول مـرة باللغـة الإنجليزيـة في القـرن الثالـث عشـر وتشـير إلـى الاعتقـاد الخاطـئ بـأن القمـر عندمـا يكـون بـدراً يمكـن أن يجعـل النـاس مجانـين.



توضح خريطة الولايات المتحدة الأمريكية هذه المسافات النسبية للكواكب من الشمس، فإذا كانت الشمس موجودة في مدينة كريسنت سيتي في ولاية كاليفورنيا والكوكب القزم بلوتو في مدينة نيويورك. فإنّ موقع الأرض والقمر سيكون تقريباً في ولاية نيفادا.

تخيل أنك في مركبة فضائية، تبتعد عن الأرض. بينما تبحر إلى الأمام، ترى كوكبنا وقمره متماسكين معاً في أحضان الجاذبية اللانهائية والدائرية. يمنحك العرض البعيد منظراً فريداً للقمر يصعب تخيله من الأرض، حيث يبدو القمر وكأنه يكتسح السماء ككرة متغيرة باستمرار.

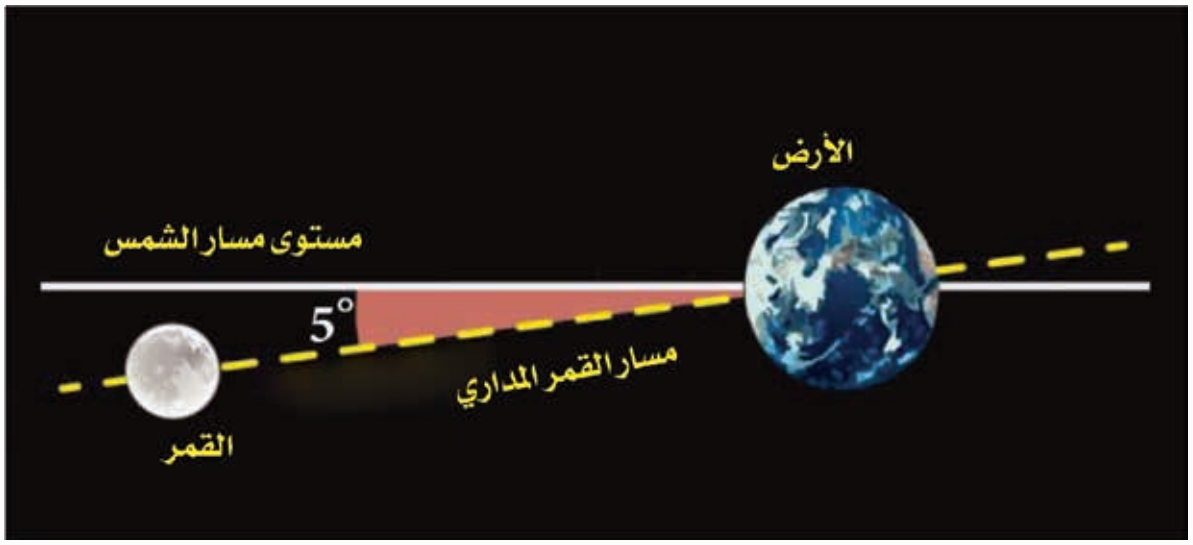


يشبه مسار القمر حول الشمس عجلة مسننة.

من وجهة نظر رائد الفضاء الخاص بك، يمكنك أن ترى أن القمر يبعد وسطيّاً عن الأرض (384399 كيلومتر)، وهو يسافر حول كوكبنا مرة واحدة كل 27.322 يوماً في مدار بيضاوي الشكل، أو دائرة مستطيلة. ينغلق القمر تدريجيّاً مع الأرض، مما يعني أنه يدور حول محوره مرة واحدة بالضبط في كل مرة يدور حول كوكبنا. لهذا السبب، يرى الناس على الأرض جانباً واحداً فقط من القمر. نسمي هذه الحركة بـ (الدوران المتزامن).

يبلغ قطر القمر نحو 3476كم، أو نحو ربع قطر الأرض. فلو وضع القمر. مثلاً. على قارة أستراليا لامتد من مدينة سيدني إلى ما بعد مدينة بيرث. قطر القمر أصغر من قطر الشمس بنحو 400 مرة. وهذا ما يسبب حدوث الكسوف الكلي، أي تطابق قرص الشمس مع قرص القمر.

قد يتسبب الانصهار الجزئي لوشاح القمر وتمركز أحجار البازلت الفيضانية في محيط العواصف في إمالة محورية للقمر منذ 3 بلايين سنة، وخلال هذه الفترة ينتقل قطبا القمر إلى موقعيهما الحديثين بمقدار (201 كيلومتر). يُستدل على هذا التجوال القطبي من رواسب الهيدروجين القطبية التي تكون مضادة للأوجه وتزاح بالتساوي من كل قطب على طول خطي طول متعاكسين.



يميل مدار القمر نحو 5 درجات مقارنة بمستوى مدار الأرض حول الشمس. بسبب هذا الميل، يمر القمر عادةً فوق أو أسفل الشمس عندما يمر بيننا وبين الشمس، كما يُرى من منظور الأرض. يمنعنا ميل مدار القمر من رؤية حدوث خسوف شهري للشمس والقمر.

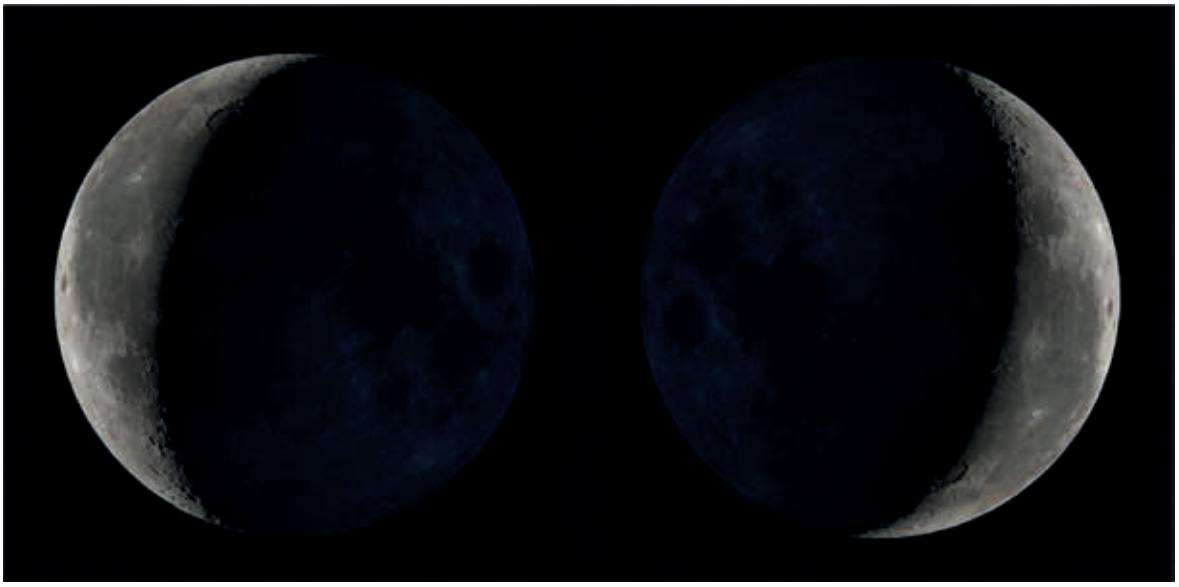
• أطـــوار القمـــر

تعد الشمس الجرم الوحيد الذي يضيء من نفسه في نظامنا الشمسي بكامله. يشع هذا الضوء دائماً على الأرض والقمر من ناحية الشمس، فيضيء نصف كوكبنا في مداره وينعكس عن سطح القمر لإنشاء ضوء القمر.

سُميت الأطوار الثمانية للقمر باسم «الأشكال» التي يتخذها القمر في سماء الليل. بالطبع، لا يتغير شكل القمر أبداً. يبدو الأمر كذلك، اعتماداً على مقدار إضاءة الجانب القريب من القمر بوساطة الشمس في أوقات مختلفة في مدار القمر.

يـرى جميـع النـاس وفي كل مـكان علـى الأرض أطـوار القمـر نفسـها . مـع ذلـك، يـرى النـاس المقيمـون شـمال وجنـوب خـط الاسـتواء الطـور الحالـي للقمـر مـن زوايـا مختلفـة. إذا سـافرت إلـى النصـف الآخـر مـن الكـرة الأرضيـة، فسـيكون القمـر في الطـور نفسـه كمـا هـو الحـال في بلـدك، لكنـه سـيظهر كصـورة مـرآة مقارنـة بمـا اعتـدت عليـه!

علـى سـبيل المثـال، في 8 مـارس 2021م، كان القمـر في طـور الهـلال المتناقـص. فظهـر هـذا الهـلال علـى الجانـب الأيسـر مـن القمـر عنـد رؤيتـه مـن نصـف الكـرة الشـمالي، وظهـر علـى اليمـين مـن نصـف الكـرة الجنوبـي.



هلال القمر المتناقص كما يُرى من نصف الكرة الشمالي (يســـــار) ونصف الكرة الجنوبي (يمـــين) في يوم 8 مارس 2021م.

وكما هو حال الأرض، للقمر جانب نهاري وآخر ليلي يتغيران مع دوران القمر. تضيء الشمس دائماً نصف القمر، في حين يبقى النصف الآخر مظلماً، ولكن إلى أي مدى يمكننا أن نرى ذلك النصف المضيء يتغير مع مرور القمر عبر مداره.

دعونا نلقي نظرة على أطوار القمر كل واحدٍ منها على حِدة، وكيف تظهر حركات القمر والشمس لنا ونحن نشاهد من نصف الكرة الشمالي على الأرض:

1. القمر الجديد New Moon

هو الطور غير المرئي من القمر، حيث يواجه الجانب المضيء من القمر الشمس والجانب الليلي يكون مواجهاً للأرض. في هذا الطور، يكون القمر في الجزء نفسه من السماء الذي توجد فيه الشمس ويشرق ويغرب مع الشمس. لا يقتصر الأمر على الجانب المضيء بعيداً عن الأرض، بل إنه أيضاً مضاء أثناء النهار! تذكر، في هذا الطور، لا يمر القمر عادة مباشرة بين الأرض والشمس، بسبب ميل مدار القمر. إنه يمر بالقُرْب من الشمس فقط من منظورنا على الأرض.

2. الهلال المتزايد Waxing Crescent

يحدث قرن الموز الفضي هذا من القمر عندما يوجد نصف القمر المضيء في الغالب بعيداً عن الأرض، مع وجود جزء صغير فقط مرئي لنا من كوكبنا.

إنه ينمو يومياً نظراً لأن مدار القمر يجعل منظر القمر بعيدًا عن الأنظار. كل يوم، يرتفع القمر بعد قليل.

3. التربيـــــع الأول First Quarter

يمر القمر حالياً بربع الطريق خلال رحلته الشهرية وترى نصف جانبه المضيء. قد يطلق الناس على هذا عرضاً اسم نصف القمر، لكن تذكر أن هذا ليس فعلاً ما تشاهده في السماء. أنت ترى فقط شريحة من القمر بكامل نصف نصفه المضيء. يرتفع قمر التربيع الأول عند الظهيرة ويغيب نحو منتصف الليل. في المساء يرتفع في السماء ويتيح مشاهدة ممتازة.

4. الأحـــــدب المتزايـــــد Waxing Gibbous

لقد ظهرت الآن معظم أيام القمر، والذي يظهر أكثر **إشراقاً في السماء**.

5. البـــــــدر Full Moon

هذا أقرب ما يكون إلى رؤية إضاءة الشمس لكامل الجانب النهاري من القمر (من الناحية الفنية، سيكون هذا هو نصف القمر الحقيقي). القمر هو عكس الشمس، كما يُنظر إليه من الأرض، ويكشف عن جانب أيام القمر. يرتفع القمر المكتمل عند غروب الشمس ويغيب عند شروق الشمس. سيظهر القمر ممتلئاً لبضعة أيام قبل أن ينتقل إلى الطور التالي.

6. الأحدب المتناقص Waning Gibbous

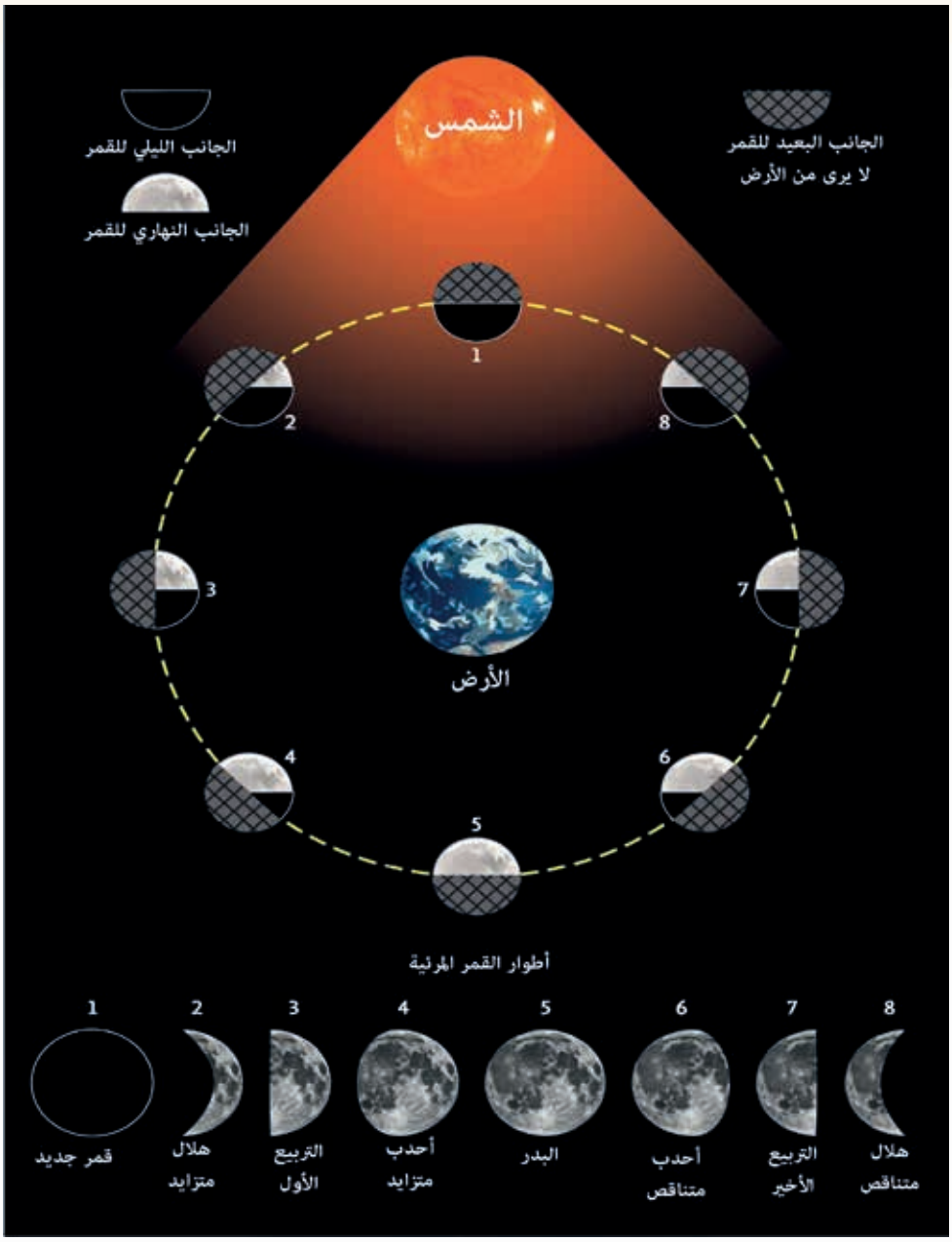
عندما يبدأ القمر رحلته عائداً نحو الشمس، يعكس الجانب الآخر من القمر حالياً ضوء القمر. يبدو أن الجانب المضيء يتقلص، لكن مدار القمر ينفذه ببساطة خارج نطاق الرؤية من منظورنا. القمر يشرق في وقت لاحق وبعد كل ليلة.

7. التربيع الأخير Last Quarter

يبدو القمر وكأنه نصف مضاء من منظور الأرض، لكنك في الحقيقة ترى نصف نصف القمر الذي تضيئه الشمس أو ربعه. يرتفع قمر التربيع الأخير، المعروف أيضاً باسم قمر الربع الثالث، حيث يشرق في منتصف الليل تقريباً ويغرب في الظهيرة.

8. الهلال المتناقص Waning Crescent

لقد عاد القمر تقريباً إلى النقطة في مداره حيث يواجه جانبه اليومي الشمس مباشرة، وكل ما نراه من منظورنا هو منحنًى رفيعا.

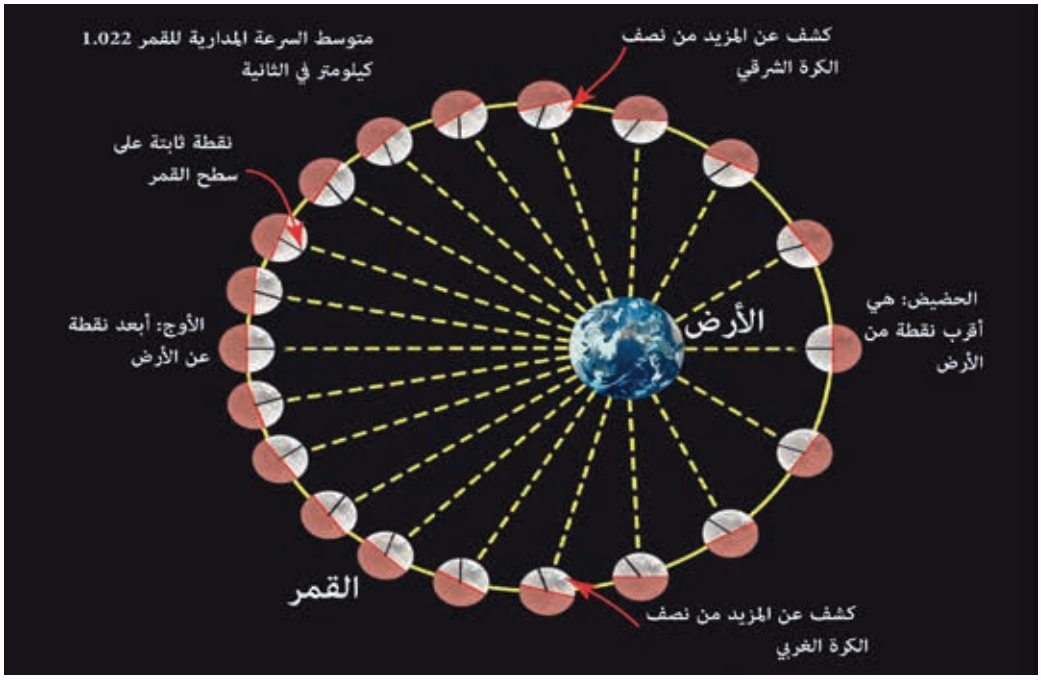


يوضح هذا الرسم موقع القمر والشمس
خلال كل طور من أطوار القمر والقمر كما يظهر من الأرض خلال كل طور.

ميســـــان القمـــــــر

عندما نفكر في الطريقة التي يبدو أن القمر يتغير بها على مدار شهر، فإننا نفكر في الأطوار. لكن المراقبين المتكررين للقمر يعرفون أن القمر يبدو أيضًا وكأنه يلتف ويهتز ويتدحرج قليلاً أثناء رحلته عبر السماء، مما يسمح لنا بإلقاء نظرة خاطفة على طرف القمر والتقاط لمحات من الجانب البعيد. هذه الظاهرة تسمى مَيَسَان القمر Libration.

نظراً لأن مدار القمر ليس دائريّاً تماماً، فإن المسافة بينه وبين الأرض وسرعته في المدار تتغير قليلاً على مدار الشهر. ومع ذلك، فإن معدل دوران القمر حول محوره يبقى ثابتاً دائماً.



رسم تخطيطي لميسان القمر الناتج عن الشكل الإهليلجي لمدار القمر.

عندما يكون القمر في أقرب نقطة له من الأرض (الحضيض) ويتحرك بأقصى سرعة على طول مساره المداري، فإن القمر نفسه لا يدور بسرعة كافية لإبقاء الجانب نفسه بالكامل في مواجهتنا، وسنرى المزيد من الجانب الشرقي من القمر. عندما يكون القمر أبعد ما يكون عن الأرض (الأوج) يدور في أبطأ درجاته، فإن دورانه يتقدم قليلاً، ونرى جانبه الغربي أكثر قليلاً. نسمي هذه الحركة (ميسان خطوط الطول).

يؤدي أيضاً ميل مدار القمر بمقدار 5 درجات إلى ظهوره على شكل إيماءة، كما لو كان يقول «نعم». يؤدي الميل أحياناً إلى رفع القمر فوق نصف الكرة الشمالي للأرض، وأحياناً أسفل نصف الكرة الجنوبي للأرض، مما يسمح لنا برؤية المزيد من نصفي الكرة الشمالي أو الجنوبي للقمر. نسمي هذه الحركة (ميسان خطوط العرض).

أخيراً، يبدو أن القمر يميل للأمام والخلف مثل بندول الإيقاع. يساهم ميل مدار القمر في هذا، ولكن يرجع ذلك في الغالب إلى ميل الأرض. تميل الأرض بمقدار 23.5 درجة على محورها، مما يعني أنه عندما نلاحظ القمر من الأرض، فإنه يشبه إلى حد ما أننا نقف جانباً على منحدر. إذا نظرت إلى اليسار، فإن المنحدر ينحدر Ramp Slopes Down. إذا نظرت إلى اليمين، فإن المنحدر ينحدر. أمامك الأفق يبدو أعلى يمينًا وأسفل يسارًا. إذا استدرت، يبدو أن الأفق يميل في الاتجاه المعاكس.

يعمل المنحدر المائل Tilted Ramp بالطريقة نفسها لعمل (المنصة المائلة) للأرض تحت أقدامنا. كل أسبوعين، علينا أن ننظر في الاتجاه المعاكس لرؤية القمر، ثم تميل الأرض تحت أقدامنا في الاتجاه المعاكس أيضاً.

• إشـــــــراق الأرض Earthshine

في بعض الأحيان، عندما يكون القمر في أحد أطوار الهلال، بإمكاننا رؤية المنطقة المظلمة من قُرْب القمر وهي تتألق بشكل خافت. هذا التأثير ناتج عن انعكاس ضوء الشمس عن سطح الأرض على وجه القمر. نظراً لأن الأرض في تلك النقطة من مدارها تكون (بدراً كاملاً) تقريباً من منظور القمر، فإن الضوء الذي تعكسه، والذي يُسمى إشراق الأرض، يكون ساطعاً بدرجة كافية لإضاءة السطح المظلم بشكل خافت.

مع أن القمر في طور الهلال في هذه الصورة، إلا أن معظم الجانب المظلم المواجه للأرض من القمر لا يزال مرئيّاً بشكل خافت، مضاء بضوء الشمس المنعكس عن كوكبنا وهو في (طور البدر). يسمى هذا الضوء المنعكس (إشراق الأرض).

• قمـــــر النهـــــار

مع أن القمر غالباً ما يُنظر إليه على أنه زائر ليلي، إلا أنه يُرى أيضاً في أثناء النهار على أنه حضور باهت شاحب. أفضل الأوقات لرؤية القمر خلال النهار ربما تكون خلال مرحلتي التربيع الأول والأخير، عندما يكون القمر مرتفعاً بدرجة كافية فوق الأفق وعلى زاوية 90 درجة تقريباً من الشمس في السماء. يساعد هذا في جعل ضوء الشمس المنعكس ساطعاً بدرجة كافية لرؤيته أثناء انعكاسه عن القمر.

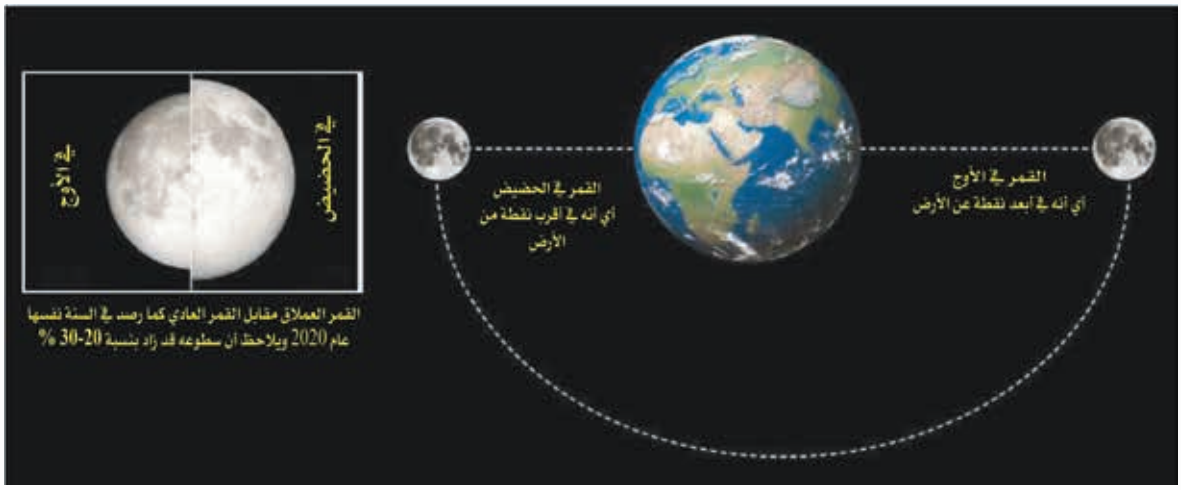
يمكن رؤية القمر في سماء النهار في أي طور باستثناء القمر الجديد، عندما يكون غير مرئي لنا، وعندما يكون تحت الأفق أثناء النهار. يكون الهلال خلال الأطوار التربيعيَّة مرتفعاً في السماء أثناء النهار، ولكن لا يمكن رؤية الأطوار المحدبة في النهار إلا قبل غروب الشمس مباشرة.

القمر المشرق يرتفع فوق سلسلة من التلال في جبال واساتش بولاية يوتا.

• القمـــــر العمـــــلاق

يحدث القمر العملاق Supermoon أو القمر عندما يتزامن القمر المكتمل مع أقرب اقتراب للقمر من الأرض في مداره الإهليلجي، وهي نقطة تعرف باسم نقطة الحضيض. خلال كل دورة مدتها 27 يوماً حول الأرض، يصل القمر إلى أقرب نقطة، أو الحضيض، على بُعْد نحو (363300 كيلومتر) من الأرض، وأبعد نقطة، أو الأوج، على بُعْد (405500 كيلومتر) من الأرض.

القمر العملاق ليس مصطلحاً فلكيّاً رسميّاً، ولكنه يستخدم عادةً لوصف اكتمال القمر الذي يقع ضمن 90 % على الأقل من نقطة الحضيض.



يحدث القمر العملاق من ثلاث إلى أربع مرات فقط في السنة، ودائماً يظهر بشكلٍ متتالٍ. في معظم مدار الأرض حول الشمس، لا يتداخل الحضيض والقمر.

عند أقرب نقطة له، يظهر البدر أكبر بنحو 17 % ويكون بنسبة 30 % أكثر سطوعاً من أضعف قمر في العام، الذي يحدث عندما يكون في مداره أبعد ما

يكون عن الأرض. مع أن 17 % لا تحدث فرقاً كبيراً في الحجم القابل للاكتشاف، فإن القمر العملاق الكامل يكون أكثر سطوعًا قليلاً من الأقمار الأخرى على مدار العام.

قد يكون من الصعب اكتشاف القمر العملاق بصريّاً، لكن له تأثير في الأرض. نظراً لأن القمر في أقرب نقطة له من الأرض، فقد يتسبب في حدوث مد أعلى من المعتاد.

• القمـــــر الأزرق

يشير مصطلح القمر الأزرق Blue Moon إلى توقيت اكتمال القمر (بدر)، وليس لونه.

تستغرق الدورة القمرية 29.5 يوماً، ولكن نظراً لأننا لا نقيس نصف يوم في أشهرنا، فإن تقاويمنا لا تتم مزامنتها دائماً مع القمر. لذلك، سيظهر البدر مرة كل ثلاث سنوات تقريباً مرتين في شهر تقويمي واحد، ونسمي الظهور الثاني بـ (القمر الأزرق).

يحدث القمر الأزرق مرة كل عامين ونصف تقريباً. لذلك سيظهر القمر الأزرق في أغسطس 2023م ومايو 2026م وديسمبر 2028م.

إن ترشيح ضوء الشمس عبر الغلاف الجوي للأرض بزاوية منخفضة منح القمر الأزرق لشهر يوليو 2015 درجة اللون البرتقالي في هذا المنظر من واشنطن العاصمة. هذا التأثير شائع عندما يظهر القمر بالقُرْب من الأفق.

• قمـــر الحصـــاد أو قمـــر الصيـــاد

(قمـر الحصـاد) و (قمـر الصيـاد) اسـمان تقليديـان للقمـر الكامـل في أواخـر الصيـف وفي الخريـف في نصـف الكـرة الشـمالي، عـادةً في سـبتمبر وأكتوبـر علـى التوالـي. يحتفـل بـه مـن خـلال مهرجـان منتصـف الخريـف الصينـي، الـذي يتزامـن مـع العـام الصينـي الجديـد.

يرجع لون قمر الحصاد البرتقالي إلى تشتت رايلي الكبير عندما يظهر القمر قريبًا فوق الأفق.

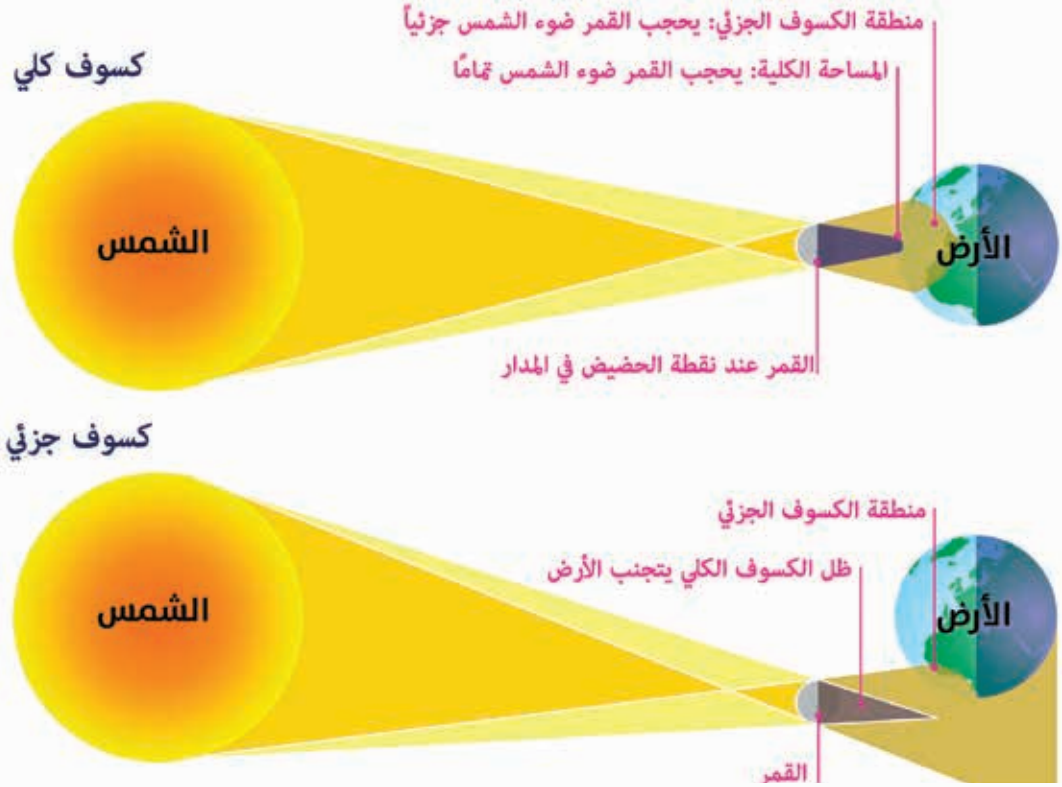
• الخســـوف والكســـوف

في أي مكان من أربع إلى سبع مرات في السنة، تصطف أرضنا والقمر والشمس تماماً لإنشاء عرض الظل الكوني المعروف باسم الكسوف. وعندما يكون مدار القمر حول الأرض مائل بالنسبة إلى مدار الأرض حول الشمس. فإن هذا الميل هو السبب في حدوث خسوف عرضي بدلاً من الخسوف كل شهر.

هناك نوعان من عروض الظل الكونية هذه: الكسوف الشمسي والخسوف القمري. أثناء كسوف الشمس، يحجب القمر الشمس عن الرؤية. وأثناء خسوف القمر، يحجب ظل الأرض القمر.

1. كســـــــوف الشمـــــــس

يحـدث كسـوف الشـمس فقـط في طـور القمـر الجديـد، عندمـا يكـون القمـر بـين الأرض والشـمس. أثنـاء كسـوف الشـمس، يلقـي القمـر بظلالـه علـى الأرض، ويمنـع رؤيتنـا للشـمس أو يحجبهـا جزئيّـاً. مـع أن حـدوث كسـوف الشـمس في كثيـر مـن الأحيـان مثـل خسـوف القمـر، إلا أنـه مـن النـادر رؤيتـه مـن منطقـة صغيـرة مـن الأرض في كل مـرةٍ يكـون مـن النـادر جـدّاً مواجهتهـا.



وأثناء كسوف الشمس، يبلغ عرض ظل القمر على سطح الأرض نحو (480 كيلومتراً) فقط. يتكون الظل من جزأين: الظل، حيث تحظر الشمس تماماً، وشبه الظل، حيث تحجب الشمس جزئيّاً. سيرى الناس في منطقة الظل كسوفاً كليّاً، بينما سيرى الأشخاص في الظلمة كسوفاً جزئيّاً. مع أن الظل ضيق وأن الكسوف الكلي يستمر لدقائق فقط، إلا أن كوكبنا يدور بسرعة كافية لإخراج الظل ثلث المسافة حول سطح الأرض قبل أن يتحرك القمر بعيداً عن المحاذاة مع الشمس.

يُنظر إلى أثر خرزات بيلي Bailey's Beads عندما يقوم القمر بتحركه الأخير فوق الشمس خلال الكسوف الكلي للشمس في 21 أغسطس 2017م فوق مدراس بولاية أوريغون. يحدث هذا الأثر عندما تسمح الفجوات في التضاريس الوعرة للقمر لضوء الشمس بالمرور في بعض الأماكن قبل الطور الكلي للكسوف مباشرة.

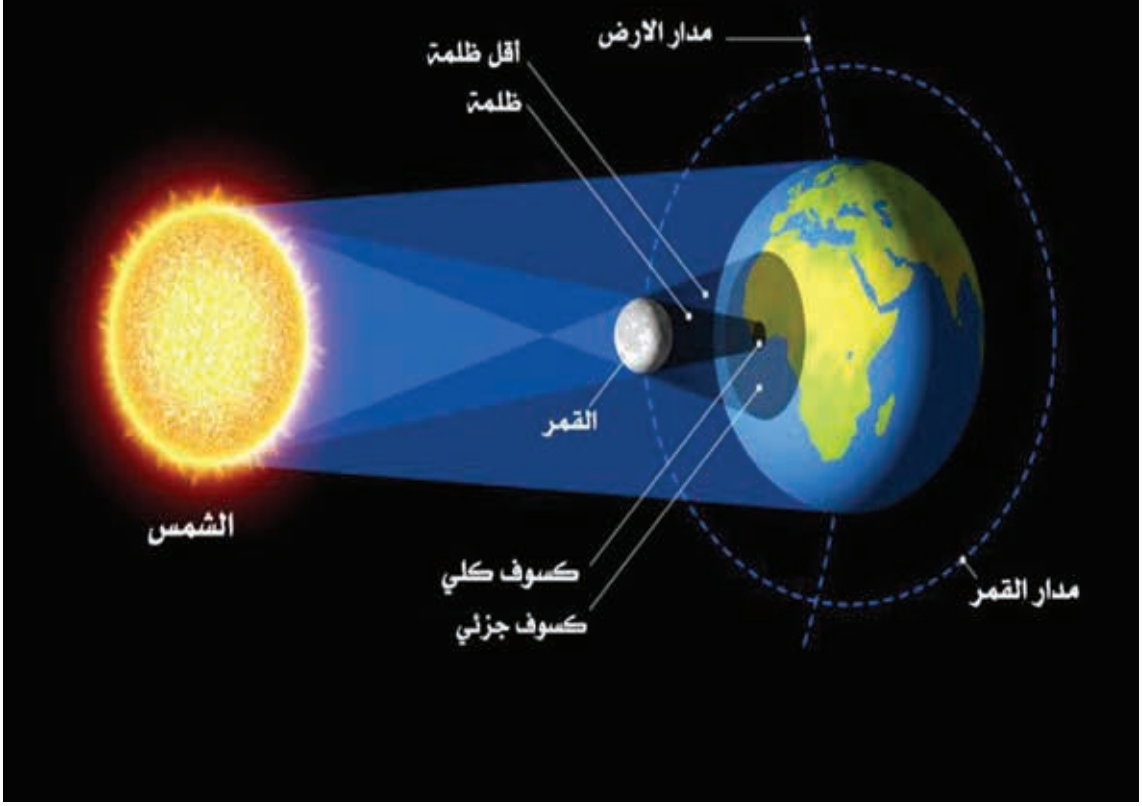
غالباً ما نحصل على مثل هذه الكسوفات الشمسية المثيرة للإعجاب على الأرض، وهي فرصة محظوظة للطبيعة. الشمس أكبر بكثير من القمر؛ يبلغ قطرها نحو 400 ضعف قطر القمر. لكن القمر أقرب إلى الأرض بنحو 400 مرة. هذا يجعل من الممكن للقمر أن يحجب الشمس تماماً عندما يتماشى كل شيء.

يمكنك معاينة الكسوف الحلقي أيضاً، عندما تتحاذى الشمس والقمر والأرض ولكن مدار القمر يضعه بعيداً جدّاً عن الأرض لحجب قرص الشمس تماماً. أثناء الكسوف الحلقي، تأخذ السماء شكل الشفق، لكن بعض الشمس لا تزال تظهر.

كسوف حلقي للشمس جرى تصويره في 20 مايو 2012م. يحدث كسوف للشمس عندما يمر القمر أمام الشمس كما يُرى من الأرض. يحدث الخسوف الحلقي عندما يكون القمر بعيداً بما يكفي عن الأرض في مداره بحيث لا يبدو القمر كبيراً بما يكفي لتغطية قرص الشمس بالكامل، تاركاً «حلقة من النار».

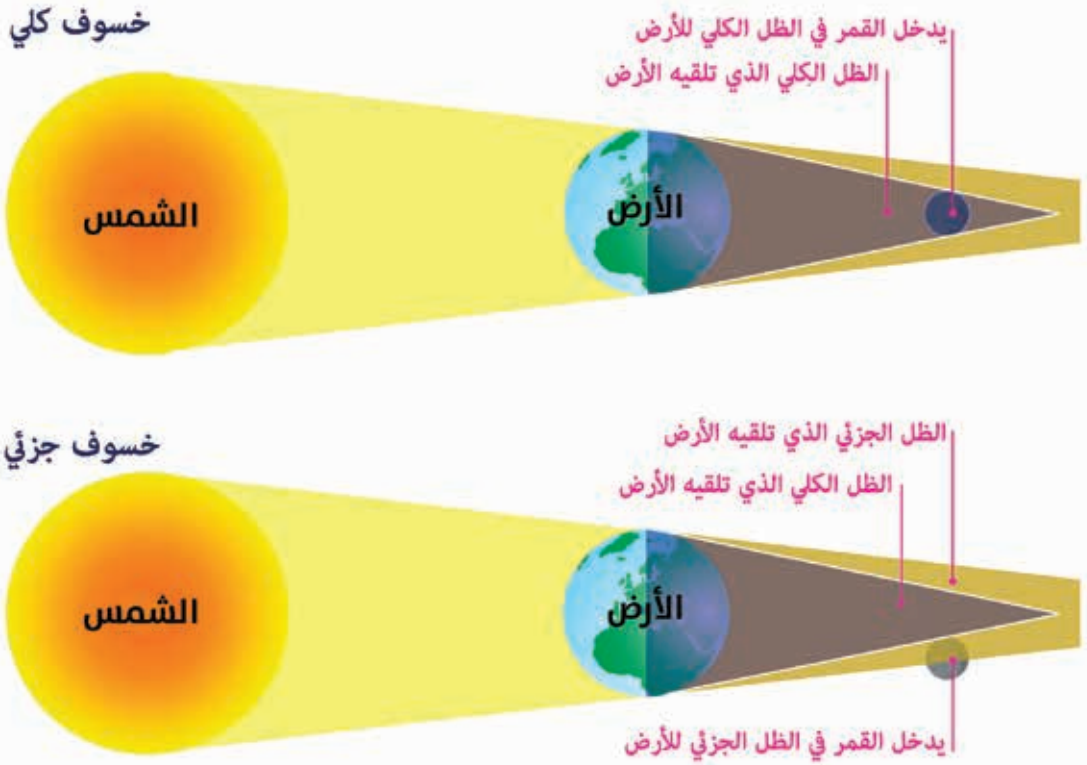
التفسير العلمي لظاهرة كسوف الشمس

يحدث الكسوف حينما يمر القمر بين الشمس والأرض فيحجب نـور الشـمس عن بعض بقـــاع الأرض حجبًا تامًّا أو جـزئيًا.



خســـــوف القمـــــــر

يحدث خسوف القمر في طور اكتمال القمر. عندما تتوضع الأرض بدقة بين القمر والشمس، يسقط ظل الأرض على سطح القمر، مما يؤدي إلى تعتيمه، وفي بعض الأحيان يحول سطح القمر إلى اللون الأحمر اللافت للنظر على مدار ساعات قليلة.



يوجـــد ثلاثـــة أنـــواع مختلفة من خســـــوف القمـــــر:

أ. الخسوف الكلي للقمر Total lunar eclipse

يتحـرك القمـر إلـى الجـزء الداخلـي مـن ظل الأرض أو الظـل. يصـل بعـض ضـوء الشـمس الـذي يمـر عبـر الغـلاف الجـوي لـلأرض إلـى سـطح القمـر ويضيئـه بشـكل خافـت. تنتشـر الألـوان ذات الأطـوال الموجيـة الأقصـر - الأزرق والبنفسـجي - بسـهولة أكبـر مـن الألـوان ذات الأطـوال الموجيـة الأطـول، مثـل الأحمـر والبرتقالـي. نظـراً لأن الأطـوال الموجيـة الأطـول تمـر عبـر الغـلاف الجـوي لـلأرض، وتبعثـر الأطـوال الموجيـة الأقصـر، يظهـر القمـر باللـون البرتقالـي أو المحمـر أثنـاء خسـوف القمـر. كلمـا زاد الغبـار أو الغيـوم في الغـلاف الجـوي لـلأرض أثنـاء الخسـوف، ظهـر القمـر أكثـر احمـراراً.

يحـدث قمـر الـدم Blood Moon عندمـا يكـون قمـر الأرض في حالـة الخسـوف الكلـي للقمـر. في حـين أنـه ليـس لـه أهميـة فلكيـة خاصـة، فـإن المنظـر في السـماء مذهـل حيـث يتحـول القمـر الأبيـض عـادة إلـى اللـون الأحمـر أو البنـي المائـل إلـى الحمـرة.

(لليمين) رسم يوضح كيف تنبأ كريستوف كولومبوس بخسوف القمر للجامايكيين الأصليين يوم 1 مارس عام 1504 وقد كان قمر دمٍ أحمر، واستغل جهلهم ليأخذ ما يريد منهم. (لليسار) صورة قمر الدم.

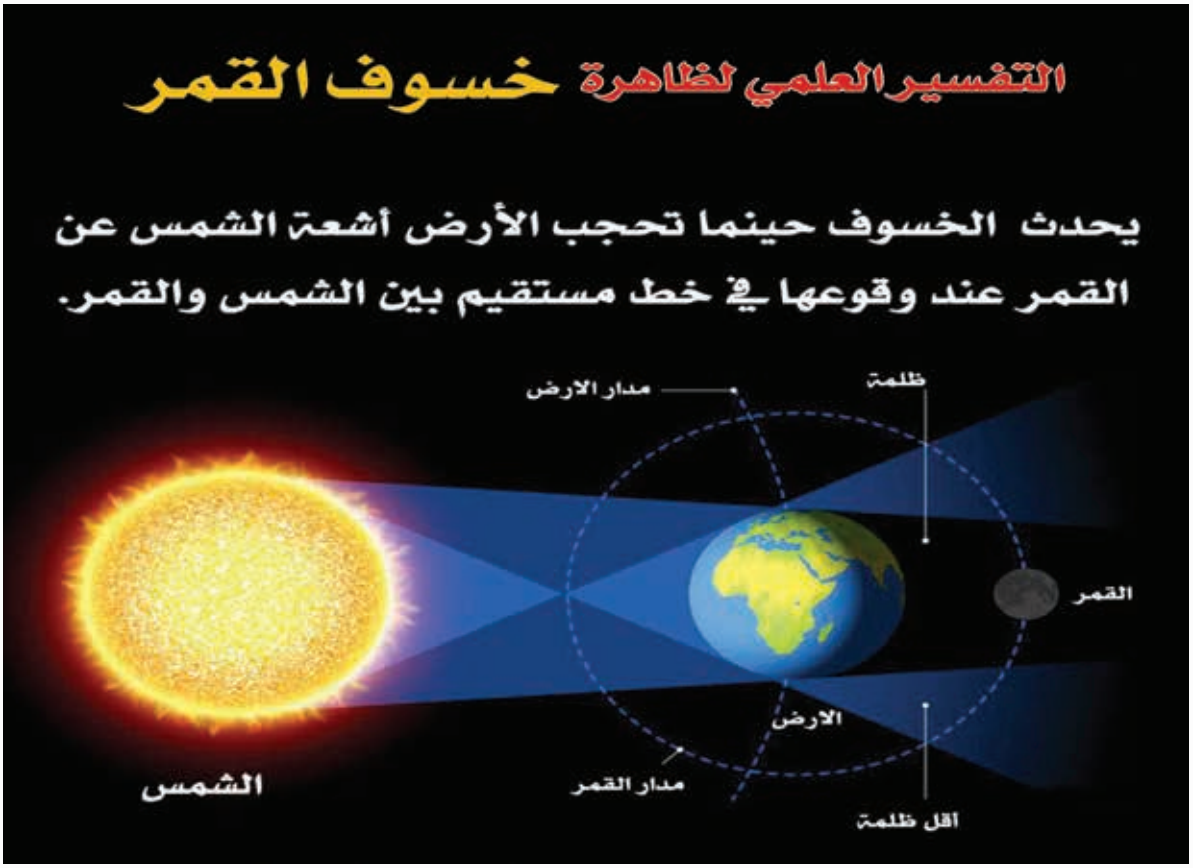
ب. خسوف القمر الجزئي Partial Lunar Eclipse

وهو ينتج عن المحاذاة غير الكاملة للشمس والأرض والقمر، حيث إن القمر يمر عبر جزء فقط من ظل الأرض. ينمو الظل ثم يتراجع دون تغطية القمر بالكامل.

ج. خسوف الظل الجزئي Penumbral eclipse

هنا يسافر القمر عبر شبه ظل الأرض، أو الجزء الخارجي الباهت من ظلها ويتضاءل بشكل طفيف بحيث يصعب ملاحظته.

أ. الخسوف الكلي للقمر، ب. الخسوف الجزئي للقمر، ج. خسوف الظل الجزئي.



التربة القمرية

يحب كل الأطفال على الأرض اللعب بالتراب عن طريق مزجه بالقليل من الماء وتحويله إلى صلصال، ولكن الأجيال القادمة التي ستسكن على القمر لن تستطيع - للأسف - اللعب بالتراب القمري، وسأخبركم لماذا.

التربة القمرية هي الجزء الدقيق من الثرى الموجود على سطح القمر. وتختلف خصائصها بشكل كبير عن خصائص التربة الأرضية. الخواص الفيزيائية للتربة القمرية هي في الأساس نتيجة التفكك الميكانيكي للصخور البازلتية والأنورثوسيتية، الناجم عن الصدمات النيزكية المستمرة والقصف بوساطة الجسيمات الذرية المشحونة بين النجمية والشمسية على مدى بلايين السنين. هذه العملية هي إلى حد كبير عملية التجوية الميكانيكية حيث تُطحن الجسيمات إلى حجم أدق تدريجيّاً بمرور الزمن. يتناقض هذا الحال بشكل أساسي مع تكوين الأتربة الأرضية، بوساطة وجود الأكسجين الجزيئي (O_2) والرطوبة والرياح الجوية ومجموعة قوية من العمليات البيولوجية الأخرى.

تشير التربة القمرية عادةً إلى الجزء الأكثر دقة من الثرى القمري Regolith، والذي يتكون من حبيبات يبلغ قطرها 1 سم أو أقل. ويشير الغبار القمري Lunar Dust عموماً إلى مواد أدق من التربة القمرية. لايوجد تعريف رسمي لحجم الحبيبات التي تشكل «غباراً»؛ البعض يضع الحبيبات التي بقطر أقل من 50 ميكرومتر، بينما يضعه البعض الآخر في أقل من 10 ميكرومتر.

الزمان: 20 يوليو 1969م. المكان: منظر عن قرب لبصمة حذاء رائد فضاء في التربة القمرية، جرى تصويرها أثناء نشاط رُوَّاد بعثة أبولو- 11 خارج المركبة (EVA) على القمر. هذه هي الخطوة الصغيرة لإنسان والقفزة العملاقة التي حققتها البشرية، أو كما قال رائد الفضاء نيل أرمسترونغ.

إذاً العمليـــــات الرئيسية المشاركة في تكوين التربة القمريـــة هي:

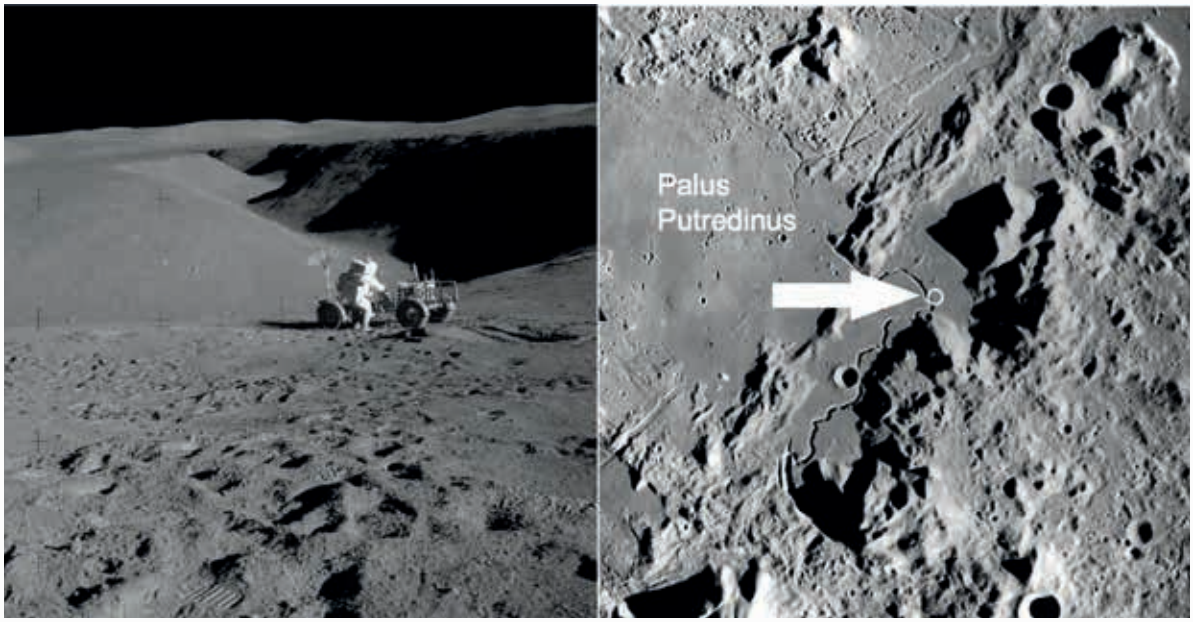
- **التكسـير Cracking:** أي التكسـير الميكانيكـي للصخـور والمعـادن إلـى جسـيمات أصغـر بوسـاطة النيـازك وصدمـات النيـازك الدقيقـة.

- **التـراص Agglutinate:** أي التحـام الأجـزاء المعدنية والصخرية معاً بوسـاطة الزجـاج الناجـم عـن ارتطام النيـزك الدقيق.

كمـا يسـهم تلاشـي الريـاح الشمسـية وتشـظي الأشـعة الكونيـة نتيجـة اصطـدام الأيونـات والجسـيمات عاليـة الطاقـة بسـطح القمـر، في عمليـة التكويـن هـذه.

تسـتمر هـذه العمليـات في تغييـر الخصائـص الفيزيائيـة والبصريـة للأتربـة بمـرور الزمـن، وتُعـرف بـ (اسـم التجويـة الفضائيـة) Space Weathering.

بالإضافـة إلـى ذلـك، يمكـن أن تخلـق نوافيـر النـار Fire Fountains، حيث ترتفع الحمم البركانيـة وتبـرّد إلـى حبيبـات زجاجيـة صغيـرة قبـل أن تسـقط مـرة أخـرى علـى السـطح، مشـكلةً رواسـب صغيـرة ولكنهـا مهمـة في بعـض المواقـع، مثـل الأتربـة البرتقاليـة الموجـودة في حفـرة شـورتي Shorty Crater في وادي طوروس-ليتـرو Taurus-Littrow بوسـاطة بعثـة أبولـو- 17، والزجـاج الأخضـر الموجـود في منطقـة هادلـي أبينـين Hadley-Apennine بوسـاطة بعثـة أبولـو - 15. يُعتقـد أيضـاً أن رواسـب الخـرز البركانـي هـي أصـل رواسـب الوشـاح المظلـم Dark Mantle Deposits (DMD) في مواقـع أخـرى حـول القمـر.



(لليمين) صورة مدارية لموقع هادلي - أبينين؛ موقع هبوط بعثة أبولو- 15 محدد بدائرة بيضاء. (لليسار) أحد رُوَّاد الفضاء من بعثة أبولو- 15 وهو يأخذ عينة تراب وصخور من موقع هادلي.

• بنيـــة التربـــة القمـــرية

تتكون التربة القمرية من أنواع مختلفة من الجسيمات بما في ذلك شظايا الصخور، وشظايا أحادية المعدن، وأنواع مختلفة من الزجاج بما في ذلك الجسيمات المتراكمة، والبراكين، وكريات الصدم. تتشكل المتراصات على سطح القمر من خلال صدمات النيازك الدقيقة التي تسبب انصهاراً على نطاق صغير يدمج المواد المجاورة مع بقع صغيرة من عنصر الحديد المضمنة في الغلاف الزجاجي لكل جسيم من الغبار. بمرور الوقت، تُخلط المواد عموديّاً وأفقيّاً من خلال عمليات الصدم. تعتبر مساهمة المواد من المصادر الخارجية الضئيلة نسبيّاً، بحيث يعكس تكوين الأتربة في أي موقع معين إلى حد كبير تكوين الأساس الصخري المحلي.

يوجد نوعان من الاختلافات العميقة في كيمياء الثرى القمري والأتربة من المواد الأرضية:

- **الأول**: هو أن القمر جاف جدّاً. ونتيجةً لذلك، فإن هذه المعادن التي تحوي على الماء كجزء من بنيتها (الترطيب المعدني) مثل: الطين والميكا والأمفيبولات غائبة عن سطح القمر.
- **الثانـــي**: هو أن الثرى القمري والقشرة يجري تقليلهما كيميائيّاً، بدلاً من التأكسد بشكل كبير مثل قشرة الأرض. في حالة الثرى، يرجع ذلك جزئيّاً إلى القصف المستمر لسطح القمر بالبروتونات من الرياح الشمسية. وإحدى نتائج هذا القصف هي أن الحديد على القمر موجود في حالات الأكسدة الأولية (+1) والكاتيونية (+2)، بينما يوجد الحديد على الأرض بشكل أساسي في حالات الأكسدة (+2 و +3).

لا شك بأن أهمية اكتساب المعرفة المناسبة بخصائص التربة القمرية كبيرة. إذْ ستعتمد إمكانية بناء المستعمرات مستقبلاً، وشبكات النقل البري، وأنظمة التخلص من النفايات، على سبيل المثال لا الحصر، على البيانات التجريبية الواقعية التي جرى الحصول عليها من اختبار عينات التربة القمرية. تعد قدرة الأتربة على حمل الأوزان عامل مهم في تصميم مثل هذه البُنى في الواقع.

بسبب صدمات النيازك التي لا تعد ولا تحصى (مع سرعات في حدود 20 كيلومتر / ثانية)، يكون سطح القمر مغطى بطبقة رقيقة من الغبار، ويكون الغبار مشحوناً كهربائيّاً ويلتصق بأي سطح يتلامس معه.

تبلغ كثافة الثرى القمري نحو 1.5 جم / سم^3. [8] وصير الأتربة كثيفة جدّاً تحت الطبقة العُليا من الثرى.

تشمل العوامل الأخرى التي قد تؤثر في خصائص التربة القمرية الفروق الكبيرة في درجات الحرارة، ووجود فراغ شديد، وعدم وجود مجال مغناطيسي قمري كبير، مما يسمح لجزيئات الرياح الشمسية المشحونة بالضرب المستمر على سطح القمر.

• نوافـــير غبـــار القمـــر

تخيل معي وأنت تسكن في منزلك القمري في الجانب المضيء، وفي وسطه نافورة قمرية، وأمامك طاولة فارغة من كل شيء. فقط تتأمل النافورة! للأسف لا يمكنك احتساء كوب من القهوة أمام هذا المشهد «القاتم».

يوجد بعض الأدلة على أن القمر لديه طبقة ضعيفة من جزيئات الغبار المتحركة التي تقفز باستمرار من سطح القمر وتهبط إليه، مما يؤدي إلى ظهور (الغلاف الجوي الغباري) الذي يبدو ثابتاً ولكنه يتكون من جزيئات الغبار المتحركة باستمرار.

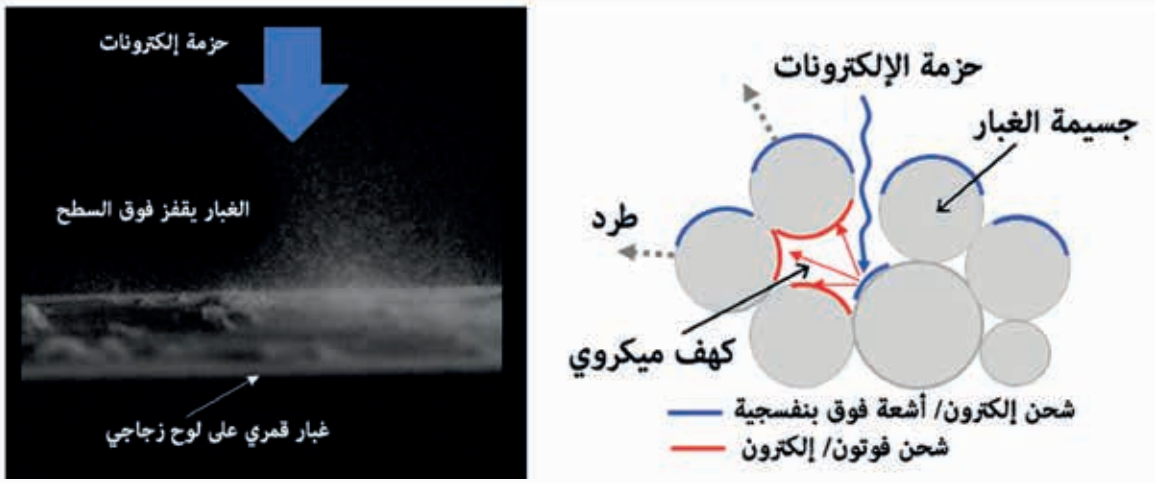
وقد استخدم مصطلح (نافورة القمر) لوصف هذا الأثر عن طريق قياس تيار جزيئات الماء في النافورة التي تتبع مساراً منحنياً بينما تظهر ثابتة بسبب ثبات التيار. وفقاً لنموذج اقترح في عام 2005م من قِبل مختبر فيزياء خارج الأرض في مركز غودارد لرحلات الفضاء التابع لناسا، فإن هذا الأثر ناتج عن التحليق الكهربائي الساكن أو (الارتفاع الكهروستاتيكي Electrostatic Levitation in The Moon).

ماذا يعني ذلك التحليق الكهربائي الساكن؟

في الجانب المضاء بالنهار من القمر، تكون الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية القاسية للطاقة الشمسية نشطة بما يكفي لطرد الإلكترونات من الذرات والجزيئات في تربة القمر. تتراكم الشحنات الموجبة حتى تصدم أصغر جسيمات الغبار القمري (التي يبلغ قياسها 1 ميكرومتر أو أصغر) من السطح وترتفع في أي مكان من عدة أمتار إلى عدة كيلومترات، مع وصول أصغر الجسيمات إلى أعلى الارتفاعات. في النهاية تتراجع نحو السطح وتتكرر العملية. في الجانب الليلي، يشحن الغبار سلباً بوساطة إلكترونات الرياح الشمسية.

في الواقع، يشير نموذج النافورة إلى أن الجانب الليلي سيحقق اختلافات في

التوتر الكهربائي أكبر من جانب النهار، وربما يطلق جزيئات الغبار إلى ارتفاعات أعلى. يمكن تعزيز هذا التأثير بشكل أكبر خلال جزء من مدار القمر الذي يمر عبر الذيل المغناطيسي للأرض، وهو جزء من المجال المغناطيسي للقمر. يمكن أن يكون هناك مجالات كهربائية أفقية كبيرة عند نقطة النهاية تتشكل بين مناطق الليل والنهار، مما يؤدي إلى انتقال أفقي للغبار، وهو شكل من أشكال (العواصف القمرية) Lunar Storms.



(لليمين) آليات شحن الغبار وإطلاقه بالشحن الكهربائية. (لليسار) صورة تبين ارتفاع الغبار نتيجة تعرضه فعليّاً لحزمة شعاع إلكتروني.

هناك بعض الأدلة على هذا التأثير. في أوائل ستينات القرن الماضي، أعادت المركبة سورفيور7- والعديد من المركبات الفضائية السابقة لها التي هبطت بهدوء على القمر صوراً تظهر توهجاً واضحاً منخفضاً للشفق فوق الأفق القمري وهو يستمر إلى بعد غروب الشمس. وعلى عكس توقعات الظروف

الخالية من الهواء مع عدم وجود ضباب جوي، فإن الأفق البعيد بين الأرض والسماء لا يبدو حاداً تماماً.

رأى رُوَّاد فضاء أبولو- 17 الذين كانوا يدورون حول القمر في عام 1972 مراراً ما أطلقوا عليه اسم «الشرائط» أو «اللافتات» أو «أشعة الشفق» لمدة 10 ثوانٍ تقريباً قبل شروق أو غروب الشمس على القمر. أبلغ عن مثل هذه الأشعة أيضاً رُوَّاد الفضاء على متن أبولو 8 و 10 و 15. وقد تكون هذه الأشعة مشابهة للأشعة الشفقية على الأرض.

كما أجرى رواد أبولو – 17 تجربة على سطح القمر تسمى تجربة القذف القمري والنيازك (LEAM)، وهي اختصار لعبارة Lunar Ejecta and Meteorites Experiment. حيث جرى تصميمها للبحث عن الغبار الناتج عن اصطدام النيازك الصغيرة بسطح القمر. وقد كان الجهاز يحوي على ثلاثة مستشعرات يمكنها تسجيل سرعة وطاقة واتجاه الجسيمات الدقيقة: أحدها يشير إلى الأعلى، والشرق، والغرب.

رصد جهاز LEAM عدداً كبيراً من الجسيمات كل صباح، يأتي معظمها من الشرق أو الغرب – وليس من أعلى أو أسفل – وغالباً ما يكون أبطأ من السرعات المتوقعة للمقذوفات القمرية. بالإضافة إلى ذلك، زادت درجة حرارة التجربة إلى ما يقرب من 100 درجة مئوية بعد ساعات قليلة من شروق الشمس على القمر، لذلك كان لا بُدَّ من إيقاف تشغيل الوحدة مؤقتاً بسبب ارتفاع درجة حرارتها. من المتوقع أن يكون هذا نتيجة لالتصاق غبار القمر المشحون كهربائيّاً بجهاز LEAM، مما يؤدي إلى تعتيم سطحه بحيث تمتص حزمة التجربة ضوء الشمس بدلاً من عكسها. ومع ذلك، لم يتمكن العلماء من تحديد مصدر المشكلة بشكل واضح، حيث عمل LEAM لفترة وجيزة فقط قبل انتهاء برنامج أبولو.

جهاز تجربة القذف القمري والنيازك (LEAM)، هي إحدى تجارب بعثات أبولو على سطح القمر التي نفذتها بعثة أبولو – 17 بعد الهبوط في نوفمبر 1972. الغرض من هذه التجربة هو قياس المعاملات الفيزيائية للجسيمات الأولية والثانوية التي تؤثر في سطح القمر.

من الممكن أن تكون هذه العواصف قد رُصدت من الأرض؛ إذْ لعدة قرون، كانت هناك تقارير عن أضواء متوهجة غريبة على القمر، تُعرف باسم (الظواهر القمرية العابرة) أو TLPs. لوحظ بعضها بشكل ومضات مؤقتة، وصار حالياً من المقبول عموماً أن تكون دليلاً مرئيّاً على اصطدام النيازك على سطح القمر. لكن البعض الآخر ظهر على شكل توهجات حمراء أو بيضاء غير متبلورة أو حتى كمناطق ضبابية داكنة تغير شكلها أو تختفي خلال ثوانٍ أو دقائق. قد تكون هذه نتيجة لضوء الشمس المنعكس من الغبار القمري المعلق.

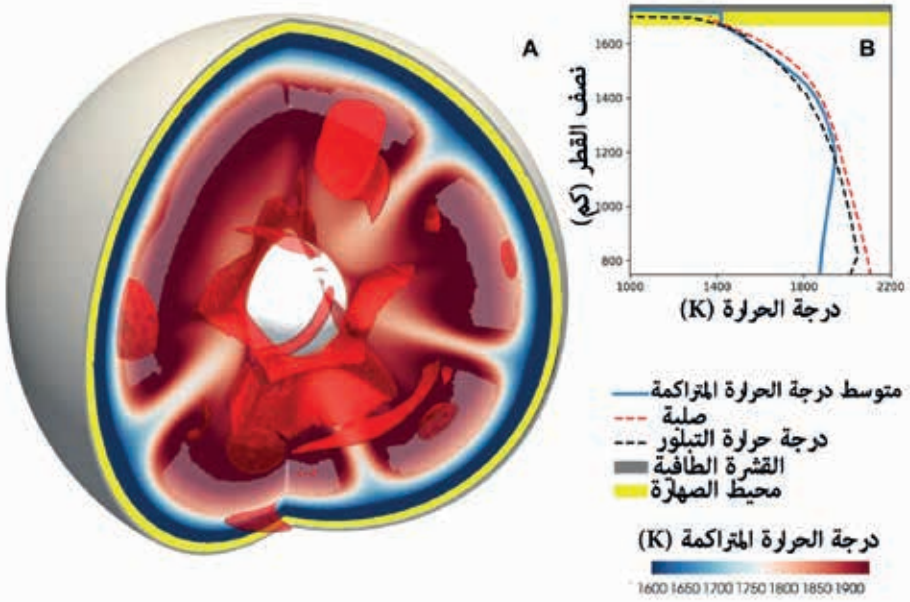
في 16 ديسمبر 2020م، عادت مهمة تشانغ5- الصينية إلى الأرض بحمولة نحو 2 كيلو غرام من الصخور والأتربة التي التقطتها من القمر. إنها أول عينة من الثرى القمري تعود إلى الأرض منذ عام 1976. والصين هي الدولة الثالثة في العالم التي أعادت مثل هذه المواد إلى الأرض.

• درجـــة حـــــرارة القمـــــر

بدون غلاف جوي وغلاف مغناطيسي، يتم التحكم في درجة الحرارة على سطح القمر من خلال دورات تسخين الشمس والتبريد في الفضاء ليلاً. متوسط درجة حرارة القمر في النهار هو (107 درجات مئوية)، على الرغم من ارتفاعها إلى (123 درجة مئوية)، وفي الليل يبرد السطح إلى (– 153 درجة مئوية)، وبحد أقصى (– 233 درجة مئوية) في حوض القطب الجنوبي المظلل بشكل دائم.

كانت درجة الحرارة الدنيا النموذجية في موقع هبوط أبولو 15 غير القطبي (– 181 درجة مئوية). هذه التقلبات الشديدة في درجات الحرارة من 200 إلى 300 درجة بين الليل والنهار تجعل سطح القمر مكانًا غير مضياف ومجهد جدّاً على المواد.

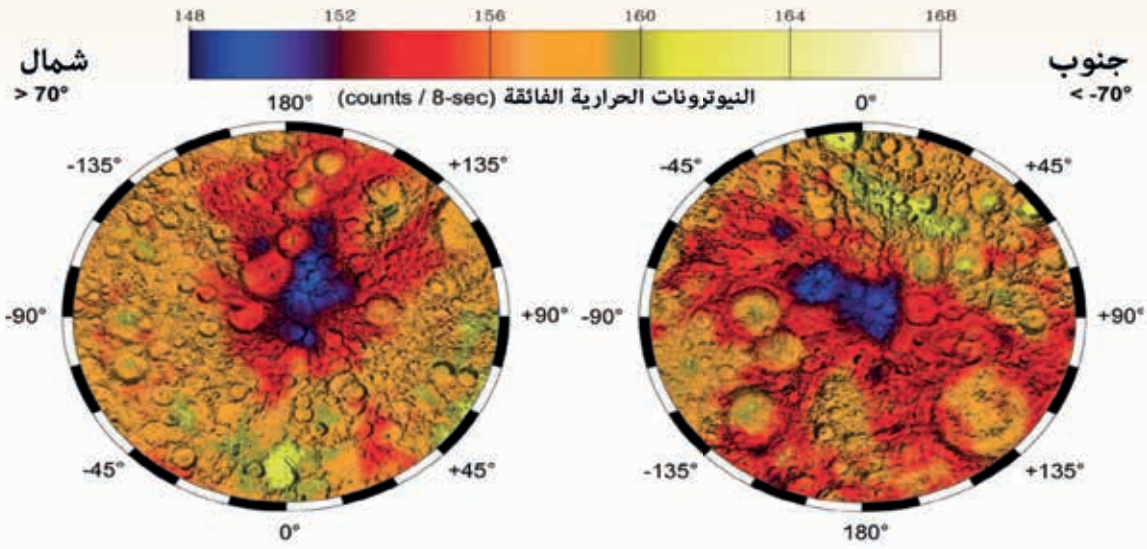
تستخدم أداة المتنبئ Diviner (أداة لقياس درجات الحرارة) سبع قنوات حرارية للأشعة تحت الحمراء لقياس درجات الحرارة على سطح القمر. تمثل هذه الخرائط درجات حرارة سطح القمر في نقاط مختلفة في مدار القمر حول الأرض، جُمعت من البيانات المأخوذة من المركبة المدارية لاستطلاع القمر. نظراً لأن أداة المتنبئ لا يمكنها سوى أخذ شرائط رقيقة من البيانات مع كل مدار، فقد احتاج العلماء إلى دمج البيانات التي جُمعت على مدار ثلاث سنوات لإعادة إنشاء لقطة سريعة لدرجة الحرارة العالمية.



الحالة الحرارية للقمر عندما كان عمره 100 مليون سنة.

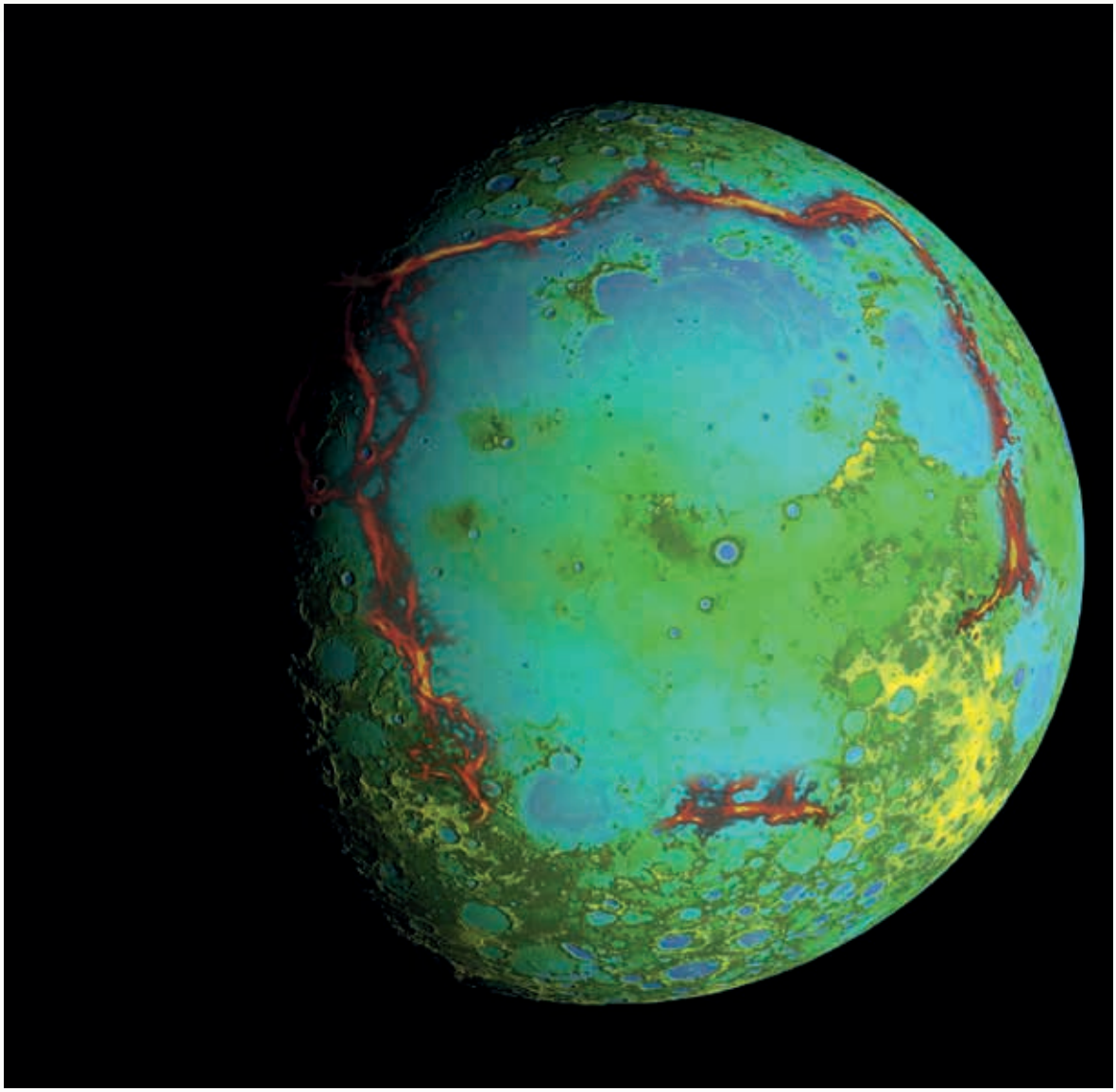
بينما يتحرك القمر حول الأرض، تُضاء أجزاء مختلفة من سطح القمر بضوء الشمس، مما يتسبب في ظهور أطوار القمر وتغير كبير في درجة حرارة السطح. يمكن أن تصل المناطق التي تضيئها الشمس (البيضاء والحمراء) إلى درجات حرارة عالية بما يكفي لغلي الماء، بينما تصل درجات حرارة المناطق المظللة (الزرقاء) إلى ما دون المئتين من الدرجات تحت الصفر.

تعتبر بيئة درجات الحرارة القصوى على القمر ذات أهمية للتخطيط لبعثات استكشاف بشرية وروبوتية مستقبلية لأن المهندسين يجب أن يصمموا معدات لتحمل التحولات الجذرية في درجات الحرارة على مدار اليوم القمري (28 يوماً أرضيّاً). يدرس العلماء أيضًا درجة حرارة القمر لتحديد المكان الذي يمكن أن يكون فيه الماء مستقرًا عند السطح أو تحته. حددت أداة المتنبئ المناطق المظللة بشكل دائم داخل حواف الحفرة بالقُرْب من المناطق القطبية باعتبارها الأماكن الأكثر احتمالاً للعثور على جليد المياه السطحي وتحت السطحي.



الخرائط القطبية لمعدلات عد النيوترونات الحرارية الفائقة Epithermal Neutron على سطح القمر. تشير المناطق المظلمة إلى مواقع وفرة الهيدروجين المحسنة.

تقوم أداة المتنبئ أيضاً برسم خرائط الاختلافات التركيبية في الصخور القمرية والتربة عن طريق قياس شدة ضوء الأشعة تحت الحمراء المقاس في ثلاث قنوات مختلفة عن القنوات الحرارية الموضحة أعلاه. تساعد هذه المعلومات العلماء في كشف التاريخ الجيولوجي للقمر وفهم كيفية تشكله.

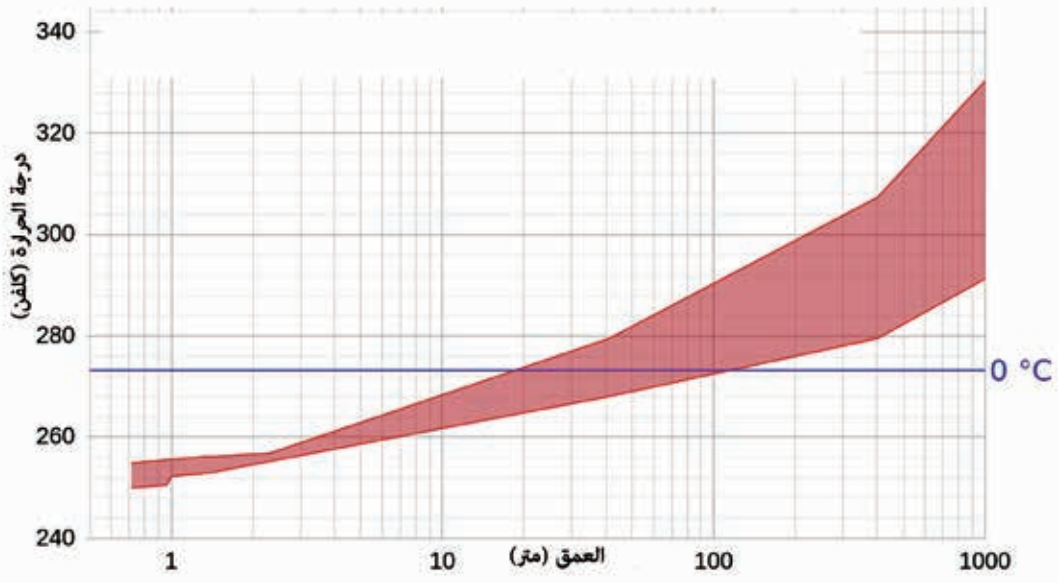


محيط العواصف Procellarum هي منطقة واسعة تقع في الجانب القريب للقمر تتميز بارتفاعات منخفضة وقشرة رقيقة وتركيزات عالية على السطح من العناصر المنتجة للحرارة، مثل: اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم. فسرت منطقة العواصف على أنها حوض اصطدام قديم يبلغ قطره نحو 3200 كم.

• التــدرج الحـــراري على الطبقــات الخارجيــة للقمر

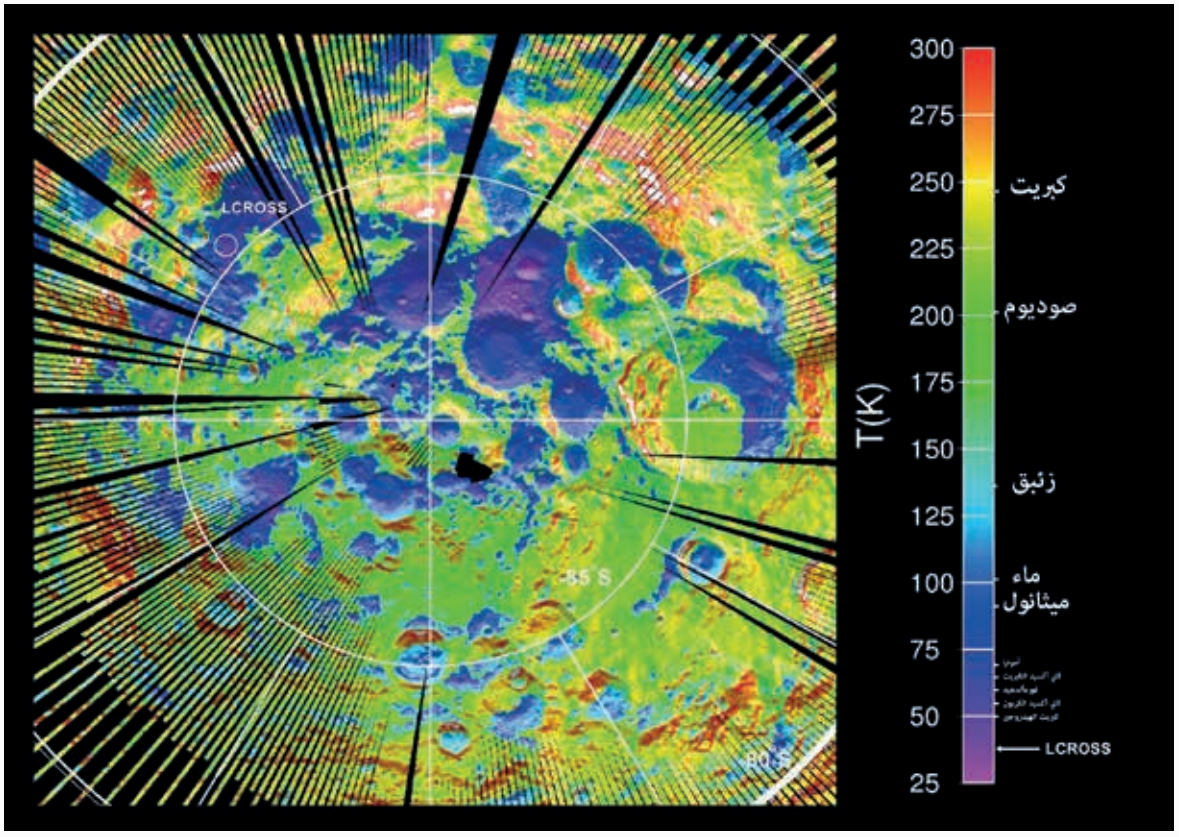
قام رُوَّاد الفضاء في بعثة أبولو- 15 بتثبيت ثلاثة مزدوجات حرارية على أعماق متعددة تصل إلى 3 أمتار من سطح القمر. وقد قاموا بإجراء هذه التجربة نظراً لأهمية التدرج الحراري في التعرف على منشأ القمر والبنية الداخلية للقمر.

أولى النتائج التي توصلوا إليها هي أن الناقلية الحرارية لطبقة الثرى القمري أقل بكثير من الطبقة الصخرية التي أسفل منها.



منحنى تدرج الحرارة من سطح القمر نحو الأعماق. بناءً على قياسات بعثتي أبولو 15 و 17. ويلاحظ ازدياد درجة الحرارة مع الازدياد في العمق بُعْد 1 متر.

في الواقع تتغير درجات الحرارة في جميع أنحاء القمر، حيث يتعرض الجانبان القريب والبعيد لضوء الشمس كل عام قمري بالنسبة لمراقب على القمر، أو شهر أرضي بالنسبة لنا كمراقبين، بسبب الدوران القمري.



خريطة تجربة مقياس الإشعاع القمري LRO Diviner Lunar Radiometer التي تظهر درجة حرارة سطح المنطقة القطبية الجنوبية للقمر. حصل العلماء على البيانات خلال شهري سبتمبر وأكتوبر 2009م، عندما كانت درجات حرارة القطب الجنوبي قريبة من قيمها السنوية القصوى. تظهر الخريطة مواقع العديد من الحفر ذات الصدم شديد البرودة، التي تعتبر مصائد باردة محتملة للجليد المائي بالإضافة إلى مجموعة من المركبات الجليدية الأخرى التي يجري ملاحظتها بشكل شائع في المذنبات.

معالـــــم ســـطح القمـــر

لقد كان رائد الفضاء الأمريكي نيل أرمسترونغ أول إنسان يطأ بقدميه سطح القمر، وقد أمضى هناك - بصحبة رائد الفضاء باز ألدرين - مدة ساعتين ونصف يجريان التجارب ويجمعان العينات ليعودا بها إلى الأرض، وكان آخر ما فعلاه هو وضع بطاقة تذكارية في الحفرة الشرقية تحمل أسماء رُوَّاد الفضاء المتوفيين الذين ضحوا بأنفسهم من أجل العلم. ويعتقد العلماء أن بصمات أقدامهم ستبقى -على الأقل- لمدة عشرة آلاف سنة، نظراً لعدم وجود رياح - مثل الأرض- تمحو أثرها.

تُعرف المناطق المضيئة على القمر باسم (المرتفعات)، أما المعالم المظلمة، التي تسمى ماريا؛ أي (البحار)، فهي أحواض صدم امتلأت بالحمم البركانية منذ 4.2 إلى 1.2 بليون سنة. تمثل هذه المناطق الفاتحة والمظلمة صخوراً مختلفة التكوين والأعمار، التي تقدم دليلاً على كيفية تبلور القشرة المبكرة من محيط الصهارة القمرية. توفر الفوهات نفسها، التي حافظت على نفسها لبلايين السنين، تاريخًا لصدم القمر والأجسام الأخرى في النظام الشمسي الداخلي.

اليوم، وبعد مرور أكثر من نصف قرن من هبوط أول إنسان على القمر سنتعرف معاً على كل معالم القمر التي اكتشفت.

• تسمية المعالم القمرية

للتحدث بشكل له معنى عن مكان ما، فمن الضروري أن يكون لديك أسماء للتضاريس المهمة. يعود النظام الحالي للتسميات القمرية إلى عالم الفلك الإيطالي جيوفاني باتيستا ريتشيولي G. B. Riccioli، الذي أضاف في عام 1651 أسماء إلى المعالم المصورة على خريطة القمر التي رسمها تلميذه غريمالدي. استخدم ريتشيولي أسماء لاتينية للبحار عكست فكرة تأثير القمر في طقس الأرض. وهكذا، هناك بحر فريجوريس Maria Frigoris، (بحر من البرد) هومموروم Humorum (رطوبة)، وبحر إمبريوم Imbrium (زخات)، وبحر نيوبيوم Nubium (غيوم). وأطلق بعض الأشخاص الآخرين تمسيات على أساس الحالات الذهنية للإنسان Serenitatis (الصفاء) و Tranquillitatis (الهدوء) – أو أشياء أخرى مثل Nectaris (الرحيق) و Crisium (الشدائد).

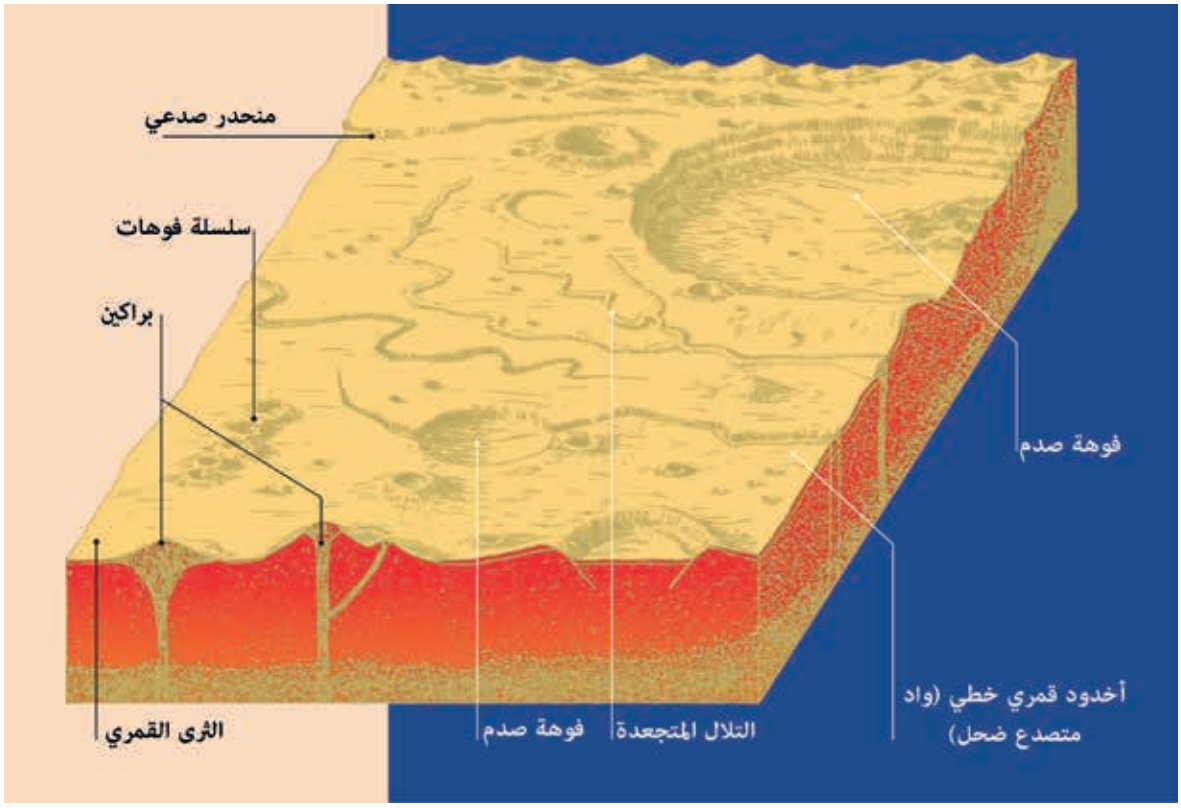
كما أطلق ريتشيولي على الفوهات أسماء علماء الفلك المشهورين، فوضع أسماء الإغريق القدماء في الشمال، وأسماء العلماء الأكثر حداثة في الجنوب. لم يكن متواضعاً، فقد وضع اسمه واسم غريمالدي على حفر كبيرة بالقُرب من الطرف الغربي.

ومنذ عصر ريتشيولي، أضيفت العديد من الأسماء إلى القمر بحيث يوجد حالياً نحو 1240 اسماً على الجانب المواجه للأرض و 690 اسماً على الجانب البعيد. خصص الاتحاد الفلكي الدولي أسماءً للمعالم القمرية لأكثر من 80 عالماً، بشرط أن يكون الشخص الذي يُحتفل به عالماً بارزاً مات منذ 3 سنوات على الأقل. قد يأمل العلماء في الحصول على شرف الحصول على اسم لفوهة بركان، ولكن ليس في وقت قريب جدّاً!

هناك العديد من الحفر على القمر أكثر من أن تستحق اسماً، والكثير منها لديه فقط تسميات بالأحرف. وهكذا، فإن الفوهات التي تقع بالقُرْب من فوهة كوبرنيكوس تسمى كوبرنيكوس أ، وكوبرنيكوس ب، ... إلخ.

ونظراً لأن العديد من الكتب التي درست القمر في القرن التاسع عشر كانت باللغة الإنجليزية، فإن الأسماء الرسمية للمعالم - بخلاف الحفر- كانت باللغة الإنجليزية. لكن تغير هذا في عام 1960، عندما أُدخلت اللاتينية للمصطلحات القمرية. ولأن كلّاً من الأسماء الإنجليزية واللاتينية لا يزالان مستخدمين على نطاق واسع، فإننا ندرج كليهما في هذا العمل ولكن نستخدم الأسماء العربية في النص. فيما يأتي جدول بالأسماء اللاتينية والإنكليزية والعربية الأكثر شيوعاً لأنواع التضاريس القمرية المذكورة في هذا العمل.

الاسم اللاتيني	اللفظ العربي	الاسم الإنكليزي	الاسم العربي
Catena	كاتينا	Crater Chain	سلسلة حفر
Dorsum	دورسوم	Mare Ridge	تلال متجعدة
Lacus	لاكوس	Lake	بحيرة
Mare, (pl. maria)	ماري	Sea	بحر
Mons, (pl. montes)	مونس	Mountain	جبل
Oceanus	أوشينوس	Ocean	محيط
Palus	بالوس	Marsh	مستنقع
Promontorium	بروموننتوريوم	Cape	الرأس
Rima	ريما	Rille	أخدود
Rupes	روبيس	Scarp	منحدر
Sinus	سينوس	Bay	خليج
Vallis	فاليس	Valley	وادي

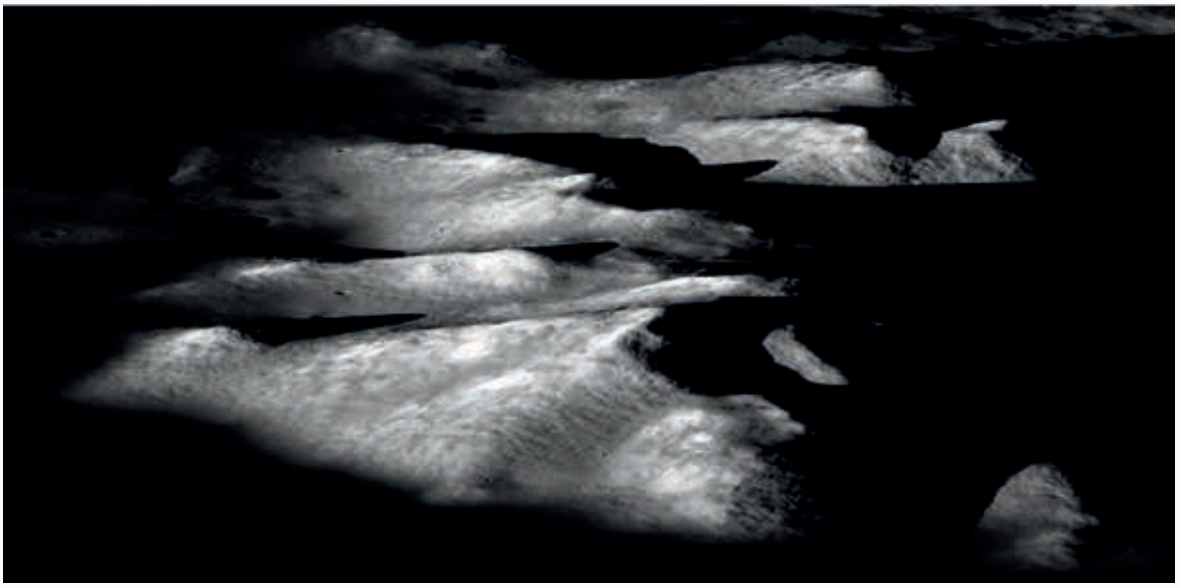


يُظهر هذا الرسم التخطيطي المعالم النموذجية التي تنتشر على سهل بازلتي قمري. جزء كبير منه مغطى بالثرى القمري؛ من الغبار إلى الصخور الناتجة عن اصطدام كويكب قديم.

• الجبـــــــــال القمريـــــــة

تحدث الجبال على القمر بشكل فردي (بالنظر إلى البادئة Mons في اسمها) أو في مجموعات أو نطاقات (Montes). وقد تشكل العديد من سلاسل الجبال القمرية من جدران الأحواض الكبيرة. على سبيل المثال، تشكل جبال أبينين (Montes Apenninus) إحدى أعلى سلاسل الجبال على سطح القمر، وتشكل جزءاً من حوض الزخات Imbrium.

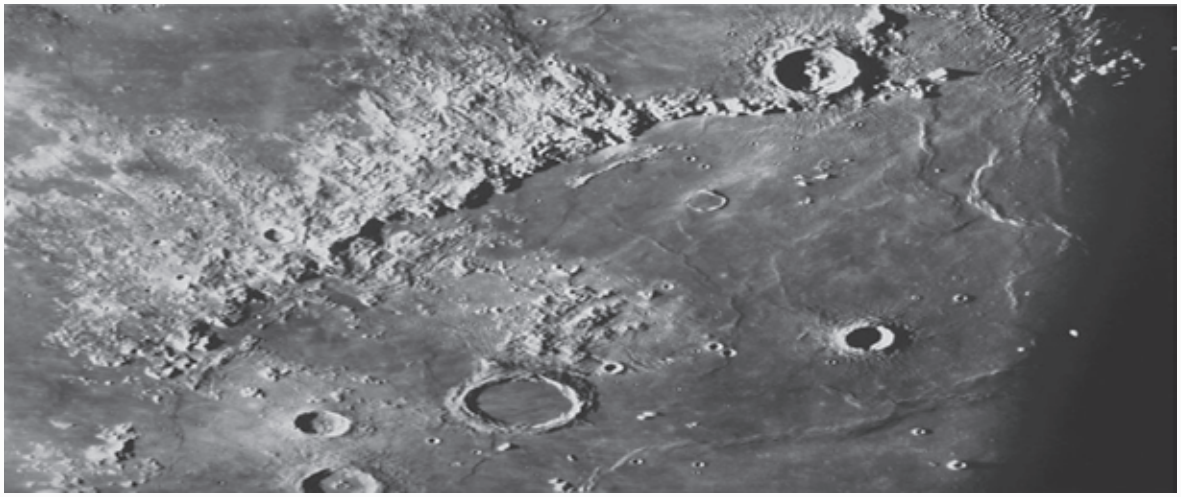
عُثر على واحدة من أروع سلاسل جبال القمر بالقُرْب من القطب الجنوبي. ترتفع جبال ليبنتز (Montes Leibnitz) إلى نحو 9000 متر فوق سطح القمر الطبيعي. يصعب رؤية هذه الجبال من الأرض لأنها تقع على أطراف القمر ولكن يمكن رؤيتها عند اهتزاز مناسب. تحوي جبال الصخرة (Montes Rock)، التي تظهر من خلال الاهتزاز على الطرف الشرقي للقمر، على قمم يبلغ ارتفاعها 4800 – 7800 متراً.



تتشكل معظم الجبال على سطح الأرض عندما تصطدم الصفائح التكتونية وتلتف القشرة. لكن الأمر ليس كذلك بالنسبة للقمر، حيث تتشكل الجبال نتيجة للصدمات النيزكية.

ويبلغ ارتفاع جبل هايغنز Huygens في سلسلة جبال أبنين 5500 متر. تشمل سلاسل الجبال البارزة الأخرى على الجانب القريب، جبال البرانس (Montes Pyrenaeus) على الجانب الشرقي من بحر الرحيق (Mare Nectaris)، وجبال الألب (Montes Alpes) بالقُرْب من القطب الشمالي، وجبال جارا (Montes Jura) على الجانب الشمالي الغربي من بحر الزخات (Mare Imbrium) وجبال الكاربات (Montes Carpatus) بالقُرْب من فوهة كوبرنيكوس وجبال القوقاز (Montes Caucasus) على الجانب الشمالي الغربي من بحر الصفاء (Mare Serenitatis).

الجبال القمرية ليست شديدة الانحدار كما تظهر في التلسكوب. يمكن رؤية الأجزاء المرتفعة منها بشكل أفضل عندما تلقي بظلالها تحت الإضاءة المائلة بوساطة ضوء الشمس. يمكن تحديد ارتفاع الجبال حسابيّاً من طول ظلها وزاوية ضوء الشمس.



عُثر على جبال أبنين (Montes Apenninus) في المنطقة الشمالية الوسطى من القمر. تمتد على طول نحو 600 كيلومتر تشكل الشاطئ الجنوبي الشرقي لبحر الزخات. توجد فوهة البركان إراتوستينس في أعلى اليمين.

• الوديـــــان القمريـــــة

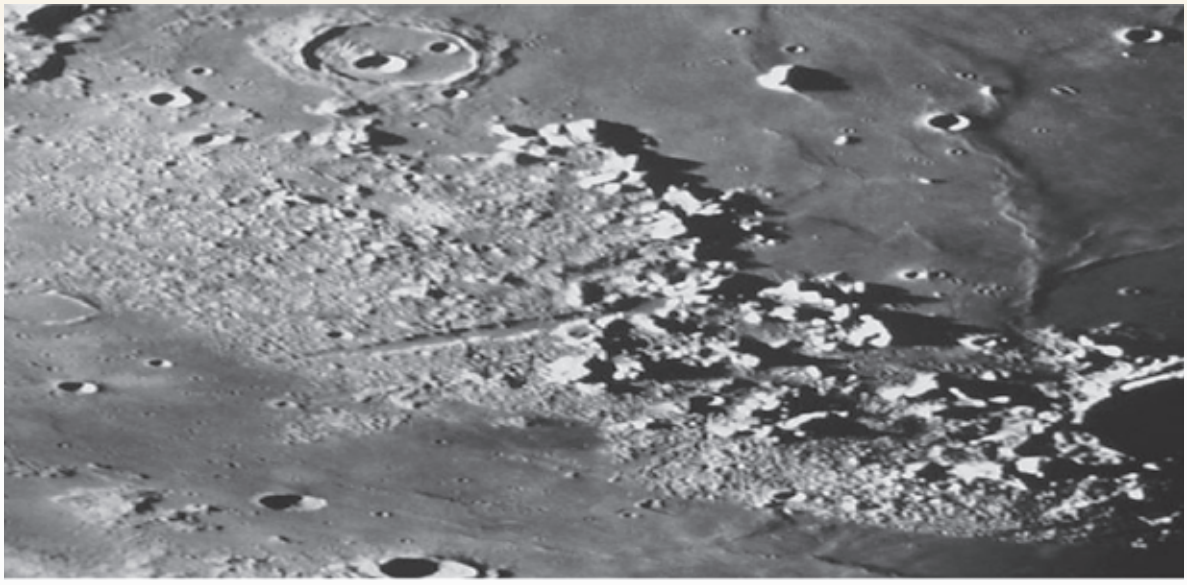
يحوي القمر على عدد من الوديان التي تشبه المضيق (فاليس Vallis اللاتينية). يُنظر إلى الوادي عموماً على أنه مساحة فارغة بين ارتفاعين، مثل: التلال أو الجبال. يمكن أن يتشكل الوادي أيضاً عندما تنفصل منطقتان عن بعضهما وينحسر القسم الأوسط. وعثر على معظم الوديان في المرتفعات القمرية. أكبر الوديان وأكثرها بروزاً، هما: وادي جبال الألب العظيم (Vallis Alps) ، ووادي ريتا (Vallis Rheita).

يمر وادي جبال الألب عبر سلسلة جبال الألب بين بحر الزخات وبحر البرد. يبلغ عرض أرضية الوادي نحو 10 كيلومترات وطولها 180 كيلومتراً. يُعتقد أن الوادي قد تشكل عندما غرقت الأرض الواقعة بين صدعين متوازيين. من المحتمل أن تكون العيوب قد تكونت استجابة للضغوط في القشرة من صدمة بحر الزخات.

ويقع وادي ريتا في المرتفعات الجنوبية الشرقية، وهو أوسع بكثير وأقل عمقاً من وادي جبال الألب، وله جوانب منحدرة بلطف. يبلغ عرضه نحو 25 كيلومتراً ويمتد لمسافة نحو 180 كيلومتراً. للوادي أصول مختلفة عن وادي جبال الألب. يبدو أنها تشكلت من عدة حفر متداخلة.

من المحتمل أن تكون الحفر عبارة عن فوهات ثانوية ناتجة عن مادة بحر الزخات المقذوفة.

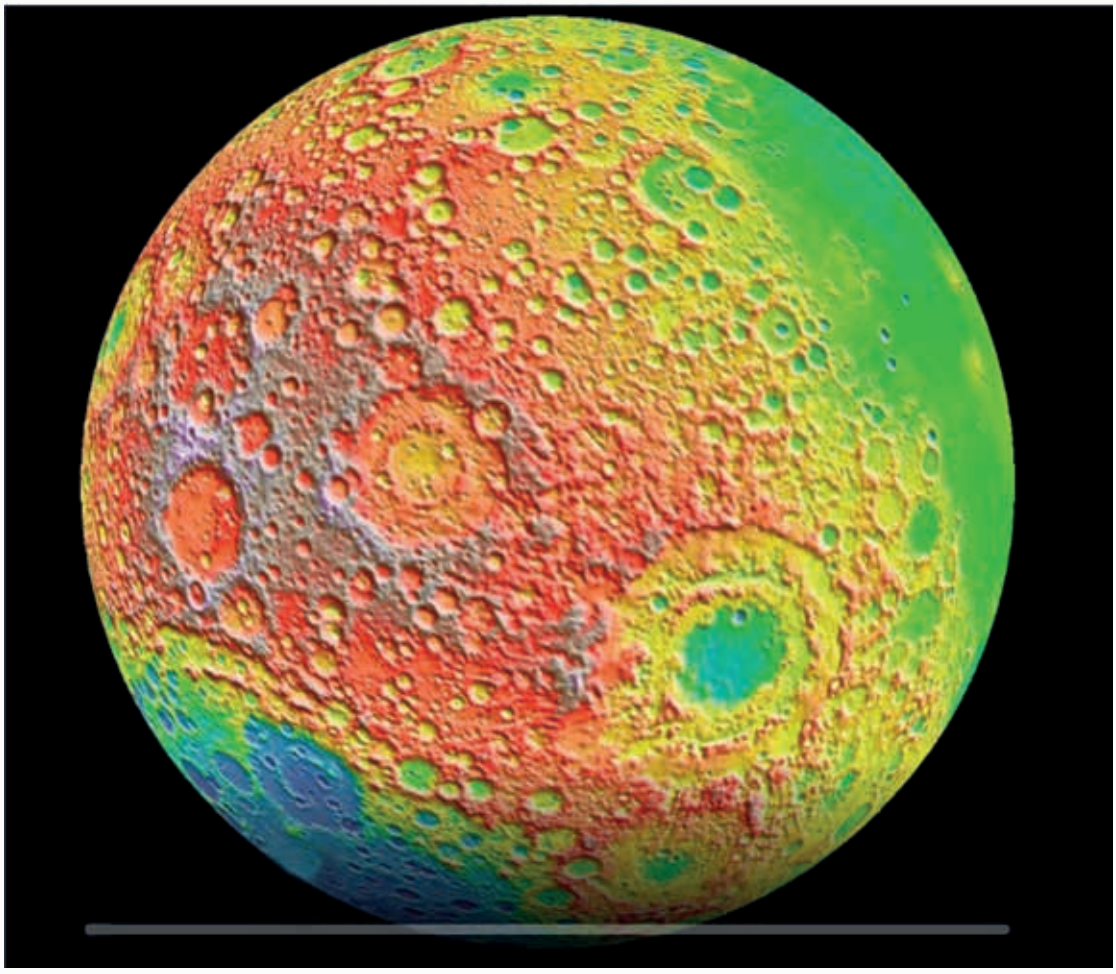
من الأفضل رؤية الوديان عندما تلقي أشعة الشمس بظلالها عليها، ولكن هذا قد يكون لفترة قصيرة فقط. على سبيل المثال، من الأفضل رؤية وادي ريتا بعد يومين أو ثلاثة أيام من اكتمال القمر (البدر).



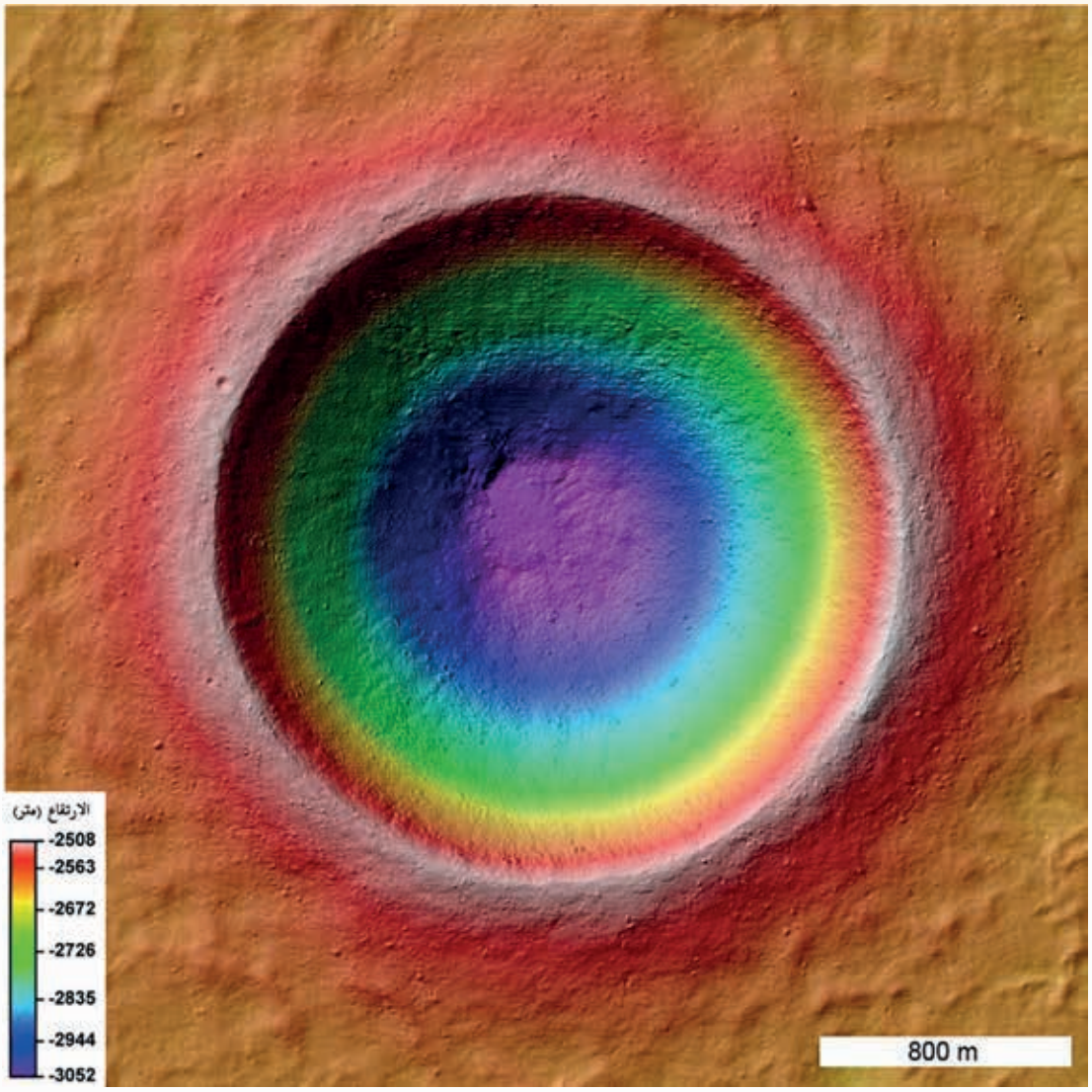
وادي ريتا أوسع بكثير وأقل عمقاً من وادي جبال الألب (يمتد عمودياً في وسط هذه الصورة). من المحتمل أن يكون الوادي قد تشكل من خط من الحفر الثانوية المتداخلة. تقع فوهة البركان ريتا (بعرض 70 كيلومتراً) في الجانب الأيسر السفلي من الوادي.

• المرتفعـــــات القمريـــــة

على عكس البحار المظلمة، فإن المرتفعات ذات الألوان الفاتحة أو التضاريس هي مناطق مرتفعة تشكل نحو 83 % من سطح القمر. بعض المرتفعات عبارة عن جبال أو تلال بقايا حواف أحواض كبيرة تشكلت من مواد رُفعت بعد الصدمات النيزكية.



تعرض مجموعة البيانات هذه تضاريس القمر. قامت أداة LOLA الموجودة على متن المركبة الفضائية LRO بقياس ارتفاع أكثر من 6 بلايين نقطة على سطح القمر، بحيث صار لدى العلماء حالياً تضاريس للقمر أفضل من أي جرم كوكبي آخر في النظام الشمسي! يشير اللون الأحمر والأبيض إلى الارتفاعات العالية ويشير اللون الأزرق والأرجواني إلى الارتفاعات المنخفضة.



خريطة تضاريس مرمزة بالألوان لحفرة لينييه Linné، قطرها (2.2 كيلومتر)، صُممت من نموذج طبوغرافي أُنشئ باستخدام بيانات المركبة الفضائية Lunar Reconnaissance Orbiter. تمثل الألوان الارتفاعات: الألوان الباردة (الأزرق والأخضر والفيروزي) هي الأدنى والألوان الحارة (الأحمر والأصفر والبرتقالي) هي الأعلى.

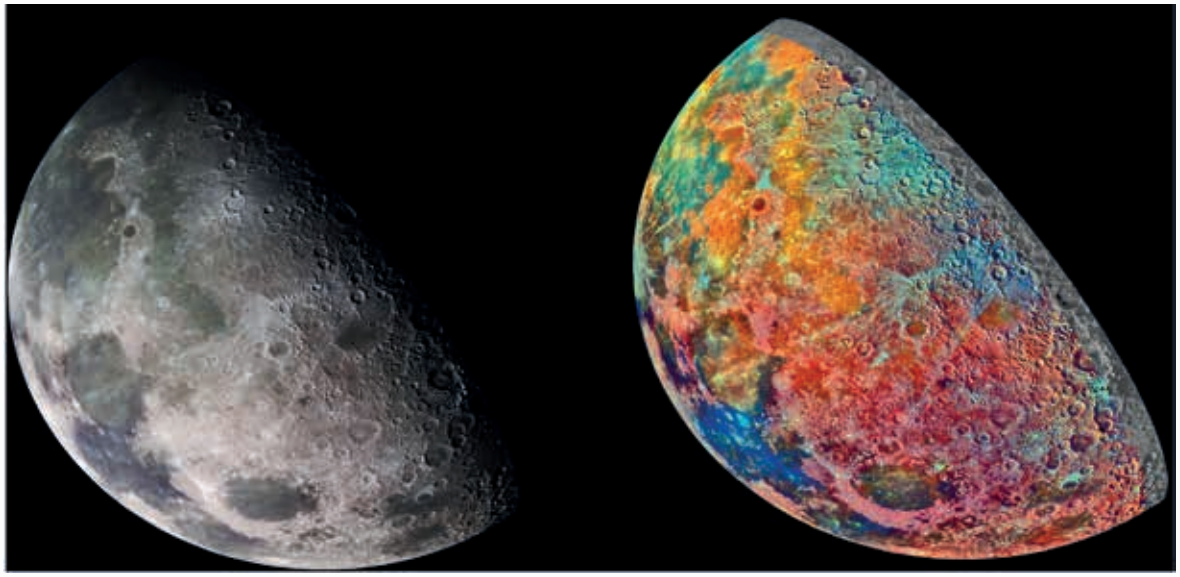
أحـد أنـواع صخـور المرتفعـات هـو الأنورثوسـيت Anorhosite الخفيـف (الفلدسـبار) الغنـي بالكالسـيوم. عثـر علـى بعـض صخـور المرتفعـات التـي أعيـدت إلـى الأرض مـن بعثـات أبولـو لتكـون (بريكيـاس) وهـي مركبـات مـن صخـور مختلفـة اندمجـت معـاً نتيجـة لصدمـات النيـزك. النـوع الرئيـس الآخـر مـن الصخـور الموجـودة في المرتفعـات هـو مـا يسـمى KREEP. هذا اختصـار للبوتاسـيوم (رمزه الكيميائي K) والعناصـر الأرضيـة النـادرة (REE) والفوسـفور (رمـزه الكيميائـي P).

أظهـر التأريـخ الإشـعاعي لصخـور القمـر أن صخـور البحـار يتـراوح عمرهـا بـين 3.1 و 3.8 مليـون سـنة، في حـين يتـراوح عمـر صخـور المرتفعـات بـين 4.0 و 4.3 بليـون سـنة.

تبين الصورة صخرة أحضرت من بحر بازلتي إلى الأرض بوساطة رُوَّاد فضاء أبولو – 15. تغطي الثقوب الصغيرة السطح مما يشير إلى أن الغاز يجب أن ينحل تحت الضغط في الحمم البركانية التي تجمدت منها هذه الصخور. أحد الاختلافات الرئيسية بين البازلت القمري وتلك الموجودة على الأرض، هو أن البازلت القمري لا يحوي على أي أثرٍ للماء.

طبقات القمر

قبل الهبوط على القمر ومنذ عام 1638، كانت تنتشر فكرة فولكلورية بين العديد من ثقافات العالم مفادها أن «القمر مصنوع من الجبن الأخضر»، وتشير هذه الفكرة إلى الشخص البسيط الذي يرى انعكاس القمر في الماء ويخطئ في ذلك، ظاناً أنه قرص جبن مستدير. وقد وجدت الفكرة طريقها أيضاً إلى فولكلور الأطفال والثقافة الشعبية الحديثة. لكن الغريب في الأمر أنه عندما أجريت دراسة استقصائية عام 1902 في الولايات المتحدة الأمريكية من قِبل عالم النفس ستانلي هول حول تربية الأطفال وجد أن معظم الأطفال الصغار لم يكونوا متأكدين من تكوين القمر، وقد كان تفسيرهم الوحيد الأكثر شيوعاً هو أنه مصنوع من الجبن!



تظهر الصورة الملونة (لليمين) معالم جيولوجية مختلفة وأكثر دقة من الصورة المأخوذة بالضوء العادي وبعض المرشحات (لليسار).

تختلف جيولوجية القمر Selenology تماماً عن جيولوجية الأرض. إذْ يفتقر القمر إلى الغلاف الجوي الحقيقي الذي يقضي على التعرية بسبب الطقس. ليس لديه أي شكل معروف من أشكال الصفائح التكتونية، وله جاذبية أقل، وبسبب صغر حجمه، فإنه تبرد بشكل أسرع. لقد تشكلت الجيومورفولوجيا المعقدة لسطح القمر من مجموعة من العمليات، وخاصة حفر الصدم والبراكين. القمر جرم متمايز، له قشرة، ووشاح، ونواة.

تستند الدراسات الجيولوجية للقمر إلى مجموعة من أرصاد التلسكوب الأرضية، والقياسات من المركبات الفضائية المدارية، والعينات القمرية التي جُلبت من هناك، والبيانات الجيوفيزيائية. أُخذت عينات من ستة مواقع مباشرة أثناء عمليات هبوط برنامج أبولو المأهولة من عام 1969 إلى عام 1972، التي أعادت 380.96 كيلو غرام من الصخور والتربة القمرية إلى الأرض. بالإضافة إلى ذلك، أعادت ثلاث مركبات فضائية سوفيتية روبوتية اسمها لونا ما وزنه 326 غراماً أخرى بين عامي 1970 إلى 1976، وأعاد الروبوت الصيني تشانغ- 5 عينة وزنها 1731 غراماً في عام 2020م.

القمر هو الجرم الوحيد خارج كوكب الأرض الذي لدينا عينات منه بسياق جيولوجي معروف. جرى التعرف على حفنة من النيازك القمرية على الأرض، مع أن مصدر الحفر على سطح القمر غير معروف. لكن لم يكتشف جزء كبير من سطح القمر، ولا يزال هناك عدد من الأسئلة الجيولوجية دون إجابة.

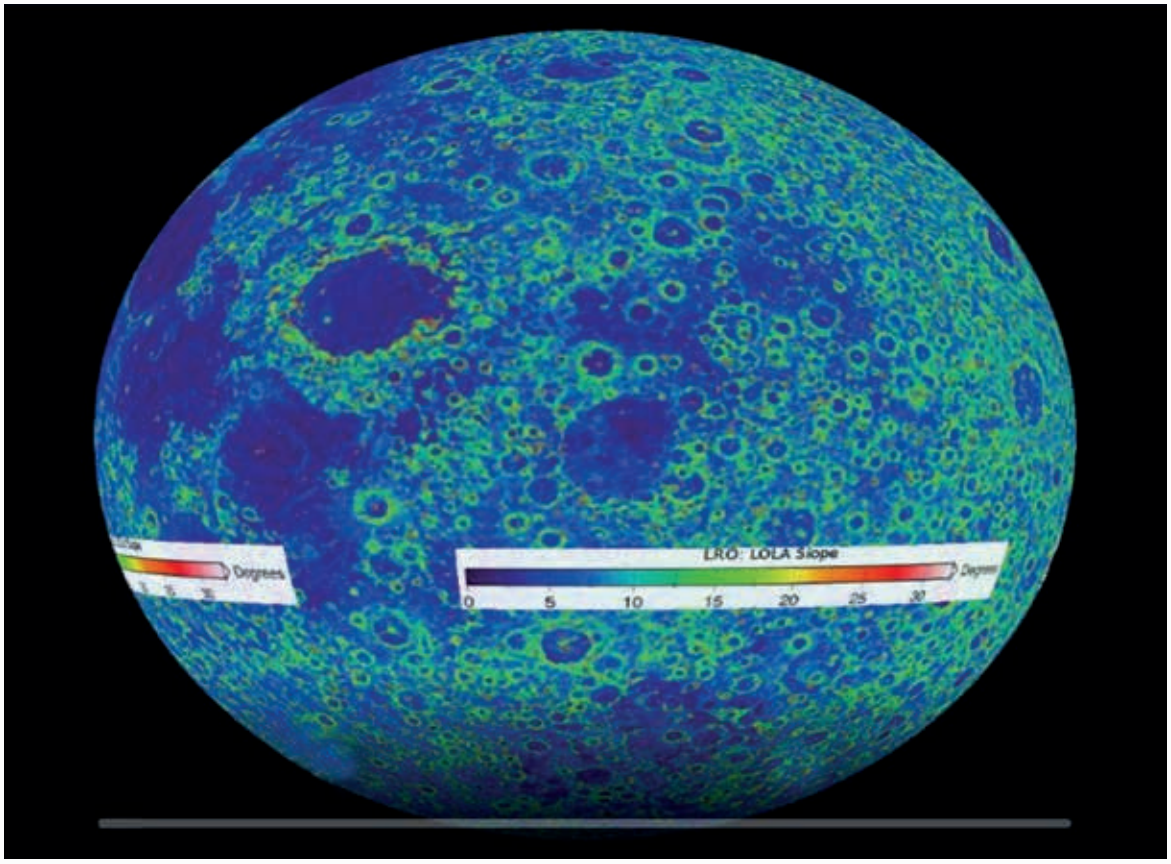
يُتحكم في الألوان على القمر بشكل كبير من خلال الاختلافات في محتوى الحديد والتيتانيوم. مناطق البحار لها انعكاس منخفض لأنها تحوي على كميات عالية نسبيّاً من أكسيد الحديد (FeO). تحوي بعض البحار على البازلت

بكميات عالية بشكل غير عادي من أكسيد التيتانيوم (TiO_2) بالإضافة إلى أكسيد الحديدي، مما يجعل الانعكاس أقل. يغير أكسيد التيتانيوم أيضاً لون البحر من الأحمر إلى الأزرق.

درس العلماء بازلت بحر السكون Mare Tranquillitatis بالتفصيل من الصخور التي أعادها رُوَّاد فضاء أبولو- 11؛ ولا يُعرف تكوين صخور بحر الصفاء إلا من الاستشعار عن بُعد في المدار. ويكمن سبب الاختلاف الكبير في الحالة الفيزيائية للمادة؛ إذْ تختلط في التربة في هذه المنطقة نسبة عالية من مواد الحمم البركانية (الحمم التي جرى انبثاقها من فتحة التهوية وتساقطت على مساحة واسعة). تبردت قطرات الصهارة أثناء الطيران وشكلت حبات صغيرة من الزجاج والبلَّورات الصغيرة. تحوي هذه الخرزات على وفرة عالية من التيتانيوم وهي منخفضة جدّاً في الانعكاس، مما يمنح هذه المنطقة توقيعها الداكن المميز.

• الصخـــــــــور القمريـــــــــة

بالمقارنـة مـع الأرض، تحـوي صخـور القمـر علـى عـدد قليـل نسـبيّاً مـن العناصـر المتطايـرة وتقريبـاً لا توجـد ميـاه جوهريـة. هـذا دعـم قـوي لفرضيـة الصـدم العملاق القائلـة بـأن القمـر الأولـي كان منصهـراً، جزئيّـاً علـى الأقـل.



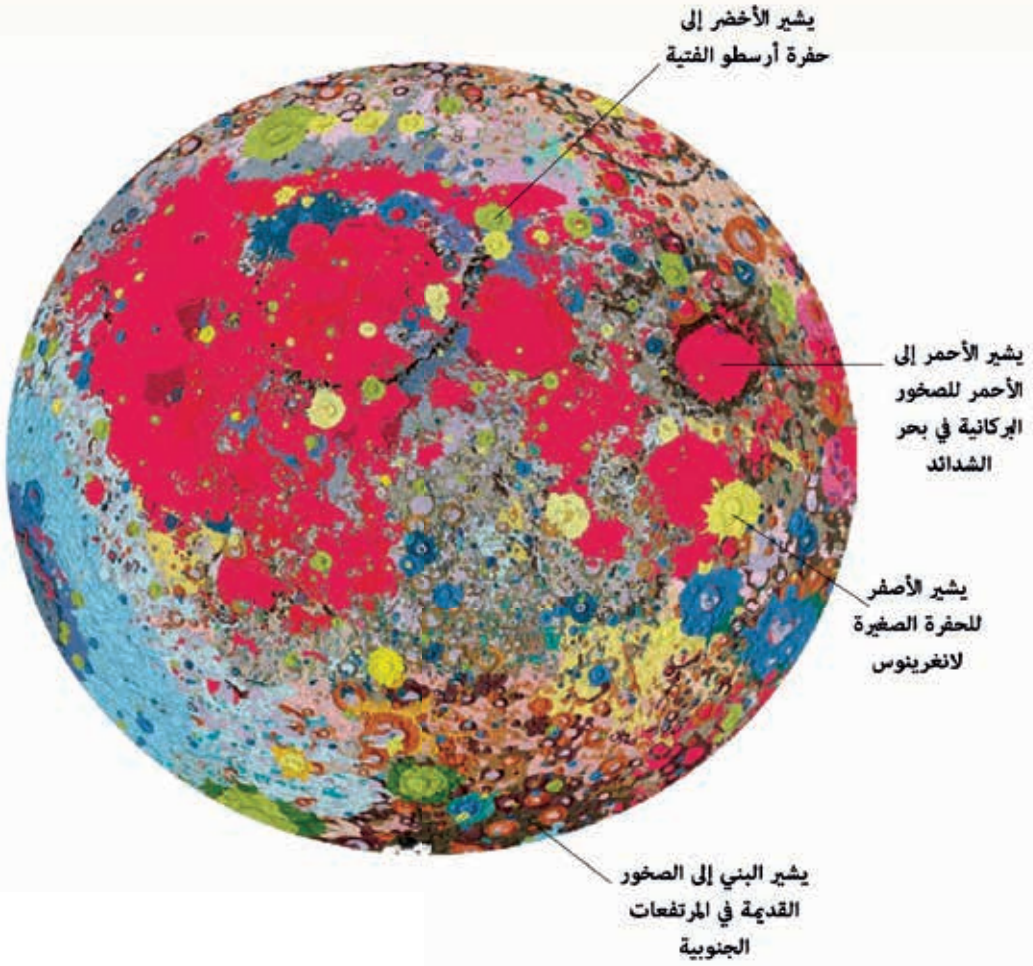
تُظهـر مجموعـة البيانـات هـذه خشـونة سـطح القمـر. وتشـير الأسـطح الخشـنة إلـى وجـود صخـور كبيـرة، وهـو أمـر مهـم يجـب مراعاتـه عنـد التخطيـط لبعثـات مسـتقبلية لاستكشـاف سـطح القمـر حيـث تشـكل الصخـور الكبيـرة مخاطـر علـى مركبـات الهبـوط علـى سـطح القمـر. الأسـطح الأكثـر خشـونة باللونـين الأحمـر والأبيـض بينمـا تكـون المناطـق الأكثـر نعومـة باللـون الأزرق.

من بين 382 كيلو غرام من الصخور التي جُمعت بوساطة بعثات أبولو، هناك مجموعتان متميزتان: البازلت البحري في سهول الحمم البركانية والأورثوسيت في المرتفعات الجبلية. يبلغ عمر البازلت البحري تقريباً من (3.2 ~ 3.8 بليون سنة) في حين أن الأنورثوسيت أقدم، ويصل عمره إلى 4.4 بليون سنة. البازلت البحري والأنورثوسيت مجرد مصطلحات عامة من الصخور؛ يمكن تسميتها على وجه التحديد من خلال وفرتها المعدنية.

صخرة من أوليفين البازلت جُمعت بوساطة رحلة أبولو – 15

تتكـون الصخـور مـن أنـواع مختلفـة مـن الـركام تسـمى المعـادن. يقـرأ مراقبـو القمـر أحيانًـا المصطلحـات المألوفـة علـى الصخـور والمعـادن. علـى سـبيل المثـال، يصـف الجيولوجيـون أحيانًـا صخـرة المرتفعـات القمريـة «الأنورثوسـيت» بأنهـا «فلدسـبار البلاجيوكليـز الغنـي يالكالسـيوم» لأن الصخـور يهيمـن عليهـا المعـدن المسـمى بـ (فلدسـبار البلاجيوكليـز).

في هـذه الحالـة، يشـير الفلدسـبار والأنورثوسـيت البلاجيوكليـز إلـى الشـيء نفسـه. يعنـي البازلـت جوهريّـاً أي صخـر داكـن ينتـج مـن تدفـق الحمـم البركانيـة. هنـا يتـم التأكيـد علـى «البازلـت البحـري» لتعكـس الوفـرة السـائدة في بحـار القمـر. إذا حـدث شـبيه البازلـت لاحتـواء عناصـر KREEP المشـعة (موضحـة في فقـرات أخـرى)، يطلـق عليـه بازلـت الكريـب KREEP Basalt أو ببسـاطة KREEP بالمعنـى الواسـع.



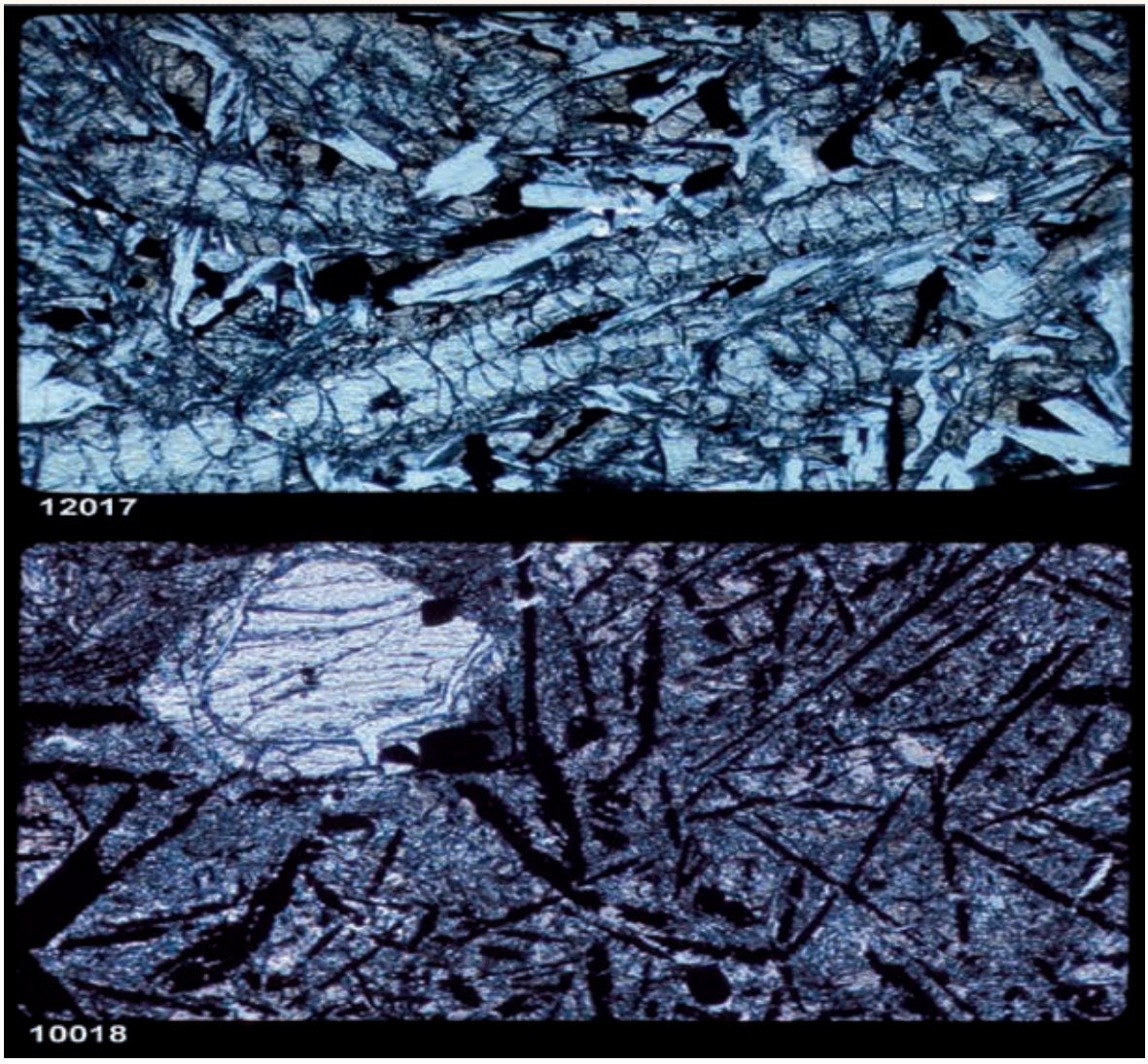
تستخدم هذه الخريطة الجيولوجية للجانب القريب من القمر ألواناً مختلفة لإظهار أنواع الصخور الموجودة على السطح والمدة التي قضتها هناك. المناطق الحمراء الكبيرة هي مناطق بحرية حيث تكون الصخور عبارة عن حمم بركانية صلبة. تبدو الفوهات التي تشكلت مؤخراً والمواد المقذوفة من حولها كبقع صفراء. بعض الصخور الأقدم بقليل ملونة باللون الأخضر. المنطقة الزرقاء الباهتة على اليسار هي جزء من حوض الصدم الضخم الذي يوجد في وسطه البحر الشرقي Mare Orientale. تظهر أقدم الصخور باللون البني الداكن والوردي.

اكتشفت العينة القمرية رقم 61016، المعروفة باسم صخرة مولي الكبيرة Big Muley ، من قبل فريق بعثة أبولو- 16 في عام 1972 في مرتفعات ديكارت، على حافة فوهة انبثاق صهاري، بالقُرْب من فوهة العلم (المحطة 1). إنها أكبر عينة عادت من القمر تمثل جزءا من برنامج أبولو. يبلغ وزنها 11.7 كيلو غرام، وتتكون أساساً من أنورثوسيت مصدوم مرتبط بجزء من الصخور الذائبة التي تسمى (التروكتوليتية) Troctolitic [التي تتكون أساساً من كميات كبيرة ولكن متغيرة من الزبرجد الزيتوني البلاجيوكليز الكلسي مع القليل من البيروكسين].

يقُدّر عمر صخرة مولي الكبيرة بنحو 3.97 ± 0.25 بليون سنة.

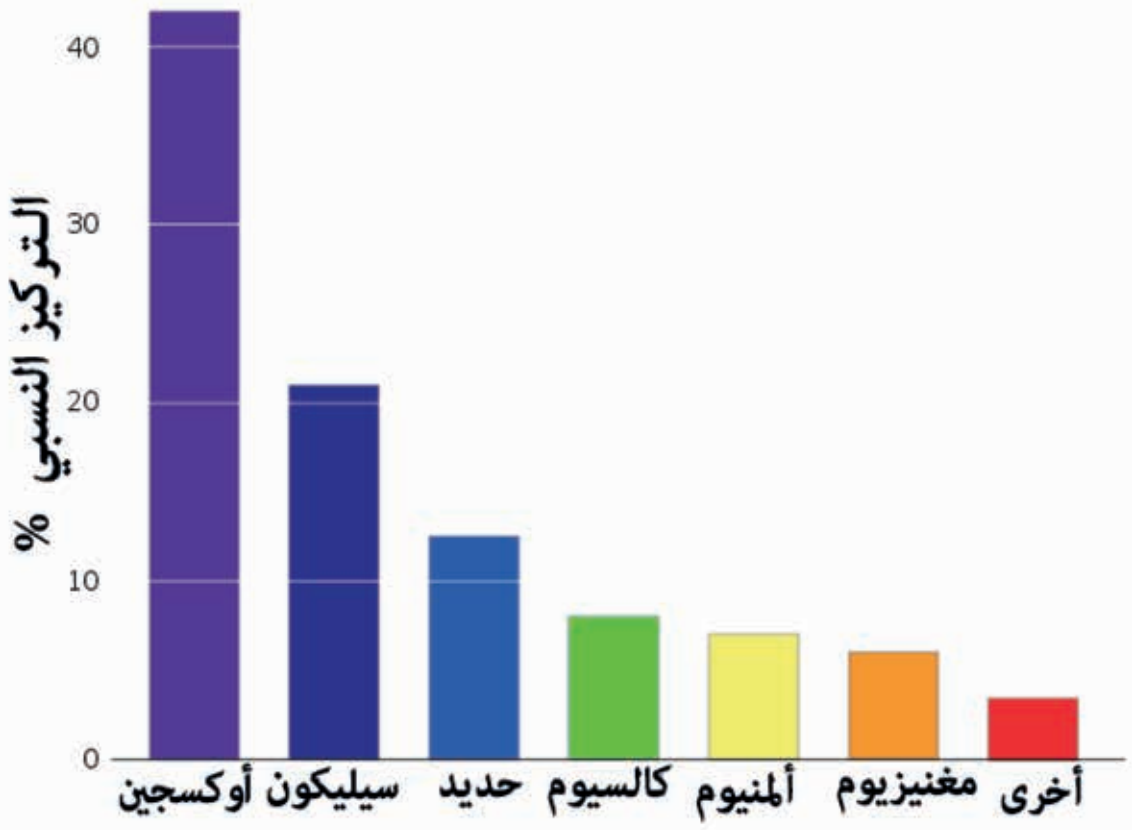
لقد كانت عينات أبولو- 12 (ذات الرقم 12017) تفتقر عموماً إلى الإلمنيت Ilmenite، في حين كانت عينات أبولو- 11 البازلتية (ذات الرقم 10018) تحوي على نسبة عالية منه بشكل غير عادي. نسبة الوزن الإجمالي لثاني أكسيد التيتانيوم في صخور أبولو- 11 تتجاوز 10 %. كيف يقارن هذا مع البازلت الأرضي؟ يحوي معظمها على أقل من 1 % TiO_2، في حين يعد البازلت الأرضي إن بلغ نسبة 3 % مرتفعاً جدّاً.

إذن ما الأمر مع هذا التنوع القمري؟ يأتي البازلت من انصهار صخور الوشاح التي تضغط على السطح. أخذ عينات البازلت طريقة مناسبة لأخذ عينات من الوشاح! حقيقة إنّ البازلت القمري يحوي أحياناً على نسبة عالية جدّاً من التيتانيوم. يخبر العلماء أن العمليات التي تعمل على فصل العناصر في الوشاح معقدة جدّاً؛ وأن القمر ليس جرماً بسيطاً. في الوقت الحالي، لا يُفهم جيداً التاريخ المعقد لتشكيل القمر وكيف تطور باطنه. من تحديد المناطق على السطح الذي يحوي كميات متفاوتة من التيتانيوم باستخدام LROC WAC، يمكن لمخططي البعثات المستقبلية التخطيط بشكل أفضل لأخذ العينات للبشر والروبوتات.



عادت الصخور من موقعي أبولو - 11 وأبولو - 12 حيث سيطر البازلت على كليهما. يكمن الاختلاف الرئيسي بين الموقعين في وفرة معدن الإلمنيت. المعادن السوداء المستطيلة في القسم الرقيق لأبولو 11 (القاع) هي الإلمنيت، وهو معدن أسود يتكون من أكسيد تيتانيوم الحديد، الذي يعتبر خامه الرئيسي.

تشمل العناصر المعروفة بوجودها على سطح القمر، من بين العناصر الأخرى: الأكسجين (O) والسيليكون (Si) والحديد (Fe) والمغنيسيوم (Mg) والكالسيوم (Ca) والألمنيوم (Al) والمنغنيز (Mn) والتيتانيوم (Ti). وأكثرها وفرة الأكسجين والحديد والسيليكون. يقدر محتوى الأكسجين بنسبة 45 % (بالوزن)، يبدو أن الكربون (C) والنيتروجين (N) موجودان فقط بكميات ضئيلة من الترسب بواسطة الرياح الشمسية.



التركيز النسبي للعناصر المختلفة في تربة القمر (بالوزن%).

• البنيـــــة الداخليـــــــة للقمـــــــر

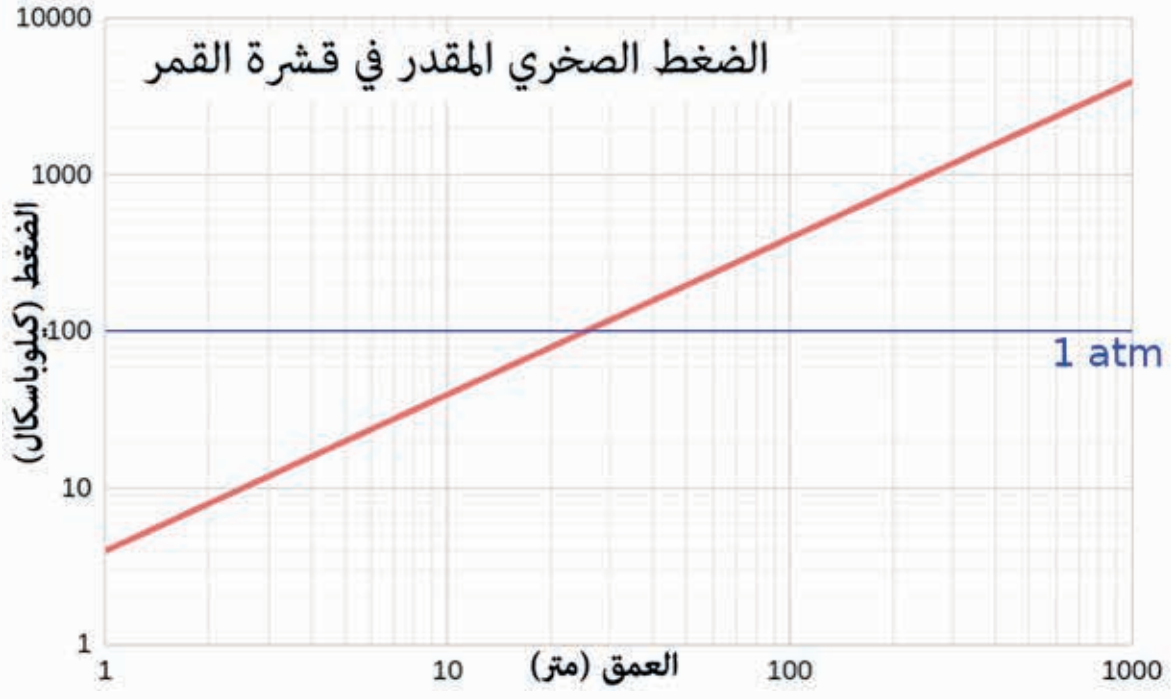
القمر عالم متمايز، وهذا يعني أنه يتكون من طبقات مختلفة ذات تركيبات مختلفة. حيث غرقت أثقل المواد في مركز القمر، وارتفعت المواد الأخف وزناً إلى الطبقة الخارجية. سمحت لنا دراسات قياس الزلازل والدوران والجاذبية باكتساب رؤى حول الطبقات المختلفة داخل القمر.

يبلغ متوسط كثافة القمر 3346.4 كيلو غرام / م^3، وهو يتكون من قشرة ووشاح ونواة متمايزة من الناحية الجيوكيميائية. يُعتقد أن هذا التركيب قد نتج عن التبلور الجزئي لمحيط الصهارة بعد وقت قصير من تكوينه منذ نحو 4.5 بليون سنة. كان من الممكن أن يؤدي تبلور محيط الصهارة هذا إلى ظهور طبقة مافيك Mafic (دخيلة) وقشرة غنية بالبلاجيكليز.

البنيـــة الداخليـــة للقمـــر

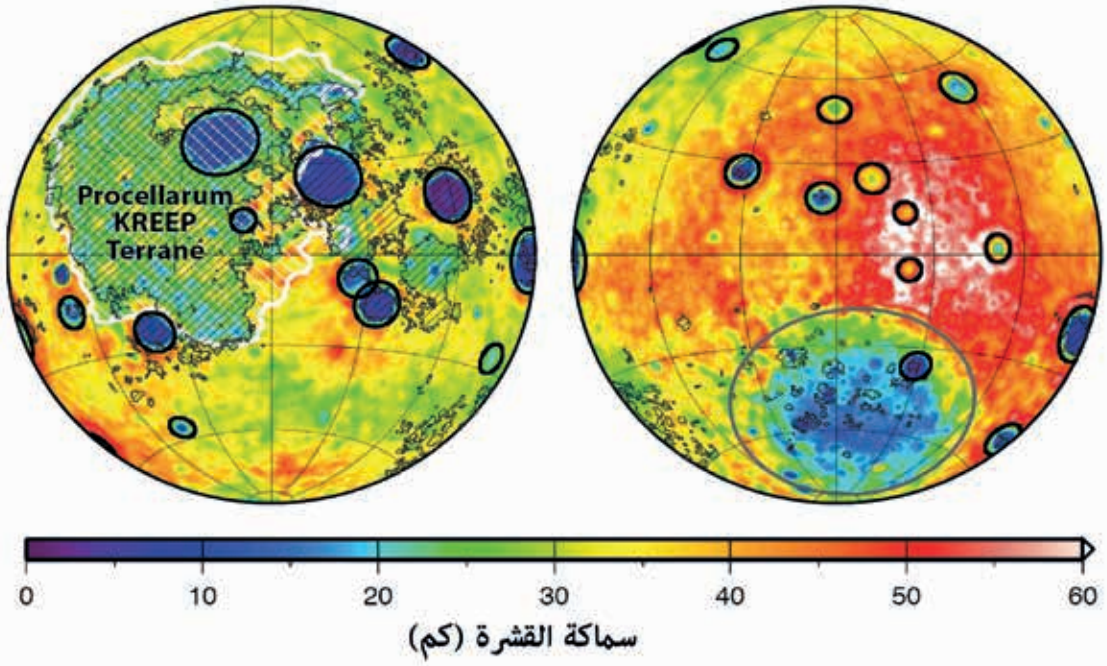
القشـــــــــرة

تتبلور المعادن الأخف، ولا سِيَّما الفلدسبار البلاجيوكليز والأنورثوسيت، وتطفو على السطح لتشكل قشرة القمر. الوشاح، الذي يبلغ سمكه نحو 1350 كيلومتراً، هو أكثر اتساعاً من القشرة التي يبلغ متوسط سمكها نحو 50 كيلومتراً. ومن المثير للاهتمام، أن قشرة القمر تبدو أرق على جانب القمر المواجه للأرض، وأكثر سمكاً على الجانب البعيد. لا يزال الباحثون يعملون لتحديد سبب ذلك.



تزداد درجة حرارة وضغط باطن القمر مع زيادة العمق.

يشير رسم الخرائط الجيوكيميائية من المدار إلى أن قشرة القمر متجانسة إلى حد كبير في التكوين، بما يتوافق مع فرضية المحيط الصهاري. من ناحية العناصر، تتكون القشرة القمرية بشكل أساسي من الأكسجين والسيليكون والمغنيسيوم والحديد والكالسيوم والألمنيوم، ولكن توجد أيضاً عناصر ثانوية ونزرة مهمة، مثل: التيتانيوم واليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم والهيدروجين. بناءً على التقنيات الجيوفيزيائية، تقدر سماكة القشرة في المتوسط بنحو 50 كم.



خريطة عالمية لسمك قشرة القمر مستمدة من بيانات الجاذبية التي حصلت عليها مركبة الفضاء غريل GRAIL التابعة لناسا. يتم تمثيل الجانب القريب من القمر في نصف الكرة الأيسر. يتم تمثيل الجانب البعيد في نصف الكرة الأيمن. والمنطقة المعروفة باسم PKT (Procellarum KREEP Terrane) التي تتوافق مع محيط العواصف Oceanus Procellarum وبحر الزخات Mare Imbrium والمنطقة الجنوبية.

1. الوشـــــــــاح

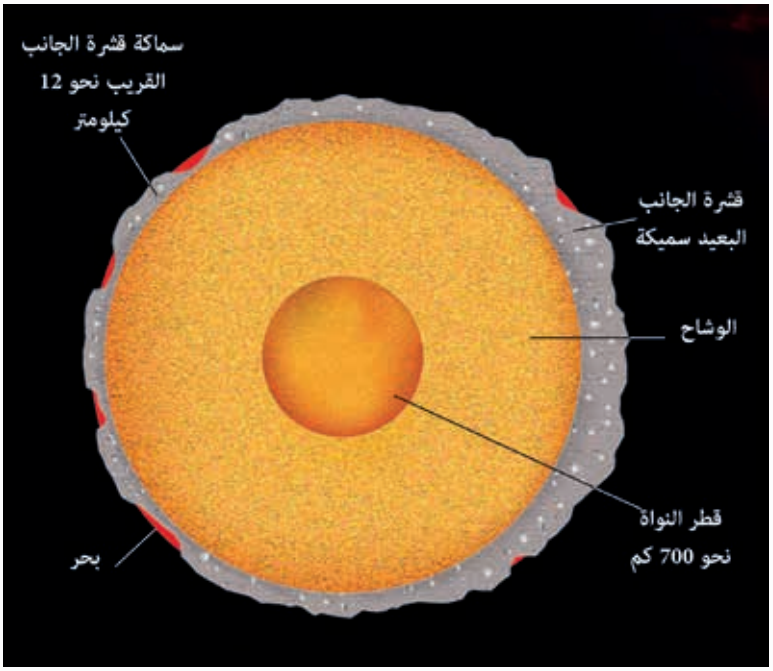
تبـين الاختلافـات في التكوينـات بـين هـذه الطبقـات أن القمـر تكـون بشـكل كبيـر، أو كلّـيّ، مـن محيـط عظيـم مـن الصهـارة في تاريخـه المبكـر جـدّاً. عندمـا بـدأ محيـط الصهـارة يبـرد، بـدأت البلّـورات تتشـكل داخـل الصهـارة. والبلّـورات مـن معـادن الوشـاح الأكثـر كثافـة، مثـل: الزبرجـد الزيتوني والبيروكسـين، غرقـت في قـاع المحيـط.

أدى الانصهـار الجزئـي داخـل وشـاح القمـر إلـى ظهـور ثـوران البازلـت البحـري على سـطح القمـر. تشـير تحليـلات هـذه البازلـت إلـى أن الوشـاح يتكـون في الغالـب مـن معـادن الزبرجـد الزيتونـي والأورثوبيروكسـين الكلينوبيروكسـين، وأن الوشـاح القمـري غنـي بالحديـد أكثـر مـن الغـلاف الأرضـي. تحـوي بعـض صخـور البازلـت القمـري على كميـات عاليـة مـن التيتانيـوم (الموجـود في معـدن الإلمنيـت)، ممـا يشـير إلـى أن أكثـر الوشـاح غيـر متجانـس في التركيـب.

2. النـــــــــواة

يوجـد في مركـز القمـر نـواة معدنيـة كثيفـة. تتكـون أكثـر النـواة مـن الحديـد وبعـض النيـكل. النـواة الداخليـة كتلـة صلبـة يبلـغ قطرهـا نحـو 480 كـم. يحيـط بالنـواة الداخليـة الصلبـة نـواة خارجيـة سـائلة، ممـا يجعـل القطـر الإجمالـي للنـواة يصـل إلـى نحـو 660 كـم. نـواة القمـر صغيـرة (نحـو 20 % مـن قطـر القمـر) علـى عكـس العوالـم الأرضيـة الأخـرى، مثـل (الأرض) التـي تكـون بنـوى تقتـرب مـن 50 % مـن أقطارهـا.

في عام 2010م، أكد إعادة تحليل بيانات أبولو الزلزالية القديمة على الزلازل العميقة باستخدام طرق المعالجة الحديثة أن القمر يحوي على نواة غنية بالحديد نصف قطرها 330 ± 20 كم. أثبت التحليل نفسه أن النواة الداخلية الصلبة المكونة من الحديد النقي يبلغ نصف قطرها 240 ± 10 كم، والنواة محاطة بطبقة مصهورة جزئيّاً (10 إلى 30 %) من الوشاح السفلي بنصف قطر 480 ± 20 كيلو متراً (سمك ~ 150 كيلو متراً). تشير هذه النتائج إلى أن 40 % من النواة من حيث الحجم قد تجمد. تبلغ كثافة النواة الخارجية السائلة نحو 5 غرام / سم^3 ويمكن أن تحوي على ما يصل إلى 6 % من الكبريت بالوزن. من المحتمل أن تكون درجة الحرارة في القلب نحو (1330–1430 درجة مئوية).



يتكون الجزء الداخلي للقمر من طبقات ولكننا لسنا متأكدين من بنيته تماماً
تبلغ سماكة القشرة الخارجية 20–120 كيلو متراً ولكن الجانب القريب أرق في المتوسط. تشكل المزيد من البحار في الجانب القريب، ربما بسبب وصول الحمم البركانية إلى السطح بسهولة أكثر من خلال القشرة الرقيقة. تقع القشرة فوق طبقة عميقة من الصخور الأكثر كثافة. تتكون النواة الصغيرة بشكل أساسي من الحديد وقد تكون منصهرة جزئيّاً.

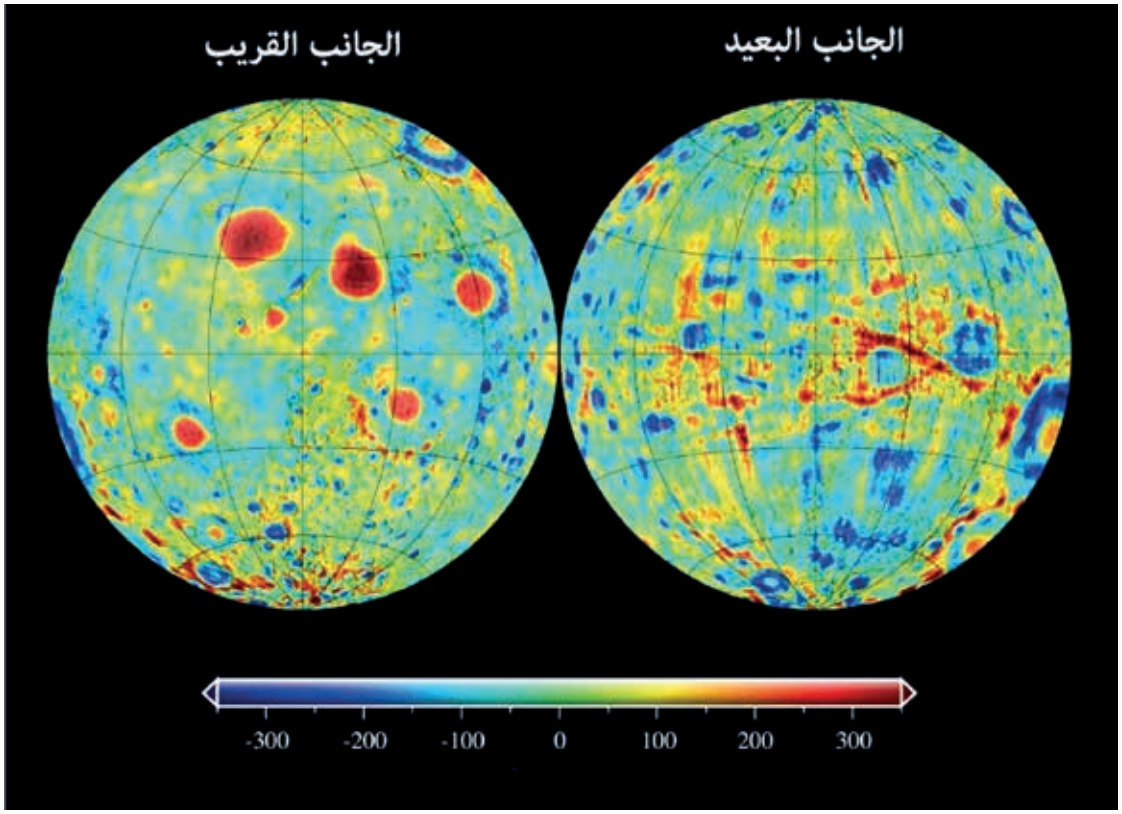
المجــال المغناطيســي والغلاف الجـوي للقمر

يصفُ أول عمل خيالي معروف رحلة إلى القمر قام بها السوري لوقيان Lucian السمسياطي في سنة 160 بعد الميلاد. لم يكن يقصد بالأصل من عمله الخيال العلمي وإنما هو مسرحية هزلية، تدعى (القصة الحقيقية). تقدم حتى اليوم لنا قراءة ممتعة. وهي تتحدث عن حكاية مستكشفين يونانيين يبحرون في الأطلسي وفي أثناء عاصفة عاتية، تصير سفينتهم ضمن دوامة في الهواء بفعل إعصار مائي (على غرار الإعصار في ويزارد من أوز). انتهى بهم الأمر بعد رحلة دامت ثمانية أيام إلى القمر. كان القمر مأهولاً بالسكان القمريين وهم في حالة حربٍ مع سكان الشمس، الذين يعيشون على الشمس. تقتتلُ المجموعتان على ملكية نجمة الصباح (كوكب الزهرة). ينتصر الشمسيون في نهاية المطاف، وذلك بوضع خسوف دائم للقمر، ويجبرون القمريين أن يوقعوا على معاهدة سلام حيث جرى الاتفاق فيها على أن نجمة الصباح تبقى أرضاً محايدة وغير محتلة.

المجـــــال المغناطيســـــي للقمـــــر

المجال المغناطيسي للقمر ضعيف جدّاً مقارنة بالمجال المغناطيسي الأرضي. الاختلاف الرئيس هو أن القمر لا يحوي حالياً على مجال مغناطيسي ثنائي القطب (الذي ينشأ بوساطة جيوديناموٍ في نواته)، بحيث تتنوع المغنطة الحالية (انظر الصورة) ويكون أصلها قشريّاً بالكامل في الموقع؛ لذلك من الصعب المقارنة

كنسـبة مئويـة مـع الأرض. ولكـن اكتشـفت إحـدى التجـارب أن الصخـور القمريـة التـي تشـكلت منـذ 1 – 2.5 بليـون سـنة قـد نشـأت في حقـل مغناطيسـي تبلـغ شـدته نحـو 5 ميكروتسـلا، مقارنـةً بحقـل الأرض الحالـي الـذي يبلـغ 50 ميكروتسـلا.



إجمالي شـدة المجال المغناطيسـي على سطح القمر كما جرى استنتاجها من تجربة مقياس انعكاس الإلكترون Lunar Prospector. إجمالي شدة المجال المغناطيسي على سطح القمر، التي جرى قياسها بواسطة المركبة الفضائية Lunar Prospector (المناطق الرمادية تتوافق مع المناطق التي لا توجد فيها بيانات). تتوافق أقوى الانحرافات المغناطيسية، على الجانب البعيد من القمر، مع حافة حوض القطب الجنوبي أيتكين - أحد أكبر البُنى الصدمية في النظام الشمسي - وتفسر على أنها بقايا معدنية للاصطدام. على العكس من ذلك، تتوافق معظم مناطق المجال المغناطيسي المنخفض مع حشوة بحار قريبة من الجانب، لا سيَّما داخل حوضي محيط العواصف Procellarum والبحر الشرقي Orientale.

وخلال برنامج أبولو، أخذت عدة قراءات لشدة المجال المغناطيسي بقراءات تتراوح من (6nT) 6 γ في موقع أبولو15- إلى الحد الأقصى (0.31μT) 313γ في موقع أبولو - 16، لاحظ أن هذه القراءات جرى تسجيلها بوحدات غاما (γ) وهي وحدة قديمة لكثافة التدفق المغناطيسي تعادل 1μT.

تقول إحدى الفرضيات إن مغناطيسات القشرة الأرضية قد اكتسبت في وقت مبكر من تاريخ القمر عندما كان الجيودينامو لا يزال يعمل. أظهر تحليل صخور القمر الممغنطة التي جلبها رُوَّاد فضاء أبولو إلى الأرض أن القمر يجب أن يكون لديه مجال مغناطيسي قوي (فوق 110μT) منذ 4.25 بليون سنة على الأقل، الذي انخفض بعد ذلك إلى مستوى 20 μT خلال فترة 3.6 – 3.1 بليون سنة.

ومع ذلك، فإن الحجم الصغير للنواة القمرية يمثل عقبة محتملة أمام تعزيز هذه الفرضية في الحالة النظرية. ومع ذلك، فإن حبيبات السيليكات المفردة ذات الشوائب المغناطيسية من صخور أبولو التي تشكلت قبل 3.9 و 3.6 و 3.3 و 3.2 بليون سنة قد ثبت أنها قادرة على تسجيل المجالات المغناطيسية القوية ولكنها لا تفعل ذلك. يدعم هذا الفرضية البديلة القائلة بأن القمر لم يكن لديه مطلقاً جيودينامو أساسي طويل الأمد، بما يتوافق مع نقص الطاقة اللازمة للحفاظ على الحقل.

من الممكن أن تتولد مجالات مغناطيسية عابرة على جرم خالٍ من الهواء مثل القمر خلال أحداث التصادم الكبيرة. على وجه الخصوص، أسفرت دراسة

صدم زجاج أبولو المرتبط بفوهة صغيرة عمرها مليوني عام عن مغناطيسية قوية يمكن مقارنتها بشدة المجال المغناطيسي للأرض. لا يمكن أن يكون هذا التمغنط قد نشأ في نواة القمر، ويتوافق مع التنبؤات من المجالات المرتبطة ببلازما الصدمة.

أدت هذه الأرصاد إلى فرضية مفادها أن التقارير السابقة عن نقاط القوة العالية للحقول القديمة من عينات أبولو تسجل صدمات، وليس الجيوديناموالأساسي. الأهم من ذلك، أن الافتقار إلى جيوديناموقمري طويل الأمد والغلاف المغناطيسي القديم كان من المفترض أن يسمح للهليوم He_3 والمياه والموارد المتقلبة الأخرى المكتسبة من الرياح الشمسية والغلاف المغناطيسي للأرض على مدى نحو 4 بلايين سنة بالتراكم في التربة القمرية.

وقد لوحظ أيضاً أن أكبر مغناطيسات القشرة الأرضية يبدو أنها تقع بالقُرْب من الأضداد Antipodes لأحواض التصادم العملاقة. وقد اقتراح أن مثل هذه الظاهرة يمكن أن تنتج عن التوسع الحر لسحابة بلازما ناتجة عن الاصطدام حول القمر في ظل وجود مجال مغناطيسي محيط.

على سبيل المثال، قامت المركبة الفضائية تشاندرايانا1- برسم خريطة للغلاف المغناطيسي الصغير عند النقطة المضادة في بحر الشدائد Crisium على الجانب البعيد من القمر، باستخدام أداة Sub-keV Atom Reflecting Analyzer SARA. يبلغ عرض الغلاف المغناطيسي الصغير 360 كيلومتراً عند السطح وتحيط به منطقة تبلغ سماكتها 300 كيلومتر من تدفق البلازما الناتج عن تدفق الرياح الشمسية حول الغلاف المغناطيسي الصغير.

يوجد أدلة متزايدة على أن الجسيمات الدقيقة لغبار القمر قد تطفو بالفعل، مقذوفة من سطح القمر عن طريق التحليق الكهروستاتيكي. وقد يصنع هذا الأمر (جوّاً ليليّاً) مؤقتاً من الغبار. قد يتجمع الغلاف الجوي لغبار القمر أيضاً بشكل رياح شفافة. نظراً للاختلافات في تراكم الشحنة القمرية، فإن الغبار العائم سوف يطير بشكل طبيعي من الجانب الليلي السلبي بشدة إلى الجانب النهاري السلبي الضعيف.

سيكون تأثير (العاصفة الترابية) أقوى عند نهاية القمر. الكثير من هذه التفاصيل لا تزال تخمينية، لكن المركبة الفضائية Lunar Prospector اكتشفت تغيرات في الجهد الليلي القمري أثناء معابر الذيل المغناطيسي، حيث قفزت من -200 فولت إلى -1000 فولت. أجري المزيد من التوصيف لهذه الظاهرة بوساطة المركبة الفضائية Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer في أواخر عام 2013.

صفيحة البلازما Plasma Sheet عبارة عن بنية ديناميكية جدّاً، في حالة حركة ثابتة، لذلك عندما يدور القمر عبر الذيل المغناطيسي، يمكن لصفيحة البلازما أن تجتاحه عدة مرات مع لقاءات تستمر في أي مكان من دقائق إلى ساعات أو حتى أيام.

الغلاف الجوي للقمر

يخلو القمر من غلاف جوي تقريباً حالياً، هناك منطقة صغيرة حول القمر فيها عدد قليل من الغازات الضعيفة، مكونة من غاز الرادون وبعض العناصر الأخرى المنبعثة من باطن القمر ومن الرياح الشمسية نفسها، تساهم الرياح الشمسية بشكل رئيس بالهيدروجين والهيليوم على سطح القمر.

قاس رُوَّاد أبولو- 17 الغلاف الجوي للقمر على وجه التحديد، ووجدوا أن الغازات الأولية الثلاثة في الغلاف الجوي للقمر هي النيون والهيليوم والهيدروجين بكميات متساوية تقريباً. كما يوجد الميثان وثاني أكسيد الكربون والأمونيا والماء بكميات أقل. اكتشف الأرغون أيضاً، ويبدو أن وفرته تتزامن مع الزلازل على القمر.

قد تتسبب الزلازل القمرية في حدوث كسور جديدة في القشرة القمرية، مما يسمح للأرغون (^{40}Ar) بالهروب من الجزء الداخلي للقمر، الذي كان ينتج سابقاً عن طريق اضمحلال البوتاسيوم (^{40}K). كل ذرة في الغلاف الجوي للقمر لها عمر بضعة أشهر فقط في المتوسط قبل أن تهرب إلى الفضاء.

ومع ذلك، فإن بعض الذرات أو الجزيئات تعلق في (الفخاخ الباردة)، أي المناطق الباردة في ظل دائم أو شبه دائم حيث تتجمد الجزيئات ومن غير المحتمل أن تصطدم بالجسيمات النشطة أو تسخن بالإشعاع. يمكن أن تبقى هذه الجزيئات عالقة في الفخاخ الباردة إلى أجل غير مسمى.

على عكس المريخ، الذي بدأ على ما يبدو بغلاف جوي مهم، فمن المحتمل أن القمر لم يكن له غلاف جوي مطلقاً في الأصل. كان مجال الجاذبية الصغير

للقمـر بشـكل شـبه مؤكـد غيـر قـادر علـى الاحتفـاظ بـأي غـلاف جـوي بعـد الاصطـدام العمـلاق الـذي تسـبب في تكويـن القمـر، ففـي وقـت الاصطـدام كانـت كل المـواد نشـطة جـدّاً وعرضـة للضيـاع في الفضـاء أو في مجـال الجاذبيـة الأكبـر علـى الأرض.

يُعتقـد أن الحـرارة الاسـتثنائية لتكويـن القمـر قـد تسـببت في التخلـص مـن جـزء مـن الأكسـجين الموجـود علـى الكوكـب. مـع عـدم وجـود غـلاف جـوي للأكسـجين وبداخلـه مسـتنفد للأكسـجين، يقلـل القمـر بدرجـة كبيـرة، ممـا يعنـي أن عـدد الـذرات المرتبطـة بالأكسـجين أقـل ممـا هـو موجـود علـى الأرض.

عندمـا يكـون الحديـد علـى الأرض مرتبطـاً بشـكل شـائع بالأكسـجين مثـل Fe_2O_3 أو FeO، غالبـاً مـا يقلـل الحديـد علـى القمـر لدرجـة أنـه مجـرد حديـد معدنـي. علمـاً أنّ الحديـد المعدنـي الموجـود علـى سـطح الأرض يتأكسـد بسـرعة ويتحـول إلـى صـدأ.

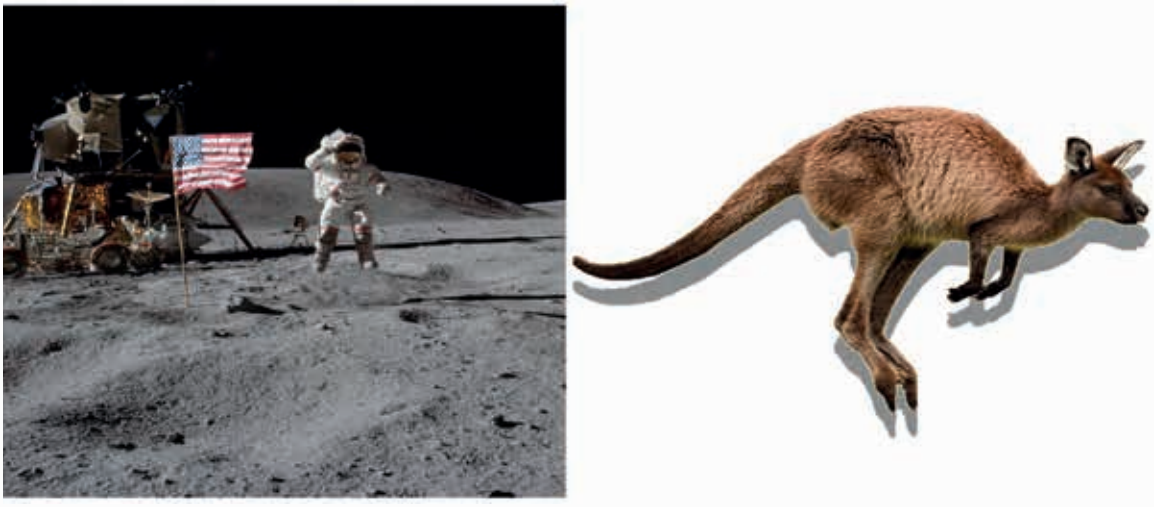
كمـا يشـير تحليـل عينـات الصهـارة القمريـة التـي اسـترجعتها بعثـات أبولـو إلـى أن البراكيـن علـى القمـر أنتجـت غلافـاً جويّـاً كثيفـاً نسـبيّاً للقمـر لمـدة 70 مليـون سـنة مـا بـين 3 و 4 بلايـين سـنة مضـت. كان هـذا الغـلاف الجـوي، الـذي حصـل عليـه مـن الغـازات المنبعثـة مـن الانفجـارات البركانيـة القمريـة، ضعـف سـمك غـلاف المريـخ في الوقـت الحاضـر. لقـد افتـرض، في الواقـع، أن هـذا الغـلاف الجـوي القـديم كان مـن الممكـن أن يدعـم الحيـاة، مـع عـدم العثـور علـى دليـل علـى الحيـاة. في النهايـة جـردت الريـاح الشمسـية الغـلاف الجـوي للقمـر القـديم وتشـتت في الفضـاء.

جاذبية القمر

جميعنا يعلم أن ذكر الكنغر يمكنه أنْ يقفز إلى أطوال وأبعاد كبيرة تصل إلى 9 أمتار وبارتفاع يصل إلى 3 أمتار، ولعل الكثير منا قد شاهد رُوَّاد الفضاء الأوائل كيف يتحركون على القمر، بالقفز مثل الكنغر.

لكن لماذا فعلوا ذلك؟

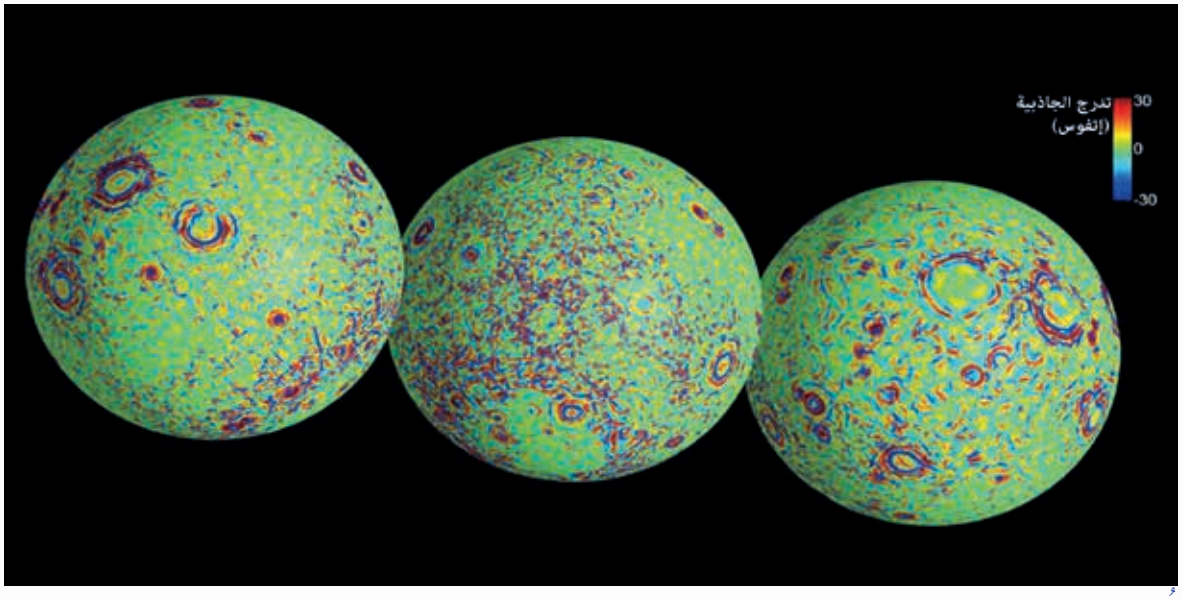
السبب هو جاذبية القمر؛ فالقمر ذو جاذبية ضعيفة لأن كتلته أقل من كتلة الأرض، ولذلك فإن جاذبيته تكون أضعف (نحو سدس جاذبية الأرض). على سطح القمر، ستكون قادراً على القفز نحو ستة أضعاف ارتفاعك على الأرض، لكنك ستعود للأسفل!



تشبه قفزة الكنغر على الأرض قفزة رائد الفضاء جون يونغ، قائد بعثة أبولو - 16، على سطح القمر وهو يحيي علم الولايات المتحدة في موقع هبوط ديكارت خلال أول نشاط لأبولو - 16 خارج المركبة.

يبلغ التسارع الناتج عن الجاذبية على سطح القمر نحو 1.625 متر / ثا^2، أي نحو 16.6 % من التسارع على سطح الأرض أو (0.166 ثابت جاذبية الأرض). ويكون التباين في تسارع الجاذبية على سطح القمر بكامله نحو 0.0253 متر/ ثا^2 (1.6 % من تسارع الجاذبية). لأن الوزن يعتمد بشكل مباشر على تسارع الجاذبية، فإن الأشياء على القمر تزن فقط سدس مما تزنه على الأرض كما ذكرنا سابقاً.

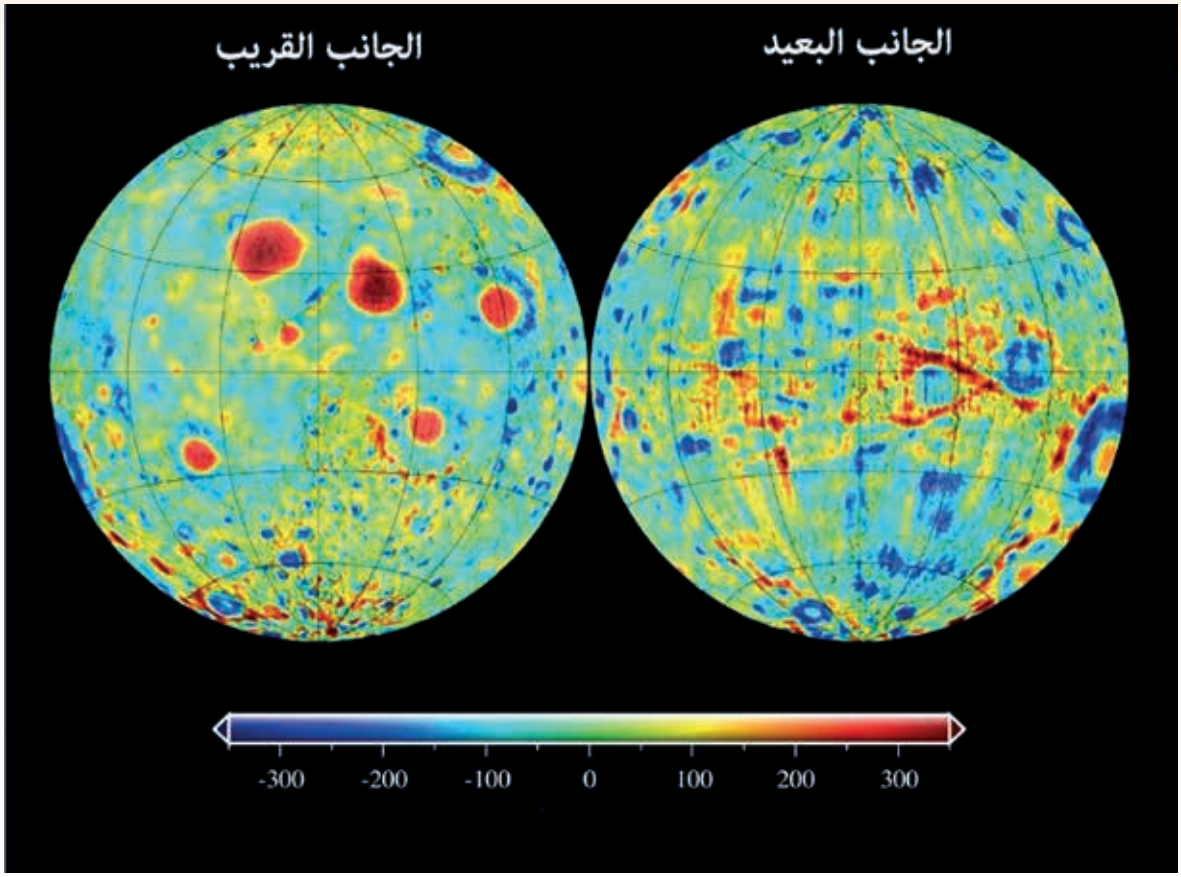
جرى قياس مجال جاذبية القمر من خلال تتبع الإشارات الراديوية المنبعثة من المركبات الفضائية التي تدور في مدارات. يعتمد المبدأ المستخدم على تأثير دوبلر، حيث يمكن قياس تسارع المركبة الفضائية على خط البصر من خلال التحولات الصغيرة في تردد الإشارة الراديوية، وقياس المسافة من المركبة الفضائية إلى المحطة الأرضية. ونظراً لأن مجال جاذبية القمر يؤثر في مدار المركبة الفضائية، فيمكن للمرء استخدام بيانات التتبع هذه لاكتشاف شذوذات الجاذبية.



تُظهر هذه الخرائط للجانبين القريب والبعيد من القمر تدرجات الجاذبية كما جرى قياسها بواسطة بعثة ناسا غريل GRAIL. تشير المناطق الحمراء والزرقاء إلى تدرجات أقوى بسبب الشذوذات الكتلية الكامنة.

معظم المدارات القمرية المنخفضة غير مستقرة. وقد أظهرت البيانات المفصلة التي جُمعت أنه بالنسبة للمدار القمري المنخفض، فإن المدارات المستقرة الوحيدة تكون عند ميول قريبة من 27 درجة، و 50 درجة، و 76 درجة، و 86 درجة. بسبب الدوران المتزامن للقمر، ليس من الممكن تتبع المركبات الفضائية من الأرض بعيداً عن أطراف القمر، لذلك حتى بعثة استعادة الجاذبية والمختبر الداخلي (غريل GRAIL) لم يكن حقل الجاذبية البعيد مخططاً جيداً.

السمة الرئيسة لحقل الجاذبية للقمر هي وجود الماسكونات Mascons (تركيزات الكتلة)، وهي شذوذات كبيرة في الجاذبية الإيجابية مرتبطة ببعض أحواض التصادم العملاقة. تؤثر هذه الحالات الشاذة بشكل كبير في مدار المركبات الفضائية حول القمر، ومن الضروري وجود نموذج دقيق للجاذبية في التخطيط لكل من البعثات المأهولة وغير المأهولة. اكتشفت الماسكونات في البداية من خلال تحليل بيانات التتبع Lunar Orbiter وأظهرت اختبارات الملاحة قبل برنامج أبولو أخطاء تحديد المواقع أكبر بكثير من مواصفات البعثة.



شذوذات الجاذبية الشعاعية على سطح القمر بوحدة (ميكروغال mGal).

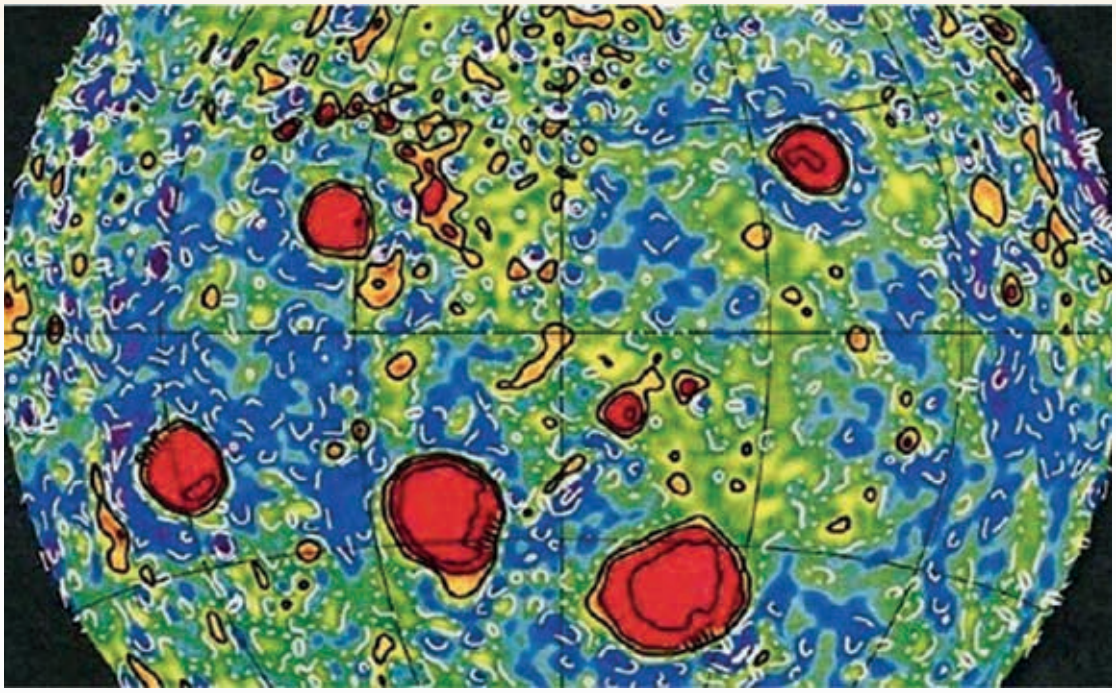
ترجع الماسكونات جزئيّاً إلى وجود تدفقات الحمم البازلتية الكثيفة التي تملأ بعض أحواض التصادم. ومع ذلك، لا يمكن لتدفقات الحمم البركانية في حد ذاتها أن تفسر بشكل كامل الاختلافات في الجاذبية، كما أن رفع السطح البيني القشري مطلوب أيضاً. استناداً إلى نماذج الجاذبية Lunar Prospector، فقد اقترح وجود بعض الماسكونات التي لا تظهر دليلاً على البراكين البازلتية البحرية.

الامتداد الضخم للبراكين البازلتية البحرية المرتبطة بمحيط العواصف Oceanus Procellarum لا يسبب شذوذاً إيجابيّاً في الجاذبية. لا يتطابق مركز جاذبية القمر تماماً مع مركزه الهندسي، ولكنه ينزاح نحو الأرض بنحو 2 كيلومتر.

ثابت الجاذبية G أقل دقة من ناتج G وكتل الأرض والقمر. وبالتالي، من المعتاد التعبير عن الكتلة القمرية M مضروبة في ثابت الجاذبية G القمري $GM = 4902.8001\ km^3 / s^2$ وفقاً لتحليلات GRAIL.

كتلة القمر = 7.3458×10^{22} كيلو غرام ومتوسط الكثافة 3346 كيلو غرام / م^3.

اكتشف بول مولر ووليام سجوجرن من مختبر الدفع النفاث التابع لناسا هذه الماسكونات في عام 1968. ولو كان القمر مرناً، فإن هذه الماسكونات كانت ستغرق حتى يعود حقل الجاذبية إلى التوازن. ولكن حقيقة استمرارها اليوم تشير إلى أن القمر بارد جامد.



عثر على الماسكونات في بحار الشدائد Crisium والرحيق Nectaris والصفاء Serenitatis والزخات Imbrium على الجانب القريب من القمر.

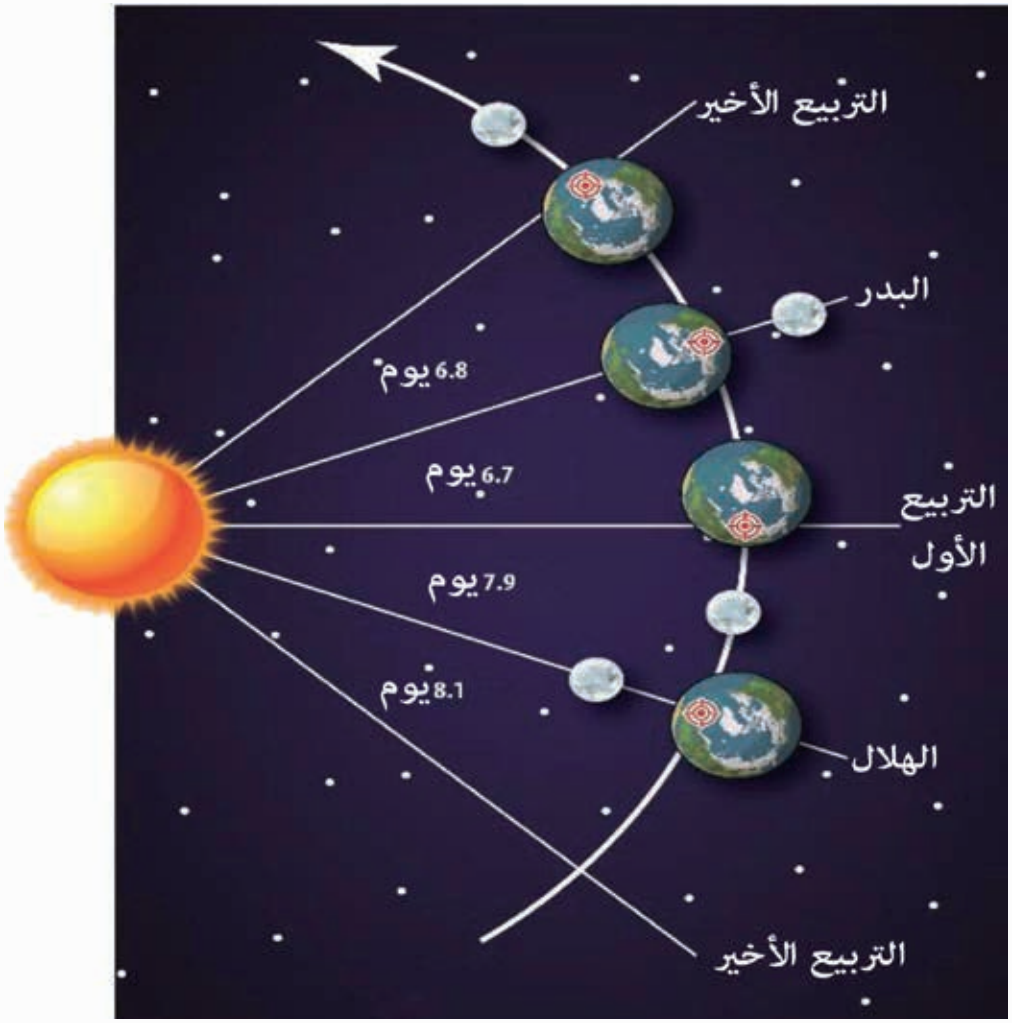
حالياً دعونا نعود لسؤالٍ قديم طرحه الفيزيائي البريطاني إسحاق نيوتن عندما كان جالساً تحت شجرة التفاح وقال: لماذا تسقط التفاحة على الأرض ولا يسقط القمر؟

بغض النظر عن أن هذا السؤال قد أوصله إلى قانون الجاذبية العالمية، فإن القمر لن يسقط على الأرض كما صوره فلم الخيال العلمي (سقوط القمر Moonfall) حتى لو كان يسبح بمفرده في الفضاء.

سأخبركم لماذا؛ لأنه يوجد نقطة توازن بين الأرض والقمر، وتسمى مركز الأبعاد المتناسبة Barycentre والجرمان يدوران حولها. وهذه النقطة أقرب إلى

الأرض من القمر داخل سطح الأرض. الأمر يشبه إلى حد ما أرجوحة التوازن Seesaw. إذا كان لديك شخص ثقيل فعلاً من جهة وآخر خفيف الوزن من جهة أخرى، فيجب أن تكون نقطة التوازن أكثر تجاه الشخص الأكبر وزناً.

إذاً كونوا مطمئنين ولا داعي للقلق، وسيبقى فلم (سقوط القمر) مجرد خيال علمي.

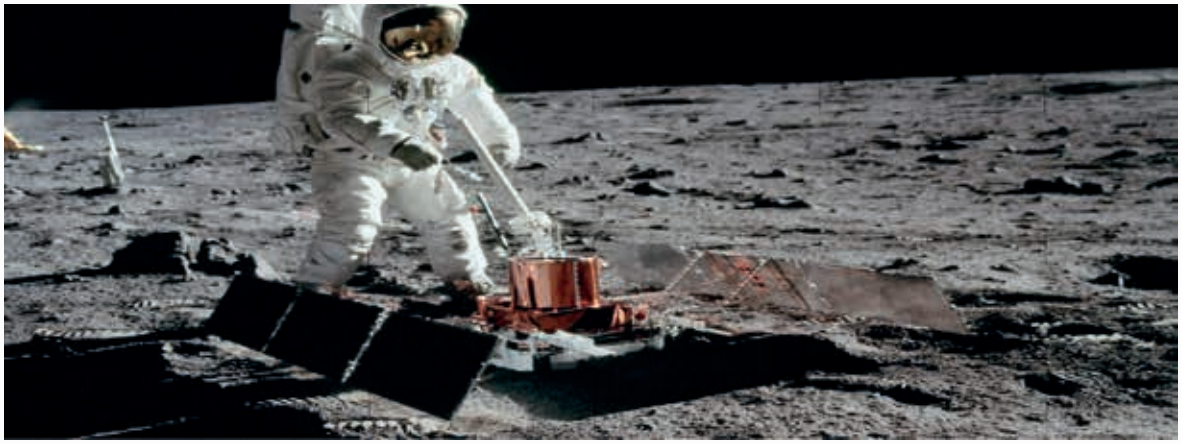


يدور كلٌّ من الأرض والقمر حول مركز ثقل مشترك للكتلة يُعرف باسم (مركز الأبعاد المتناسبة).

الـــــــزلازل القمـــريـــــة

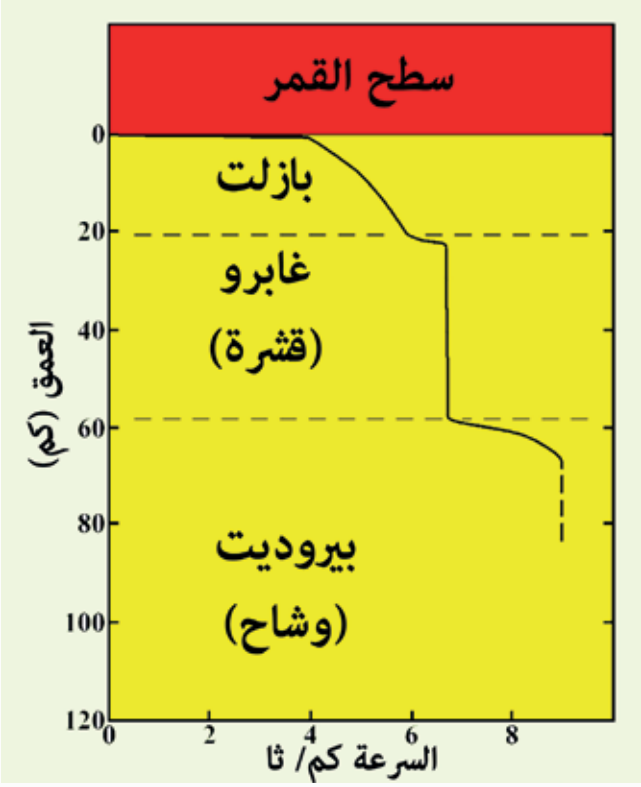
ظهرت في عام 1835 سلسلة مكونة من ستة مقالات يومية، ونشرت بين 25 و31 أغسطس تحت عنوان (الاكتشافات الفلكية الكبرى) ونُسبت إلى الفلكي جون هرشل. لكن من كتبها هو مراسل جريدة نيويورك ريتشارد آدم لوك بهدف زيادة توزيع الجريدة، وكان في الوقت ذاته يسخر من المراقبين الآخرين في العصر الفكتوري الأكثر جدية الذين ألمحوا إلى وجود دليل لديهم يقترح أن القمر كان مسكوناً «بالقمريين». وقد أطلق على هذه «الاكتشافات» حالياً اسم (خدعة القمر الكبرى).

بالعودة إلى الواقع العلمي الحقيقي؛ فقد كشفت مقاييس الزلازل التي تركها رُوَّاد فضاء أبولو على سطح القمر أن القمر يعاني فعلاً من زلازل على سطحه. الزلازل القمرية Moonquakes العميقة، التي تحدث على نطاق واسع على بُعْد نحو 700 كيلومتر تحت سطح القمر هي أحداث مدية ناتجة عن سحب الجاذبية الأرضية وشد البُنى الداخلية للقمر.



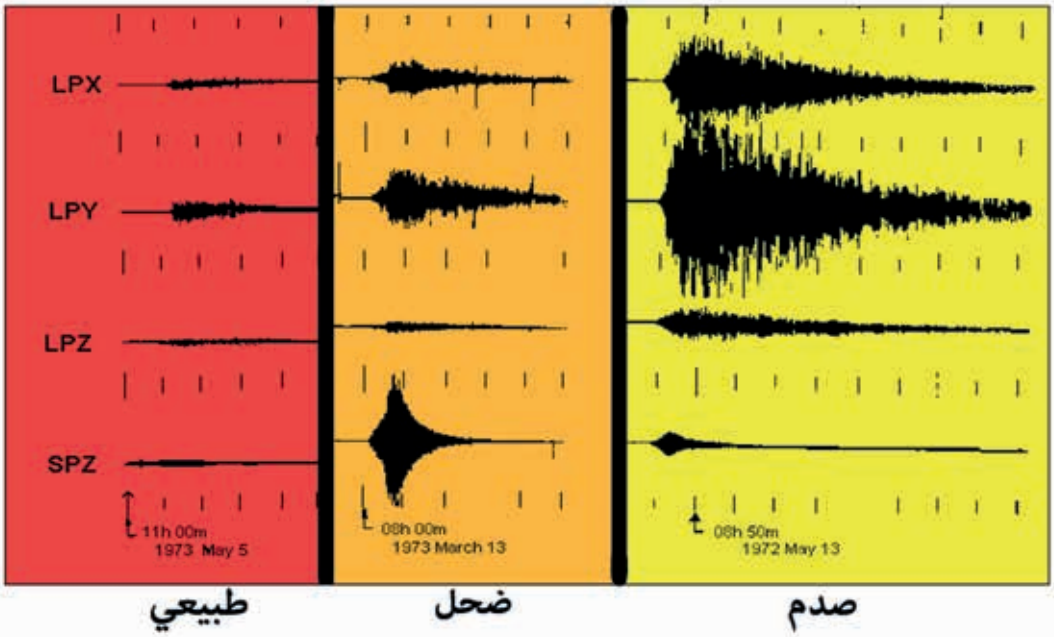
رائد فضاء أبولو – 11 باز ألدرين في التجربة الزلزالية. انتشرت الألواح الشمسية على اليسار واليمين، وجرى توجيه الهوائي نحو الأرض. يقع عاكس الليزر خلف الهوائي، وفي المسافة، تظهر كاميرا التلفزيون بظلالها على السماء السوداء. توجد كاميرا التقريب الاستريو بالقُرْب من الحافة اليمنى لهذه التفاصيل.

يمكن أن تحدث الزلازل القمرية التي تنشأ على السطح أو بالقُرْب منه بسبب صدمات النيازك على القمر. يمكن أن يأتي نوع آخر من الزلازل القمرية الضحلة جدّاً من التمدد الحراري وانكماش الصخور على السطح أو بالقُرْب منه حيث ينتقل من ليلة القمر شديدة البرودة إلى نهار القمر شديد الحرارة. نوع رابع من الزلازل القمرية ينشأ على أعماق ضحلة قليلاً تتراوح بين 20 و 30 كيلو متراً، ويمكن أن تصل إلى 5.5 درجة على مقياس ريختر، ويمكن أن يستمر لأكثر من 10 دقائق! لا تزال أسباب هذا النوع الرابع من الزلازل قيد التحقيق.



منحنى يوضح سرعة الموجات الزلزالية P إلى عمق نحو 100 كيلومتر تحت سطح القمر في شرق محيط العواصف Oceanus Procellarum . تُعزى الزيادات في السرعة عند نحو 20 و 60 كيلومتراً إلى التحولات من البازلت البحري إلى الغابرو الأنورثوسيتي عند 20 كيلومتراً ومن الغابرو إلى البريدوتيت (الزبرجد الزيتوني والبيروكسين) عند 60 كيلومترا. تحدث طبقة البازلت فقط في مناطق البحار وهي غير موجودة في المرتفعات.

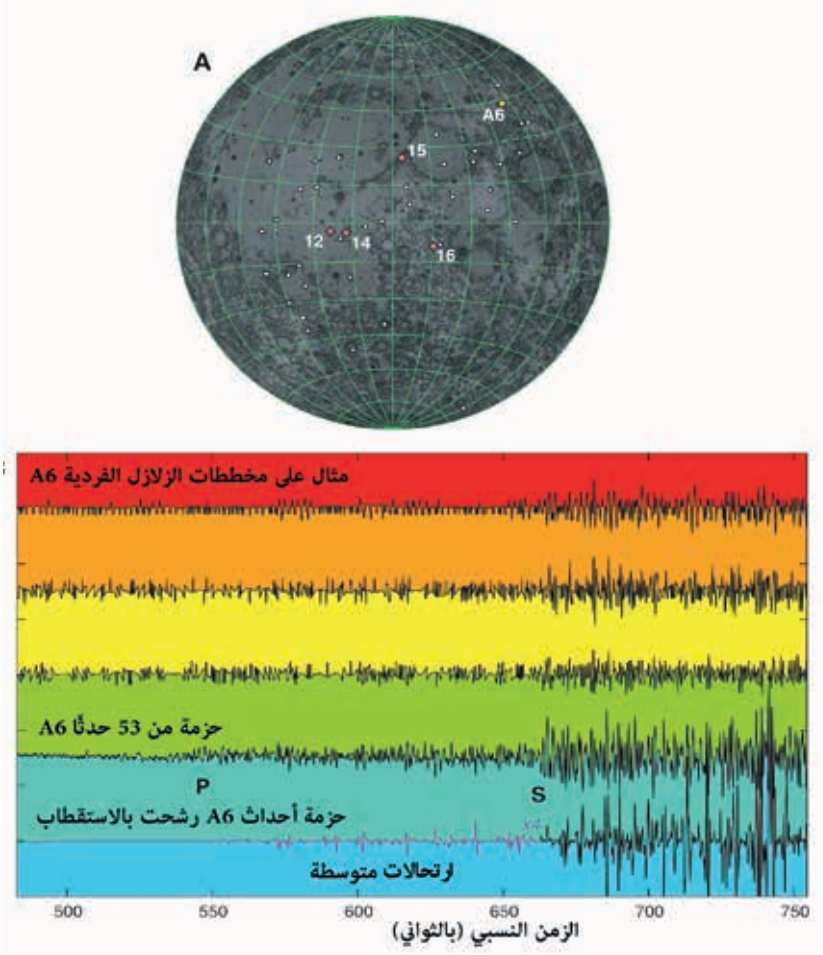
كما كُشف عن عدد قليل من الزلازل القمرية الضحلة التي تقع على بُعْد نحو 100 كيلومتر تحت السطح، ولكنها تحدث بشكل غير متكرر ويبدو أنه لا علاقة لها بالمد والجزر على سطح القمر.



يوجد على القمر ثلاثة مصادر للزلازل (كما سجلتها محطات بعثات أبولو): إما ناجمة عن صدم النيازك وهي أعنفها، أو ضحلة، أو طبيعية.

يمكن أن تحدث الزلازل الضحلة بسبب صدم النيازك على القمر. يمكن أن يأتي نوع آخر من الزلازل الضحلة جدّاً من التمدد الحراري وانكماش الصخور على السطح أو بالقُرْب منه حيث يخضع لتغيرات شديدة في درجات الحرارة.

أما الـزلازل القمريـة العميقـة، التـي تحـدث علـى نطـاق واسـع علـى بُعْـد نحـو (700 كيلومتـر) تحـت سـطح القمـر هـي أحـداث مديـة ناتجـة عـن سـحب الجاذبيـة الأرضيـة وتمديـد البُنـى الداخليـة للقمـر.



(A) خريطة للقمر القريب توضح مواقع محطات أبولو الزلزالية (الماس الأحمر) وتوزيع بؤر الزلازل العميقة المستخدمة في هذه الدراسة (الدوائر البيضاء).

(B) مخططات الزلازل المكونة من R للمحطة 15 من ثلاثة أحداث A6 (أعلى ثلاثة آثار)، مقارنة بمجمّع الأحداث A6 على المكون R للمحطة 15 (الرابع من الأعلى)، ومجمّع الأحداث نفسه بعد ترشيح الاستقطاب (الأسفل).

لقد أفرد العلماء اليوم للزلازل القمرية علماً قائماً بحد ذاته أطلقوا عليه اسم (علم الزلازل القمري) Lunar seismology وهو دراسة الحركات الأرضية للقمر والأحداث التي تثيرها، وعادة ما تكون الصدمات أو الزلازل القمرية.

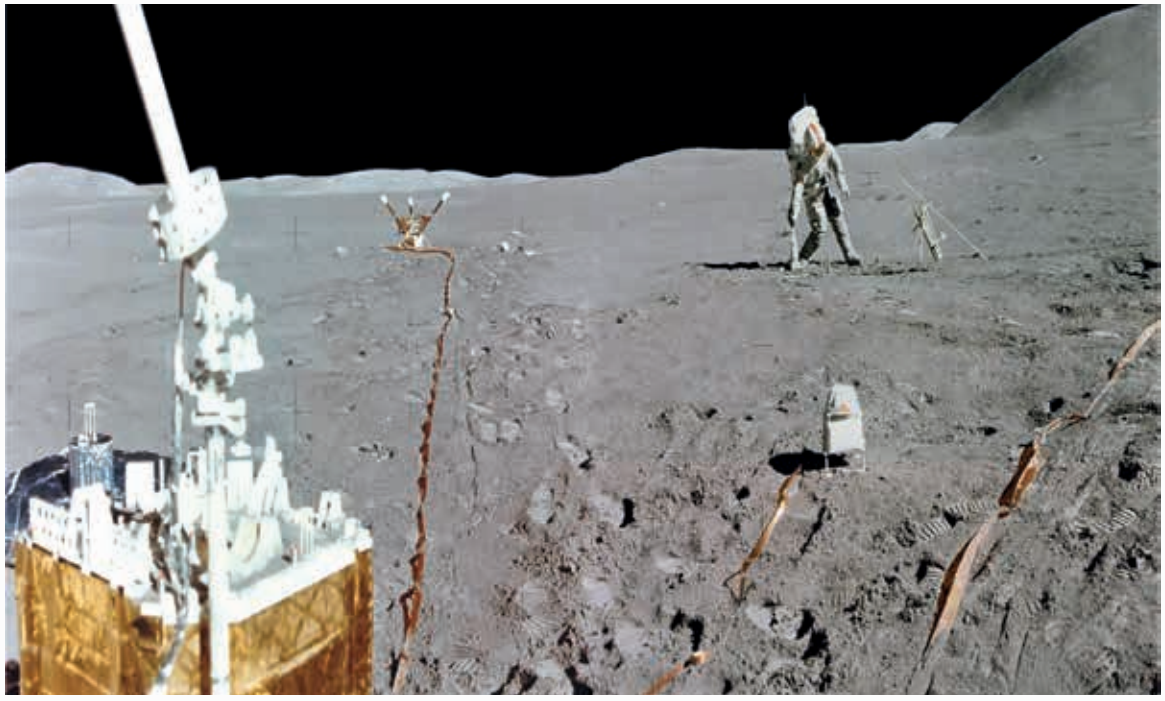
وقد كان أحد الاكتشافات الرئيسة للزلازل القمرية هو الفهم المحسن لتركيب باطن القمر العميق، بما في ذلك وجود نواة داخلية صلبة وحدود حادة من نواة الوشاح وطبقة منصهرة جزئيّاً في قاعدة الوشاح القمري.

لقد أجريت تجارب الانكسار الزلزالي بنجاح على القمر بواسطة رُوَّاد فضاء أبولو خلال البعثات 14 و 16 و 17 كجزء من مجموعة متكاملة من التجارب الجيوفيزيائية تدعى ALSEP (وتعني حزمة تجارب أبولو على سطح القمر). وقد كان الهدف الرئيس من تجارب الانكسار الزلزالي القمري هو تحديد الخصائص المرنة بالقُرْب من سطح القمر. تم تناول العديد من الأسئلة المحددة. ما عمق الطبقة المجزأة، الثرى القمري، التي تغطي معظم سطح القمر؟ ما تركيب الثرى (هل هو متعدد الطبقات؟ هل هو متجانس جانبيّاً؟). كيف تزداد السرعة الزلزالية مع زيادة العمق في أعلى 5 كيلو مترات من القمر - بشكل سلس أم متدرج؟

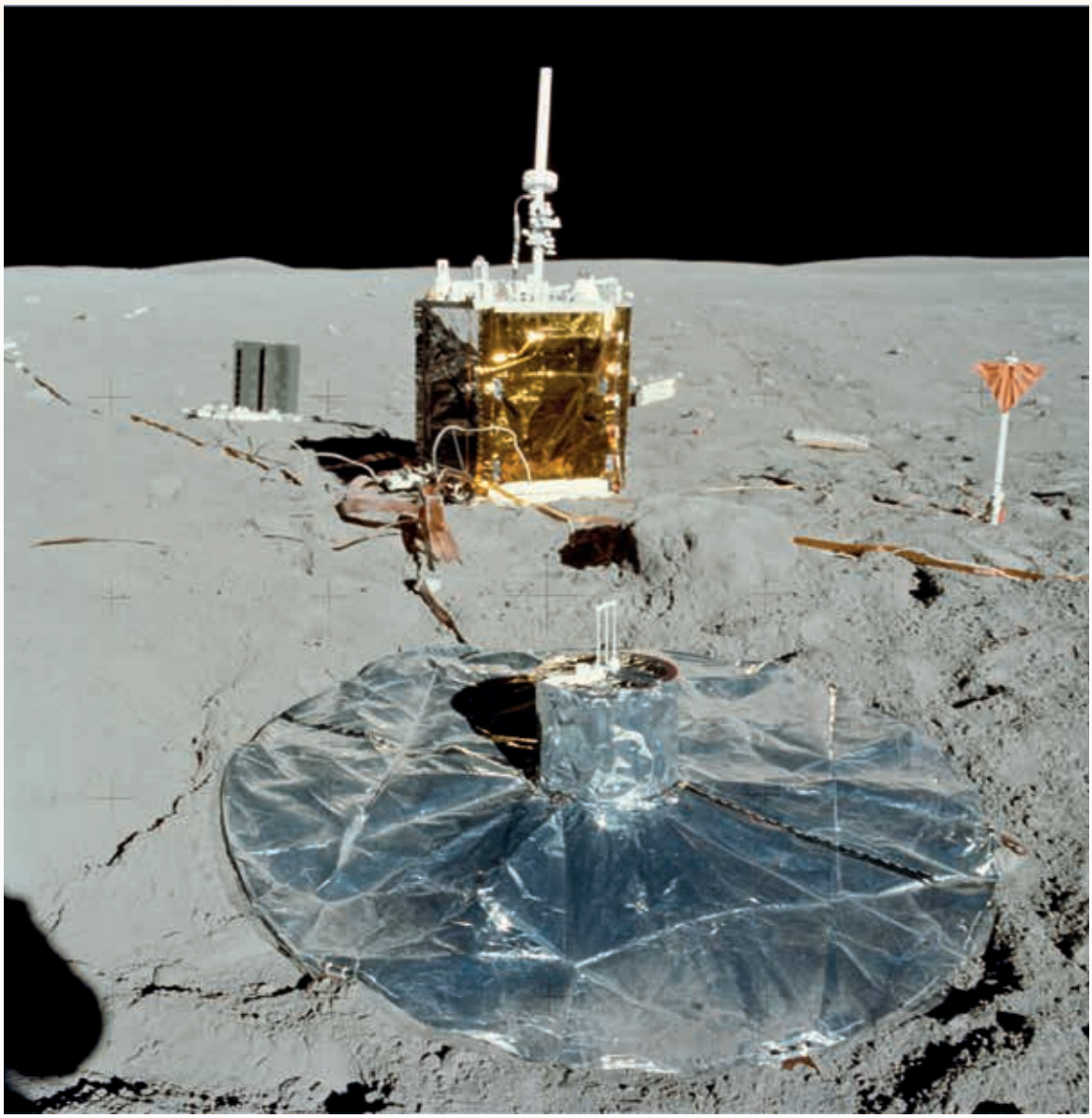
يمكن تلخيص الاستنتاجات الرئيسة من التجارب الزلزالية النشطة على القمر على النحو الآتي: استنتج أن السرعات الزلزالية البالغة 104 و 108 و 92 و 114 و 100 متر / ثا للثرى القمري في مواقع هبوط أبولو 12 و 14 و 15 و 16 و 17، على التوالي. وتشير هذه البيانات إلى أن عملية التفتيت والتفكك بواسطة

صدمات النيازك قد أنتجت طبقة ذات خصائص زلزالية موحدة بشكل ملحوظ على مستوى القمر. يعتبر التكسير والمسامية العالية من الأسباب المحتملة للسرعات المنخفضة جدّاً التي لوحظت في الثرى القمري.

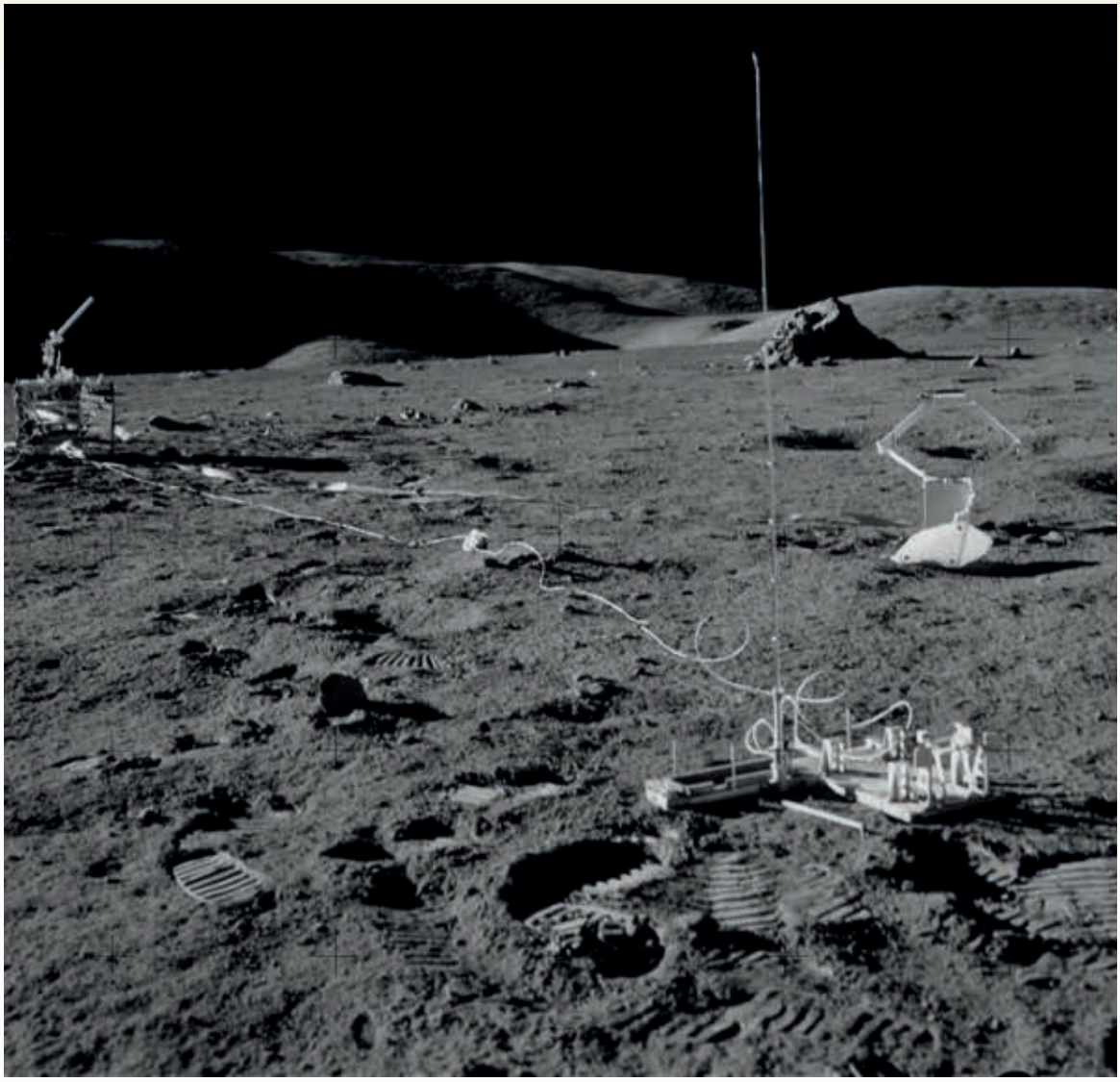
كشفت البيانات الزلزالية لأبولو- 17 أن السرعة الزلزالية تزداد بسرعة كبيرة مع زيادة العمق في السطح القريب من القمر إلى 4.7 كيلو متر/ ثانية على عمق 1.4 كيلو متر. لا تتوافق هذه البيانات مع فكرة أن مسحوق الصخور الباردة يمتد إلى عمق كيلومتر واحد أو نحو ذلك في القمر. يتغير القدر الملحوظ لهذه السرعة مع العمق وتدرج عمق السرعة الحاد الضمني بمقدار أكبر من 2 كيلو متر/ ثانية، وهو كم أكبر بكثير مما لوحظ في التجارب المعملية على المواد الحبيبية. مثل هذا التغيير الكبير في السرعة يوحي أكثر بالتغيرات التركيبية، وبالنظر إلى الملاحظات الجيولوجية يتوافق هذا مع نموذج التدفقات البازلتية المتصدعة التي تعلو البريشيا المفترضة التي يُفترض أنها تشكل المرتفعات القمرية. كما رُصدت الزلازل القمرية «الحرارية» في موقع أبولو - 17، وصارت متكررة بشكل متزايد بعد شروق الشمس ووصلت إلى الحد الأقصى عند غروب الشمس. تبقى آلية مصدر هذه الزلازل لغزاً، لكن انزلاق الأرضية القمرية يمكن أن يكون المانع من تدهور كامل لجميع المنحدرات القمرية.



تُظهر الصورة محطة ALSEP المركزية في المقدمة التي وضعتها بعثة أبولو- 15، والتجربة الزلزالية السلبية خلف الجانب الأيسر، ومقياس المغناطيسية على سطح القمر في الخلفية بالقُرْب من المركز. يميل قائد البعثة ديفيد سكوت إلى يمينه، ويقوم بإدخال مثقاب أبولو للسطح القمري المستخدم لأخذ العينات الأساسية وإعداد تجربة تدفق الحرارة. مطياف الرياح الشمسية في المقدمة اليمنى.



وضعت محطة أبولو – 16 الزلزالية السلبية (PSE) على سطح القمر بواسطة بعثة أبولو – 16 كجزء من حزمة أبولو لتجارب سطح القمر (ALSEP). وقد صممت هذه المحطة لاكتشاف الاهتزازات وإمالة سطح القمر وقياس التغيرات في الجاذبية في موقع الجهاز.



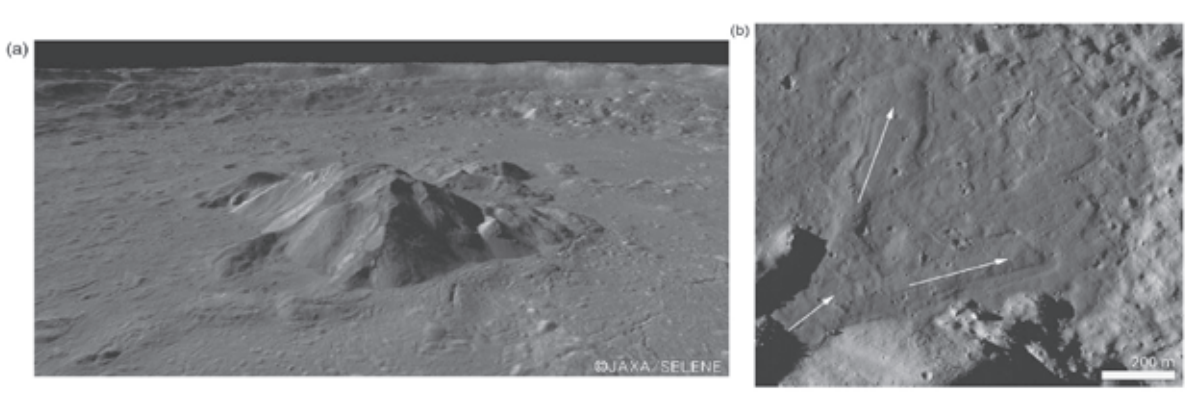
بالنسبة لأبولو – 17 أجريت تجربة التنميط القمري الزلزالي (LSPE) باستخدام الجيوفون في المحطة المبينة في الصورة، لاكتشاف النشاط الزلزالي القريب. وقد زودت المحطة بهوائي لإرسال البيانات للأرض. كما استخدم جهاز LSPE للكشف عن المتفجرات التي سيجري تفجيرها بواسطة الأوامر الأرضية بمجرد مغادرة رُوَّاد الفضاء للقمر.

البراكين القمرية

استمرت ادعاءات الحياة على القمر حتى وصول السابر الروسي في ستينات القرن العشرين. وبينما كان العلماء متفقين على أن القمر لا يستطيع دعم حياة الحيوانات الكبيرة، ادعى البروفسور وليم بكرينغ، وهو عالم فلك كان يحظى باحترام في عصره، أنه رأى دليلاً على وجود أسرابٍ كبيرة من الحشرات التي تعج وتضج على سطح القمر. وقد رصد بين سنتي 1919 و1924 من مرصده الشخصي في ماندفيل في جامايكا، بقع متفاوتة في الحجم على سطح القمر. نسب في البداية هذه البقع إلى الثلج والجليد وفيما بعد إلى الغطاء النباتي، وذكر بعد ذلك أن «البقع» غيرت من موقعها، وأن «المسافة المعنية حوالي عشرين ميلاً، وأنها تمت في اثني عشر يوماً.. حيث كما رأينا ينطوي ذلك على حيوانات صغيرة». نشرت هذه الأرصاد عن «الحشرات القمرية» بشكل واسع، ونظراً لمكانة البروفسور بكرينغ كفلكي محترم، لم يأخذ أحد هذه التقارير على محمل الجد أو فكر بدحض أرصاده المفصلة. تمت تسمية فوهة باسم البروفسور بكرينغ على سطح القمر. فكرة وجود حياة معقدة مثل الحشرات يمكن إيجادها على القمر لم تعد مقبولة بحلول ستينات القرن العشرين، إنما الحياة على سطح القمر لا زالت ممكنة، وتم تصور أن البقع مثلت نباتاً بسيطاً أو كائنات حية مجهرية توسعت وتلاءمت مع أقصى درجتي حرارة للقمر.

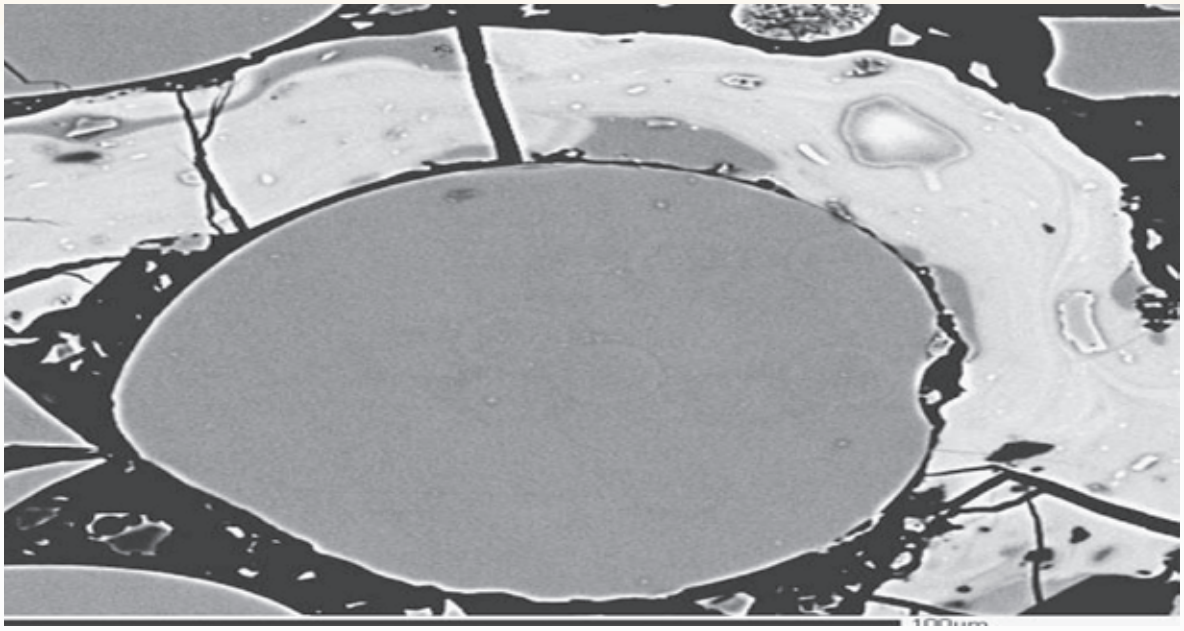
تتمثل ظاهرة البركنة Volcanism على القمر في وجود البراكين ورواسب الحمم البركانية وسهول الحمم البركانية الشاسعة على سطح القمر. عادة ما تكون البراكين على شكل قباب وأقماع صغيرة تشكل مجمعات بركانية كبيرة

وصـروح معزولـة. الكالديـرات Calderas أو البحيـرات البركانيـة، معالـم الانهيـار واسـعة النطـاق التـي تشـكلت بشـكل عـام في وقـت متأخـر مـن حلقـة ثـوران بركانـي، نـادرة بشـكل اسـتثنائي علـى القمـر.



(a) منظر للقمة المركزية لتيخو صورتها المركبة المدارية اليابانية كاغويا. وهي فوهة بركان صغيرة جدّاً ذات أشعة ساطعة في نصف الكرة الجنوبي القريب من الجانب ويبلغ قطرها 85 كم. (b) صورة عالية الدقة من كاميرا الاستطلاع المداري القمرية تُظهر الرواسب الذائبة على أرضية تيخو واتجاه الحركة أثناء انزلاق الذوبان في مكانه.

ترسبات الحمم البركانية القمرية هي نتيجة ثوران نافورة الحمم البركانية من الصهارة البازلتية المتطايرة التي تصعد بسرعة من مصادر الوشاح العميقة وتنتشر كرذاذ من الصهارة، مكونة حبات زجاجية صغيرة. ومع ذلك، يُعتقد أيضاً أن رواسب الحمم البركانية التي تكونت عن طريق الانفجارات المتفجرة غير البازلتية الأقل شيوعاً موجودة على سطح القمر. تغطي سهول الحمم القمرية مساحات شاسعة من سطح القمر وتتكون أساسًا من تدفقات بازلتية ضخمة. تحوي على عدد من المعالم البركانية المتعلقة بتبريد الحمم البركانية، بما في ذلك أنابيب الحمم البركانية Lava Tubes، والأخاديد القمرية Rilles والتلال المتجعدة Wrinkle Ridges.



الخرزات الداكنة عبارة عن زجاج بركاني من عينة تربة أبولو- 15 القمرية، حيث تغطى الحبة المركزية بواسطة التراص، وهو مزيج من مكونات التربة الذائبة الناتجة عن الحرارة من الخرزة عند هبوطها، أو ربما بسبب تأثير صغير منفصل.

لقد كان القمر نشطاً بركانيّاً معظم تاريخه، حيث حدثت أولى الانفجارات البركانية منذ نحو 4.2 بليون سنة. كان النشاط البركاني أكثر شدةً بين 3.8 و 3 بلايين سنة، وخلال هذه الفترة تشكلت الكثير من سهول الحمم القمرية. كان يُعتقد في الأصل أن هذا النشاط قد تلاشى منذ نحو بليون عام، ولكن تشير الأدلة الحديثة إلى أن البراكين على نطاق أصغر ربما حدثت في الخمسين مليون سنة الماضية. حالياً لا يحوي القمر على براكين نشطة مع وجود كميةٍ كبيرةٍ من الصهارة تحت سطح القمر.

بعـد تشـكل الحفـرة الناتجـة عـن الصـدم، تعـد البراكـين هـي العمليـة الأكثـر انتشـاراً التـي أدت إلـى تعديـل القشـرة القمريـة. جـرى الحفـاظ علـى الكثيـر مـن هـذا التعديـل بسـبب عـدم وجـود الصفائـح التكتونيـة علـى القمـر، كمـا أنّ سـطح القمـر قـد تغيـر بشـكل طفيـف طـوال التاريـخ الجيولوجـي للقمـر. اقتصـرت البراكين القمريـة في الغالـب علـى الجانـب القريـب مـن القمـر حيـث تعتبـر سـهول الحمـم البازلتيـة هـي السـمة البركانيـة المهيمنـة. في المقابـل، لا تمثـل المعالـم الطبوغرافيـة البركانيـة، مثـل: القبـاب والأقمـاع والـدروع سـوى جـزء ضئيـل مـن السـجل البركانـي القمـري. لقـد عثـر علـى البراكـين وسـهول الحمـم البركانيـة علـى جانبـي القمـر.

• سـهول الحمـم البركانيـة

البحار القمرية هي سهول بازلتية كبيرة تغطي أكثر من 15 % من سطح القمر. إنها أكثر المعالم البركانية وضوحاً على القمر، وتظهر على شكل معالم طبوغرافية داكنة عند رؤيتها بالعين المجردة. يميل الكثير منها إلى تغطية أرضيات أحواض التصادم الكبيرة، وبالتالي فهي عادة ما تكون دائرية في الخطوط العريضة، مع بعض البحار الأصغر التي تملأ قيعان الحفر الناتجة عن الاصطدام.

يتـراوح قطـر البحـار القمريـة الرئيسـية بـين أكثـر مـن 200 كيلومتـر و 1400 كيلومتـر ولا يتفـوق عليهـا إلا المحيـط الأكبـر حجمـاً (محيـط العواصـف)، الـذي يبلـغ قطـره نحـو 2590 كيلومتـراً. يتـراوح سـمكها عـادةً بـين 500 و 1500 متـر، مـع تدفقـات حمـم فرديـة تتـراوح بـين 10 و 20 متـراً سـمكا. يشـير هـذا إلـى أن كل بحـر هـو نتـاج العديـد مـن الأحـداث البركانيـة المتداخلـة.

حُدّدت أعمار البحار البازلتية عن طريق التأريخ الإشعاعي المباشر وتقنية عد الحفر. تتراوح أعمار القياسات الإشعاعية بين 3.16 و 4.2 بليون سنة، في حين أن الأعمار الأصغر التي جرى تحديدها من خلال تعداد الحفر هي نحو 1.2 بليون سنة. ومع ذلك، يبدو أن غالبية البحار البازلتية قد نشطت منذ نحو 3 إلى 3.5 بليون سنة.

الانفجارات البازلتية القليلة التي حدثت على الجانب البعيد من القمر قديمة، في حين عُثر على التدفقات الأصغر داخل محيط العواصف على الجانب القريب. وبينما العديد من البازلت إما اندلع داخل أو تدفق إلى أحواض منخفضة الصدم، فإن أكبر امتداد للوحدات البركانية هو محيط العواصف، لا يتوافق مع أي حوض صدمٍ معروف.

لا يزال سبب وجود البحر البازلتي في الغالب في نصف الكرة القريب من القمر موضع نقاش من قبل المجتمع العلمي. استناداً إلى البيانات التي جرى الحصول عليها من بعثة Lunar Prospector، يبدو أن نسبةً كبيرة من مخزون القمر من العناصر المنتجة للحرارة (في شكل KREEP) يقع داخل مناطق محيط العواصف وحوض الزخات، وهي مقاطعة جيوكيميائية فريدة يشار إليها حالياً بالاسم (PKT).

في حين أن التحسين في إنتاج الحرارة داخل (PKT) يرتبط بالتأكيد بطول العمر وشدة البراكين الموجودة هناك، إلا أنه لم يتفق على الآلية التي جرى من خلالها تركيز KREEP داخل هذه المنطقة.

القبـــــــــاب القمريـــــــة

يوجد عدد من القباب القمرية Lunar Domes والأقماع على سطح القمر، ولكن من المحتمل أن تكون هذه المعالم مختلفة عن تلك الموجودة على الأرض. نظراً لأن الجاذبية على القمر لا تزيد على سدس الجاذبية الموجودة على الأرض، فإن البراكين القمرية قادرة على إلقاء المزيد من المقذوفات، مما يترك القليل ليتراكم بالقُرْب من الفتحة. بدلاً من تشكل المخروط البركاني، يجب أن تشكل هذه الانفجارات القمرية طبقة واسعة ورقيقة حول الفتحة. على الأرض، تتكون قباب الحمم البركانية من الحمم السميكة جدّاً. الحمم البازلتية أكثر سيولة وتميل إلى تكوين تدفقات حمم بركانية واسعة ومسطحة. على سطح القمر، يبدو أن معظم القباب والأقماع مصنوعة من البازلت. نتيجةً لذلك، من غير المحتمل أن تكون قد تشكلت مثل قباب الأرض من الحمم السميكة غير البازلتية. بدلاً من ذلك، قد تشير القباب والأقماع القمرية إلى الأماكن التي كانت فيها البازلت المنفجرة بالكاد منصهرة.

نادراً ما توجد قباب القمر معزولةً. بدلاً من ذلك، تتشكل بشكل أكثر شيوعاً في مجموعات في جميع أنحاء سهول الحمم القمرية. من الأمثلة البارزة تلال ماريوس، وهي واحدة من أكبر المجمعات البركانية على القمر. وهي تتكون من عدة أقماع وقباب تحتل قمة تضخم طوبوغرافي عريض، الذي قد يكون مكافئاً للبركان الدرعي على سطح القمر. يرتفع المجمع من 100 إلى 200 متر من السهول المحيطة ويشكل على مساحة قدرها 35000 كيلومتر مربع هضبة من الحمم البركانية. جرى تحديد ما مجموعه 59 مخروطاً و 262 قبة يتراوح قطرها بين 2 و 25 كيلومتراً.

جبل رومكر هو مجمع أصغر يشبه في مظهره تلال ماريوس. وهي تتألف من هضبة تبلغ مساحتها نحو 2000 كيلومتر مربع وترتفع 200 إلى 1300 متر فوق السطح المحيط. تم تحديد ثلاث وحدات بازلتية رئيسية تتراوح أعمارها بين 3.51 و 3.71 بليون سنة في جبل رومكر، مع أن أصغر المعالم البركانية قد تكون قباباً شديدة الانحدار على سطح الهضبة. يوجد أكثر من 20 قبة فوق الهضبة وهي أبرز التضاريس البركانية لجبل رومكر.

يوجد معلم يشبه المخروط البركاني، يُسمّى القبة الشرقية، بالقُرْب من حافة كالديرا الشرقية. لديها اتجاه أكثر أو أقل بين الشمال والجنوب، بطول 12 كيلومتراً وعرض 7 كيلومترات. وإلى الشمال مباشرة من كالديرا يوجد معلم يسمى القبة الصغيرة Little Dome، يبلغ قطرها 500 متر. وإلى الشمال توجد قبة مستطيلة، موجهة نحو الشمال والجنوب، تسمى القبة الوسطى. يبلغ طولها 2.5 كيلومتر وعرضها 0.6 كيلومتر. تحوي كل من القبة الصغيرة والقبة الوسطى على صخور في الأعلى قد تكون كتل بركانية. تقع القبة الكبيرة، والمعروفة أيضاً باسم القبة الشمالية، في أقصى الشمال عند حافة CBVC. يبلغ قطرها 2.5 كيلومتر مع انخفاض في القمة. أعطى توزيع تغير حجم الحفرة الصغيرة نتائج غير حاسمة لتوقيت النشاط البركاني CBVC، حيث تتراوح الأعمار من أقل من بليون سنة إلى أكثر من 3 بلايين سنة.

• أنـــابيب الحمـــم البركانيـــة

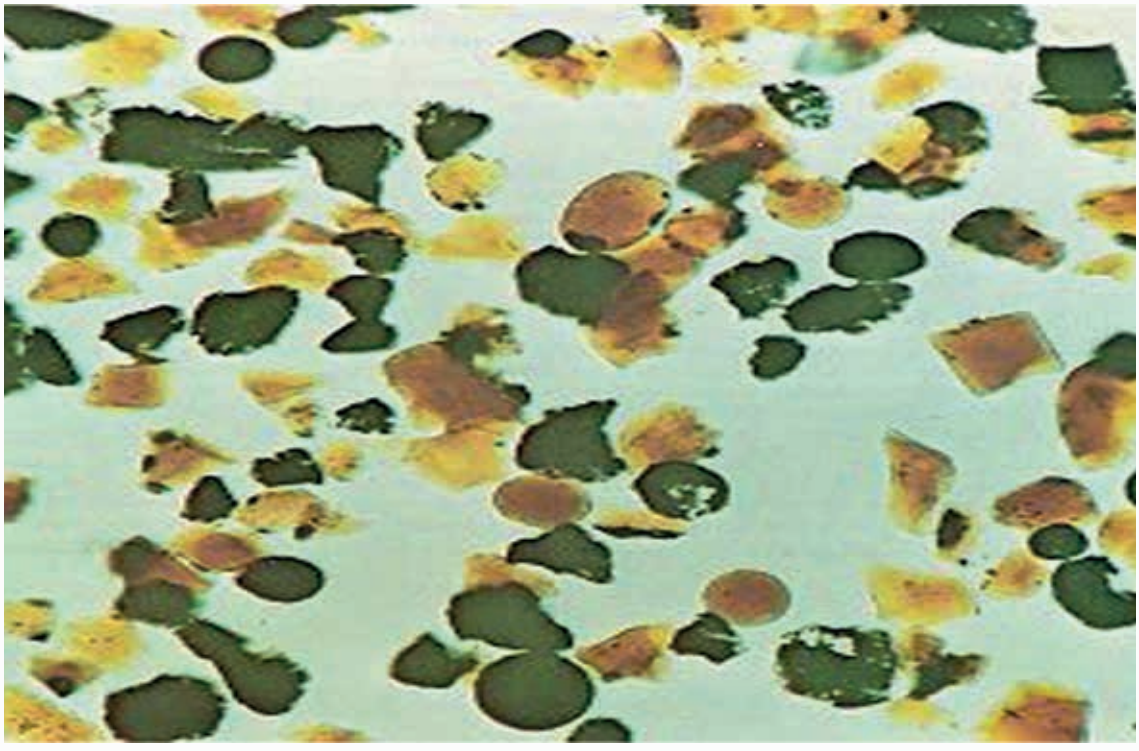
مع أن أنابيب الحمم البركانية Lava tubes معروفة منذ فترة طويلة بوجودها على الأرض، إلا أنه لم يجر التأكد إلا مؤخراً نسبيّاً من وجودها أيضاً على القمر. يُكشف عن وجودها أحياناً من خلال وجود (كوة)، وهو المكان الذي انهار فيه سقف الأنبوب، تاركاً ثقباً دائريّاً يمكن رصده بوساطة المركبات المدارية القمرية.

المنطقة التي تعرض أنبوب الحمم هي منطقة ماريوس هيلز. في عام 2008، ربما جرى اكتشاف فتحة لأنبوب الحمم البركانية في هذه المنطقة بواسطة مركبة الفضاء اليابانية كاغويا Kaguya. جرى تصوير الكوة بمزيد من التفصيل في عام 2011 بواسطة مركبة الاستطلاع المدارية القمرية التابعة لناسا، التي تُظهر أن الحفرة التي يبلغ عرضها 65 متراً وأرضية الحفرة على بُعْد 36 مترًا أسفل منها. قد تكـــون هناك أيضاً أنابيب حمم بركانيـــة في بحر الصفـــاء Mare Serenitatis.

قد تكون أنابيب الحمم القمرية بمثابة تجمعات سكنية للبشرية مستقبلاً. قد توجد أنفاق يزيد قطرها على 300 متر، وتقع تحت 40 متراً أو أكثر من البازلت، مع درجة حرارة ثابتة تبلغ- 20 درجة مئوية. توفر هذه الأنفاق الطبيعية الحماية من الإشعاع الكوني، والإشعاع الشمسي، والنيازك، والنيازك الدقيقة، والمقذوفات من الصدمات. وهي معزولة عن التغيرات الشديدة في درجات الحرارة على سطح القمر ويمكن أن توفر بيئة مستقرة للسكان.

• رواسب الفتات الناري

بالقُرب من حواف البحار القمرية توجد طبقات داكنة من المواد تغطي عدة آلاف من الكيلومترات المربعة. تحوي على العديد من الكرات الصغيرة من الزجاج البرتقالي والأسود التي ربما تكونت من الحبات الصغيرة من الحمم البركانية التي بردت بسرعة كبيرة. يُعتقد أن هذه الحبات ناتجة عن ثورات بركانية نافورة الحمم التي كانت أكبر من تلك الموجودة على الأرض. أكبر الرواسب المعروفة تحدث في منطقة طوروس- ليترو، وهضبة أريستارخوس في الجانب القريب من القمر.



حبات زجاجية أنتجتها الانفجارات البركانية القديمة على القمر وجمعها رُوَّاد بعثات أبولو.

يبلغ قطر العديد من رواسب الحمم البركانية الصغيرة بضعة كيلومترات فقط وتقع دائماً بالقُرب من البحار أو في أرضيات فوهات كبيرة، مع أن العديد منها يقع أيضاً على طول خطوط صدوع واضحة. من المحتمل أن تكون ناتجة عن انفجارات بركانية صغيرة لأن معظمها يحوي على فوهة عادية أو فوهة مركزية صغيرة ممددة أو غير منتظمة الشكل. حفظ الأمثلة على طول حافة أرضية فوهة ألفونسو، وهي فوهة صدمية على الحافة الشرقية لبحر الغيوم. تمتد نحو 7 كيلومترات من الشرق إلى الجنوب الشرقي من CBVC وهي منطقة عاكسة جدّاً قد تكون رواسب تدفق الحمم البركانية. وتظهر البقايا المتفجرة أيضاً منتشرة في الشرق لنحو 300 كيلومتر، تغطي مساحة 70000 كيلومتر مربع. يرجع الحجم الكبير لهذه الرواسب البركانية إلى الجاذبية المنخفضة للقمر، وكما أن الانفجار البركاني العملاق من CBVC كان قادراً على نشر الحطام على مساحة أكبر بكثير مما يمكن أن يكون ممكناً على الأرض.

• الأخاديـــــد القمريـــــة

هي المنخفضات الطويلة والضيقة في سطح القمر والتي تشبه القنوات. لا يزال يتعين تحديد تكوينها الدقيق، ولكن من المحتمل أن تكون قد تشكلت من خلال عمليات مختلفة. على سبيل المثال، تتعرج الأخاديد القمرية في مسار منحنٍ مثل النهر الأرضي، ويُعتقد أنها تمثل قنوات الحمم البركانية أو بقايا أنابيب الحمم المنهارة. عادة ما تبدأ من هياكل حفرة صغيرة يعتقد أنها كانت فوهات بركانية. وادي شروتر بين بحر الزخات ومحيط العواصف هو أكبر الأخاديد القمرية. مثال بارز آخر هو أخدود هادلي، الذي تشكل منذ ما يقرب من 3.3 بليون سنة.

تتميز الأخاديد القمرية المقوسة بمنحنٍ سلس، وتوجد على حواف البحار القمرية المظلمة. ويعتقد أنها تشكلت من تدفقات الحمم البركانية التي أوجدت بحراً، تبرد وتقلّص وغرق. عُثر على هذه الأخاديد في جميع أنحاء القمر، ويمكن رؤية أمثلة بارزة منها بالقُرب من الحدود الجنوبية الغربية لبحر الهدوء وعلى الحدود الجنوبية الشرقية الغربية لبحر الرطوبة.

• أحـــــواض الصـــــــدم

تتحكم أحواض الصدم Impact Basins في جزء كبير من جيولوجيا القمر. الأحواض الكبيرة (بعرض 300–2500 كيلومتر) هي منخفضات دائرية تقريباً على القمر تشكلت عندما ضربت نيازك أو كويكبات أو مذنبات كبيرة جدّاً سطح القمر منذ بلايين السنين. تنتج مثل الصدمات الكبيرة تصدعات وتشوهات أخرى في القشرة الأرضية على أجزاء كبيرة من القمر.

المواد المقذوفة من الأحواض مبعثرة على مساحات واسعة. العديد من الأحواض متعددة الحلقات حيث تحوي على سلسلة من الحافات متحدة المركز. يعد الحوض الشرقي، الذي يبلغ عرضه 1000 كيلومتر، والذي يقع على الطرف الغربي (بعيداً عن المنظر التلسكوبي)، مثالاً رائعاً على حوض متعدد الحلقات. تبدو حلقاته مثل موجات الصدمة المجمدة أو التموجات في القشرة القمرية. تشكل الحلقتان الداخليتان جبال الروك Rook Mountains الداخلية والخارجية، بينما تشكل الحلقة الخارجية التي يبلغ قطرها 930 كيلو متراً جبال كورديليرا Cordillera Mountains. يعد الحوض الشرقي أصغر حوض صدم رئيس (يبلغ

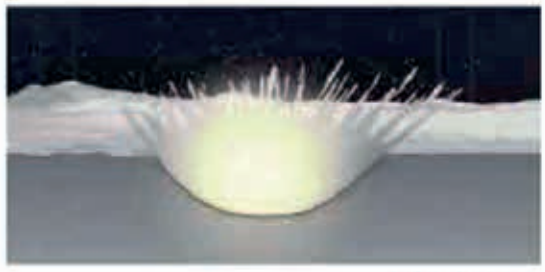
عمره 3.84 مليار سنة) وله تركيب محفوظ جيداً يتضمن رواسب ضخمة من المقذوفات. يحوي الحوض على كمية صغيرة فقط من بازلت البحار تغطي الجزء الداخلي منه.

1 صخرة قادمة من الفضاء

تقترب النيازك من سطح القمر بسرعات متنوعة ، اعتماداً على ما إذا كانت تلحق بالقمر أو تقابله وجهاً لوجه.

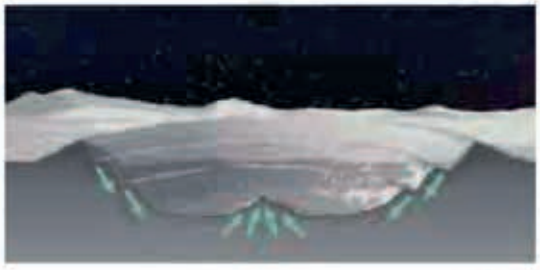
2 التأثير الأولي

يخلق التأثير موجة صدمة تبخر النيزك وتموجات في القشرة ، وتضغطها وتسخنها على طول مقدمة صدمية على شكل وعاء.



3 دثار الطرد

مع مرور موجة الصدمة ، يتم إلقاء المواد من موقع الهبوط ، مما يشكل طبقة من الحطام على المناظر الطبيعية المحيطة المعروفة باسم دثار الطرد.

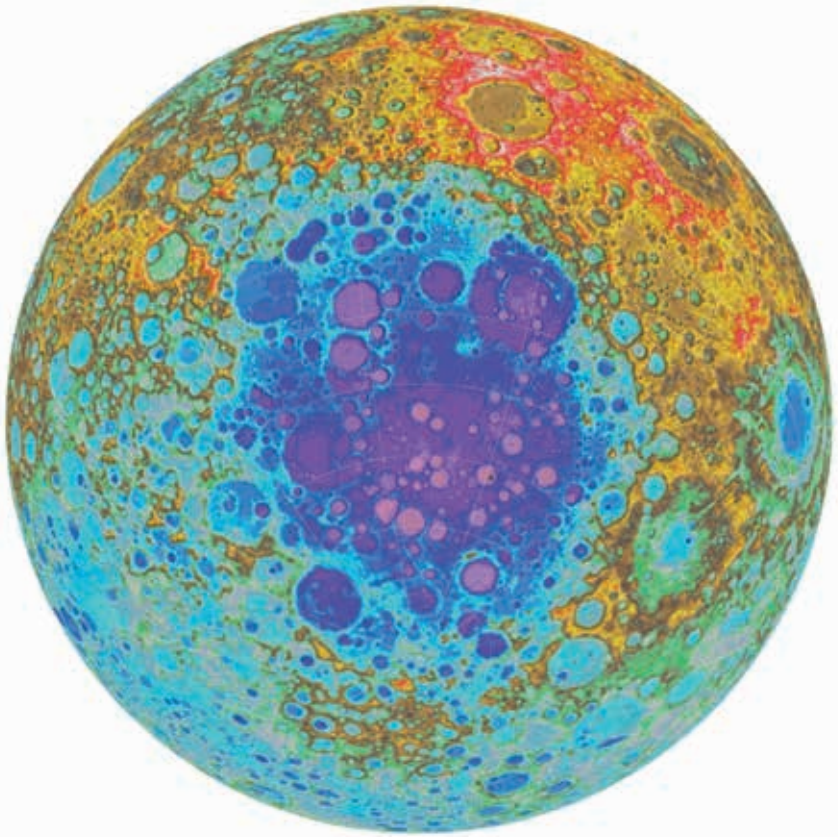


4 حفرة

والنتيجة هي انخفاض سطحي. في فوهة بركان كبيرة ، قد ترتد القشرة لتشكل قمة مركزية ؛ قد تنهار الجوانب تحت ثقلها لتشكل المدرجات.

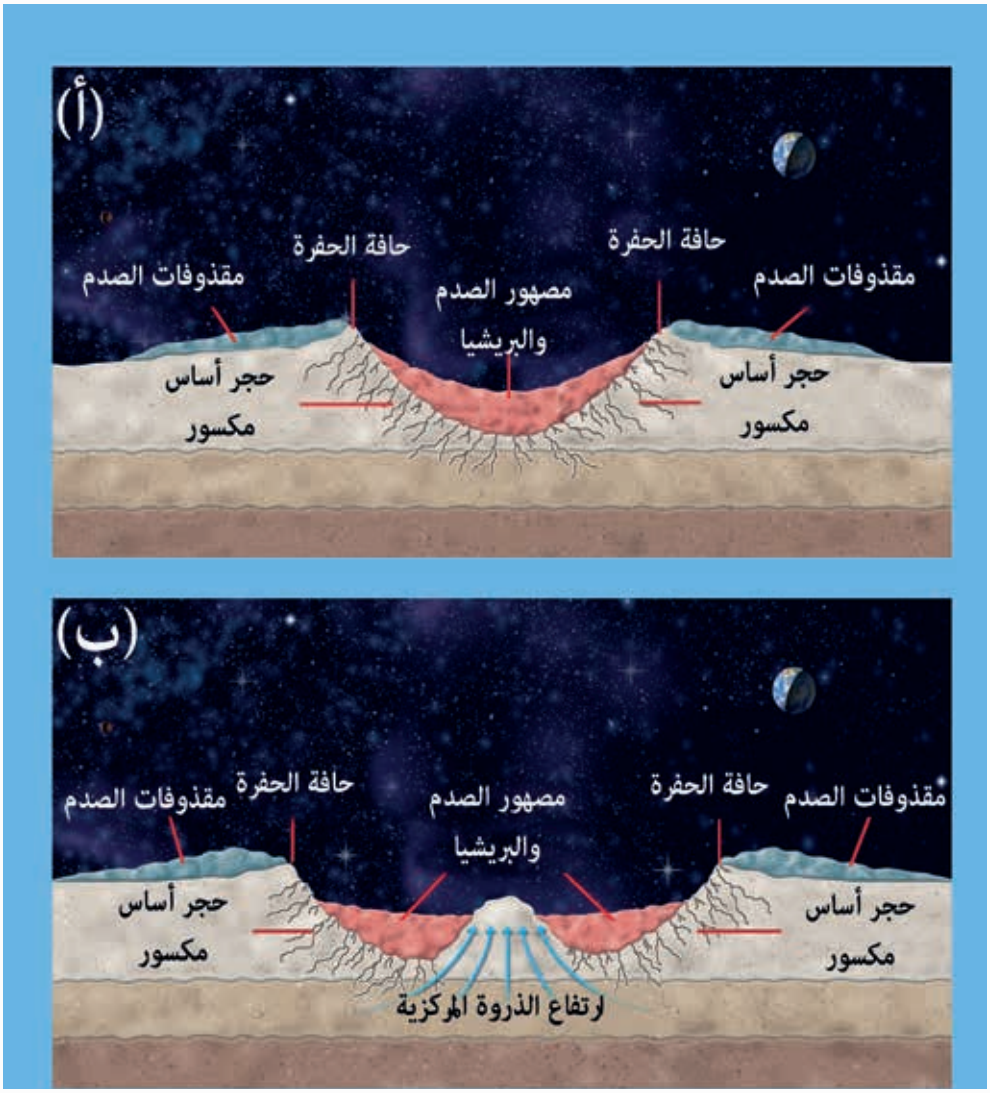
لقد قدمت فوهات الصدم المحفوظة بشكل جيد على القمر لعلماء الفلك فهماً تفصيلياً لعملية تكوين الفوهة. يُحدّد حجم وشكل الحفرة بشكل أساسي من خلال الطاقة الحركية للجسم الوارد (مزيج من سرعته وكتلته).

أما أكبر بحر صدم فهو بحر القطب الجنوبي - أيتكين South Pole–Aitken Basin (SPA). يبلغ عرضه 2500 كيلومتر وعمقه 12 كيلومتراً، ويقع في القطب الجنوبي على الجانب الآخر من القمر. كما عثر على بحر الزخات (عرضه 1800 كيلومتر)، وبحر الشدائد (عرضه 1100 كيلومتر) على الجانب القريب.



يُعد حوض القطب الجنوبي - أيتكين على الجانب البعيد من القمر أحد أكبر وأقدم معالم الصدم في النظام الشمسي. يمكن رؤيته بسهولة في بيانات الارتفاع. المركز المنخفض هو الأزرق الداكن والأرجواني. الجبال على حافتها، بقايا حلقات خارجية، حمراء وصفراء.

مـن الصعـب رؤيـة الأحـواض الأصليـة اليـوم لأن العديـد منهـا قـد تـآكل بعيـداً عـن طريـق صدمـات النيـازك اللاحقـة ومُلـئ بالحطـام المتناثـر وتدفقـات الحمـم البركانيـة مـن الانفجـارات البركانيـة.



نوعا الفوهات: (أ) البسيطة، و(ب) المعقدة.

• النشـــــــاط البركانـــــــي الأخـــــير

في عام 2014، أعلنت وكالة ناسا عن (دليل واسع النطاق على وجود براكين قمرية فتية) في 70 بقعة بحر غير منتظمة جرى تحديدها بوساطة مركبة الاستطلاع المدارية القمرية، التي يقل عمر بعضها عن 50 مليون سنة. يثير هذا احتمال ارتفاع درجة حرارة الوشاح القمري أكثر مما كان يُعتقد سابقاً، على الأقل في الجانب القريب حيث تكون القشرة العميقة أكثر دفئًا بسبب التركيز الأكبر للعناصر المشعة. قبل ذلك بقليل، قدم دليل على مدى 2–10 مليون سنة من البراكين البازلتية الأصغر سنّاً داخل فوهة البركان لويل، الواقعة في المنطقة الانتقالية بين الجانبين القريب والبعيد من القمر. يمكن أن يكون الوشاح الأكثر سخونة في البداية و / أو التخصيب المحلي للعناصر المنتجة للحرارة في الوشاح مسؤولاً عن الأنشطة المطولة أيضاً على الجانب البعيد من الحوض الشرقي.

المـــــاء علـــــى القمـــــر

تناقلت الأجيال الكثير من قصص انعكاس صورة القمر على الماء. مثل قصة الثعلب والهرة التي استطاعت أن تُفلت من الثعلب الشرير الذي يريد أن يفترسها بأن دلته على مخزن الجبن في البحيرة، التي كانت عبارة عن انعكاس صورة القمر على سطح ماء البحيرة، قفز الثعلب، ويبدو أنه كان لا يجيد السباحة، فغرق ونفق.

ولكن اليوم، فقد ثبت للعلماء أن الماء موجود على القمر، ويمكنك أن تصنع منه بِركة ماء مستقبلاً وتسبح فيها!

لكن كيف يمكن للماء أن يوجد على القمر مع أنه أكثر جفافاً من الصحراء الكبرى بمائة مرة؟

في عام 2020، أكدت بيانات بعثة صوفيا SOFIA التابعة لوكالة ناسا وجود الماء في المنطقة المضاءة بنور الشمس على سطح القمر على هيئة جزيئات من الماء مضمنة داخل حبيبات الغبار القمري أو ربما تلتصق بسطحها.

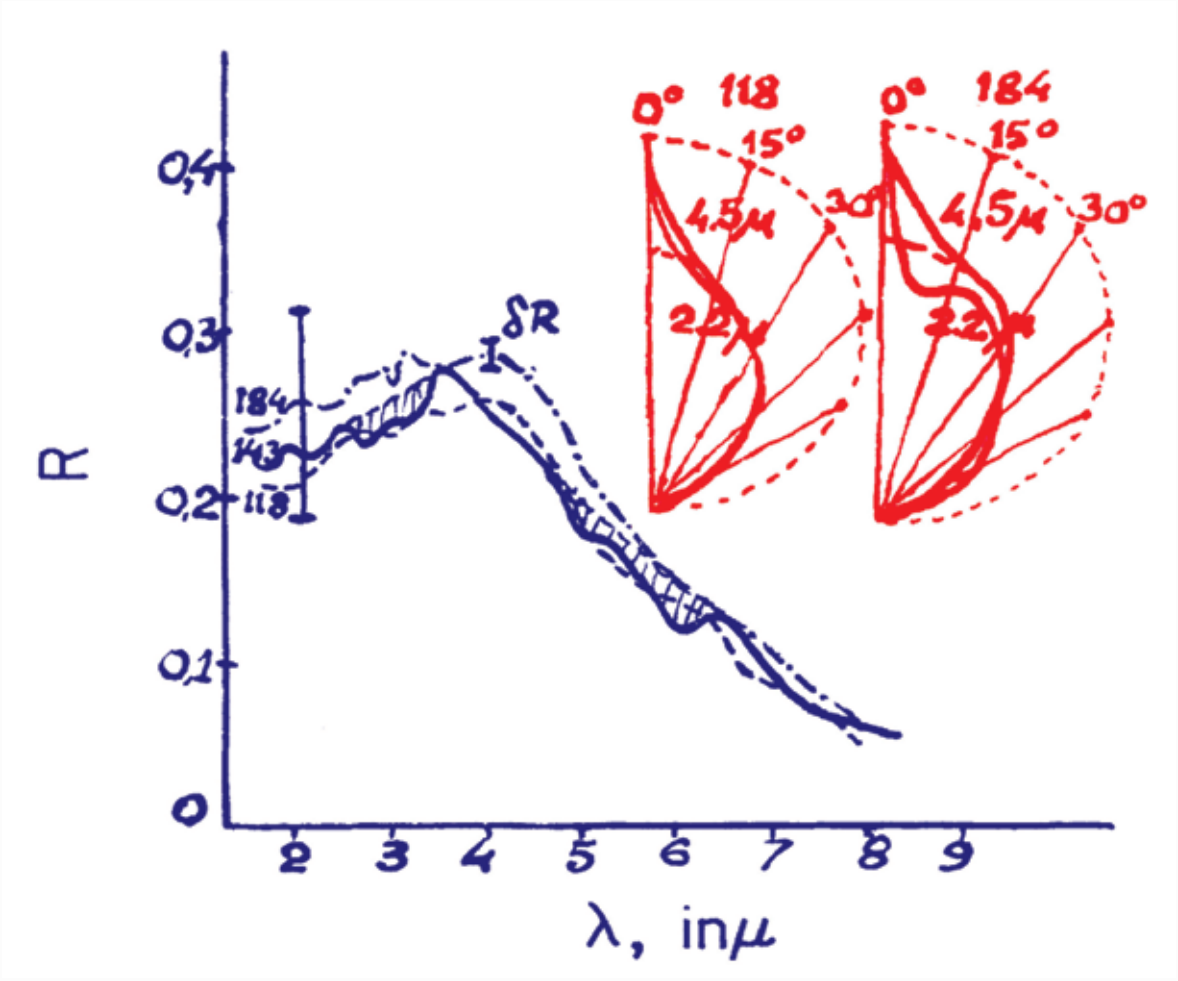
يمكن أن تبقى جزيئات الماء المنتشرة على سطح القمر المضاء بنور الشمس، كما اكتشفه مرصد صوفيا التابع لناسا في عام 2020. يتحلل بخار الماء تدريجيّاً بفعل ضوء الشمس، مما يؤدي إلى فقدان الهيدروجين والأكسجين في الفضاء الخارجي. وجد العلماء جليداً مائيّاً في الحفر المظللة بشكل دائم في أقطاب القمر. توجد جزيئات الماء أيضاً في الغلاف الجوي القمري الرقيق جدّاً.

الماء (H_2O)، ومجموعة الهيدروكسيل المرتبطة كيميائيّاً (OH-)، موجودة في أشكال مرتبطة كيميائيّاً مثل هيدرات وهيدروكسيدات مع معادن قمرية (بدلاً

من الماء الحر)، وتشير الأدلة بقوة إلى أن هذا هو الحال في التركيزات المنخفضة كما هو الحال بالنسبة للكثير من مناطق سطح القمر.

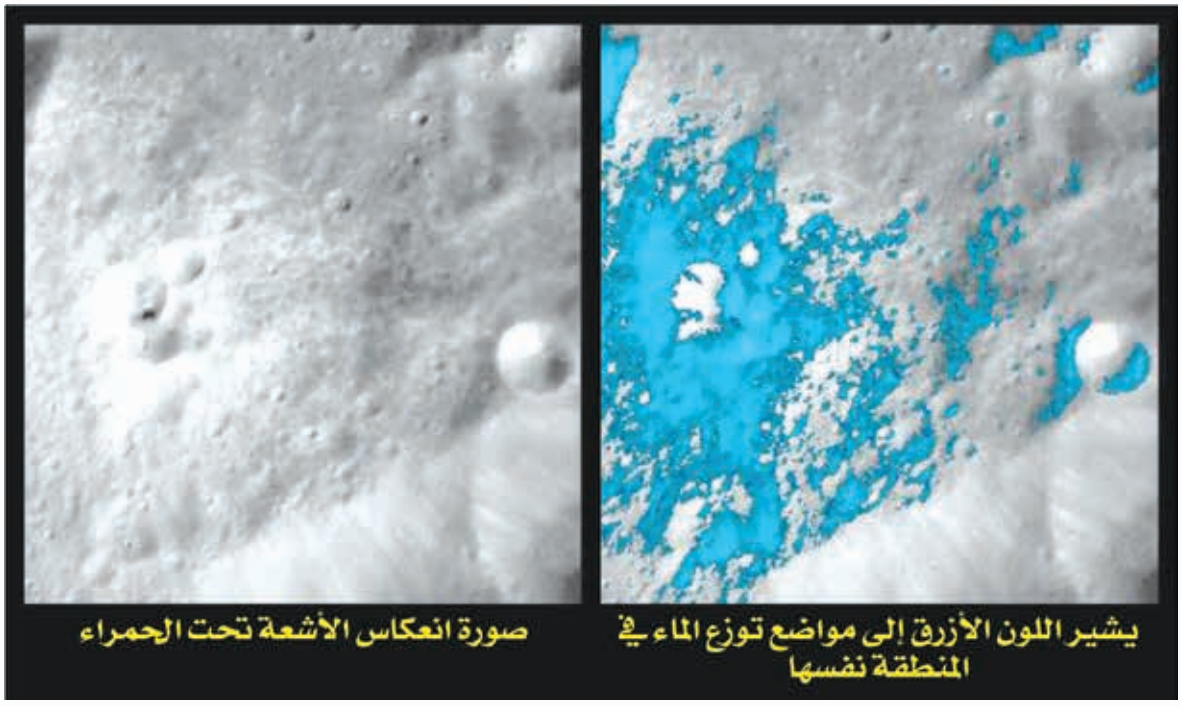
في الواقع، بالنسبة للمادة السطحية، يُحسب وجود الماء الممتز بتركيزات ضئيلة تتراوح بين 10 و 1000 جزء في المليون. كما تراكمت أدلة غير قاطعة على وجود جليد مائي حر في قطبي القمر خلال النصف الثاني من القرن العشرين من خلال مجموعة متنوعة من الملاحظات التي تشير إلى وجود هيدروجين مرتبط.

في 18 أغسطس 1976، هبط السابر السوفيتي Luna 24 في بحر الشدائد، وأخذ عينات من أعماق 118 و 143 و 184 سم من الثرى القمري، ثم أعادها إلى الأرض. في فبراير 1978، نُشر أن التحليل المختبري لهذه العينات أظهر أنها تحوي على 0.1 % من وزنها ماء.



أطياف الانعكاس المنتشرة لعينات الثرى القمري المستخرجة على أعماق 118 و 184 سم بوساطة المسبار السوفيتي Luna 24 لعام 1976 الذي يظهر الحدود الدنيا بالقُرْب من 3 و 5 و 6 ميكرومتر، نطاقات اهتزاز التكافؤ لجزيئات الماء.

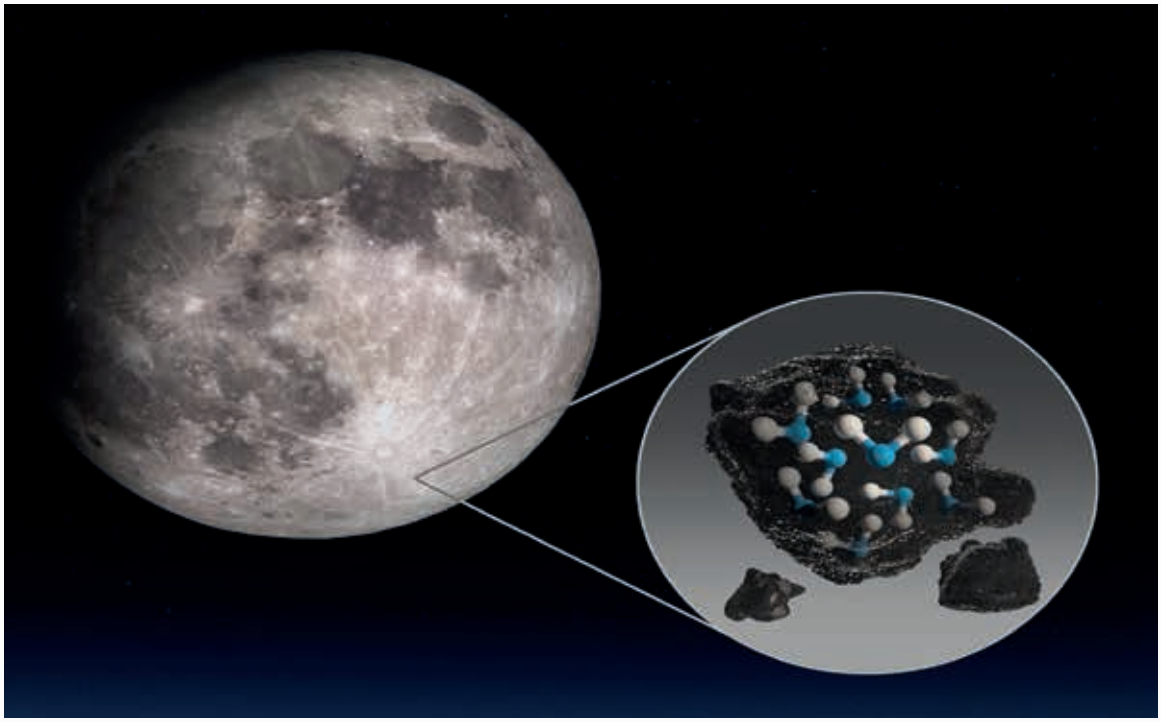
في 24 سبتمبر 2009، أفيد أن مطياف Moon Mineralogy Mapper (M3) التابع لوكالة ناسا على متن مسبار ISRO Chandrayaan-1 الهندي قد اكتشف ميزات امتصاص قريبة من 2.8–3.0 ميكرومتر على سطح القمر. في 14 نوفمبر 2008، صنعت الهند سابر صدم القمر على متن المركبة المدارية Chandrayaan-1 وهبط في فوهة شاكلتون وأكدت وجود جليد مائي. بالنسبة لأجسام السيليكات، تُنسب هذه الميزات عادةً إلى الهيدروكسيل و / أو المواد الحاملة للماء. في أغسطس 2018، أكدت وكالة ناسا أن مطياف (M3) أظهر وجود جليد مائي على السطح عند قطبي القمر. جرى تأكيد وجود الماء على سطح القمر المضاء بنور الشمس بواسطة وكالة ناسا في 26 أكتوبر 2020.



تُظهر هذه الصور فوهة قمرية صغيرة جدّاً على الجانب البعيد، كما تم تصويرها بوساطة Moon Mineralogy Mapper على متن Chandrayaan-1.

ربما وصل الماء إلى القمر على مدى فترات زمنية جيولوجية عن طريق القصف المنتظم للمذنبات الحاملة للماء والكويكبات والنيازك أو تم إنتاجه باستمرار في الموقع بواسطة أيونات الهيدروجين (البروتونات) للرياح الشمسية التي تؤثر في المعادن الحاملة للأكسجين.

اجتذب البحث عن وجود المياه القمرية اهتماماً كبيراً وحفز العديد من الرحلات القمرية الأخيرة، ويرجع ذلك إلى حد كبير إلى فائدة المياه في جعل السكن على القمر على المدى الطويل أمراً ممكناً.



رسم توضيحي لجزيئات الماء على سطح القمر. أكدت مركبة الفضاء صوفيا SOFIA التابعة لوكالة ناسا وجود الماء على سطح القمر المضاء بنور الشمس في عام 2020.

العـــــودة لاستكشـــــاف القمـــــر

نشر كاتب الخيال العلمي هـ. ج. ويلز. عام 1901 روايته (الرجال الأوائل على القمر) وهي تروي قصة اثنين من المسافرين: أحدهما عالم وهو السيد كافور، والآخر رجل أعمال شاب هو السيد بيدفورد، اللذان يسافران إلى القمر. يصير في عصرهما القيام بالسفر محتمل وذلك من خلال تطوير معدن ثوري جديد له خصائص مضادة للجاذبية. يطيران بمركبتهما الفضائية بتحكم اتجاهي للمعدن الجديد، ويهبطان على القمر تماماً قبل الفجر، عندما كانت درجة حرارة السطح باردة جدّاً حيث الجو القمري يصل إلى درجة التجمد. على أية حال، وعندما يعود ضوء الشمس في أثناء النهار، ينفجر السطح صاعداً بوفرة من الغطاء النباتي. تستهلك هذا الغطاء وحوش نباتية عملاقة ترعاها مخلوقات تشبه النمل بحجم إنسان وتعيش أسفل السطح القمري في كهوف كبيرة واسعة محاطة بمحيط شاسع داخلي. ينتهي الأمر بمخترع نظام الدفع أن تقطعت به السبل على القمر، في حين يعود الشاب إلى الأرض. يرسل العالم الأسير سلسلة من الرسائل إلى الأرض، حيث يصف حياته في هذا المجتمع الجديد. تتوقف في نهاية الأمر هذه الرسائل وما عاد هناك استعمال أكثر لخصائص المعدن الجديد.

هذا عن أخبار الرجال الأوائل على القمر، لكن ماذا عن أخبار الرجال والنساء الأواخر؟

لقد حددت وكالة الفضاء ناسا الأولويات العلمية لبعثة أرتميس Artemis III 3، التي سترسل أول امرأة وأول رجل غير أبيض إلى القمر في عام 2024. تم تضمين الأولويات ومجموعة الأنشطة المرشحة في تقرير جديد.

كانت الوحدة القمرية لأبولو- 17، تشالنجر، ورائدا الفضاء جين سيرنان (في الصورة) وجاك شميت (ينعكس في خوذة سيرنان) في وادي توروس ليترو على القمر آخر من قاما برحلات طويلة في عام 1972، ويبدو أنهما لن يكونا الأخيرين.

من خلال بعثات أرتميس، ستهبط ناسا على سطح القمر باستخدام تقنيات مبتكرة لاستكشاف المزيد من سطح القمر أكثر من أي وقت مضى. ستتعاون مع شركاء تجاريين ودوليين وتؤسس أول وجود طويل الأمد على سطح القمر. بعد ذلك، سوف تستخدم ما تعلمته حول القمر لاتخاذ القفزة العملاقة التالية: إرسال رُوَّاد الفضاء الأوائل إلى المريخ.

ستعود إلى القمر من أجل الاكتشافات العلمية والفوائد الاقتصادية والإلهام لجيل جديد من المستكشفين: إنه جيل أرتميس. مع الحفاظ على الريادة الأمريكية في الاستكشاف، ستبني تحالفاً عالميّاً وتستكشف الفضاء السحيق لصالح الجميع.

ستساعد هذه التحقيقات ذات الأولوية العالية العلماء على فهم أفضل للعمليات الكوكبية الأساسية التي تعمل عبر النظام الشمسي وخارجه. بالإضافة إلى ذلك، أعطى الفريق الأولوية للتحقيقات التي ستساعد ناسا على فهم المخاطر والموارد المحتملة للقطب الجنوبي للقمر، حيث تأمل الوكالة في تأسيس مفهوم معسكر قاعدة أرتميس بحلول نهاية العقد.

سيتم بناء معسكر قاعدة أرتميس على السطح والبوابة في مدار حول القمر. ستسمح هذه العناصر للروبوتات ورُوَّاد الفضاء باكتشاف المزيد وإجراء المزيد من العلوم أكثر من أي وقت مضى.

سيقوم رُوَّاد الفضاء في مشروع أرتميس بالتحضير لإنشاء مستعمرة على سطح القمر.

الفصل الرابـع

جاذبيـة الأرض

مُقَدِّمَة

الجاذبية خاصيةٌ من خصائص المادة والطاقة أيضاً، بموجب نظرية النسبية لآينشتاين، والتي تتجلى بقوة شدّ تحدث فيما بين أجزاء المادة، مهما كانت صغيرةً أو كبيرةً، ومهما كانت المسافات الفاصلة فيما بينها، فالجاذبية قوة واسعة الشمول، وقد اشتق مصطلح الجاذبية Gravity من الكلمة اللاتينية "Gravis" التي كانت تعني (الوقار).

ربما كانت أولى التساؤلات الموثقة لدينا عن الجاذبية ما طرحته مجموعة الـ (ريج - فيدا) التي تعود للعصر الفيدي (نحو سنة 2000 ق.م) في الهند وهو: «لماذا تجوب الشمس السموات دون أن تسقط»، لكن لم يتح للبشرية الإجابة على تساؤل الفيديين إلا بعد آلاف السنين، وهو تساؤل يذكرنا بطريقة تفكير نيوتن - ومن قبله العلماء العرب والمسلمين- عندما تساءلوا: لماذا تسقط التفاحة ولا يسقط القمر على الأرض؟

الجاذبية عبارة عن قوة طبيعية تقوم بسحب أو جذب الأجسام تجاه بعضها البعض، وهذه الأجسام قد تتراوح ما بين الجسيمات الأولية كالإلكترونات والفوتونات، إلى الكواكب والنجوم العملاقة. تدور الأرض بمن عليها في دورتها اليومية حول محورها، ودورتها السنوية حول الشمس، ولهذا السبب تبدو

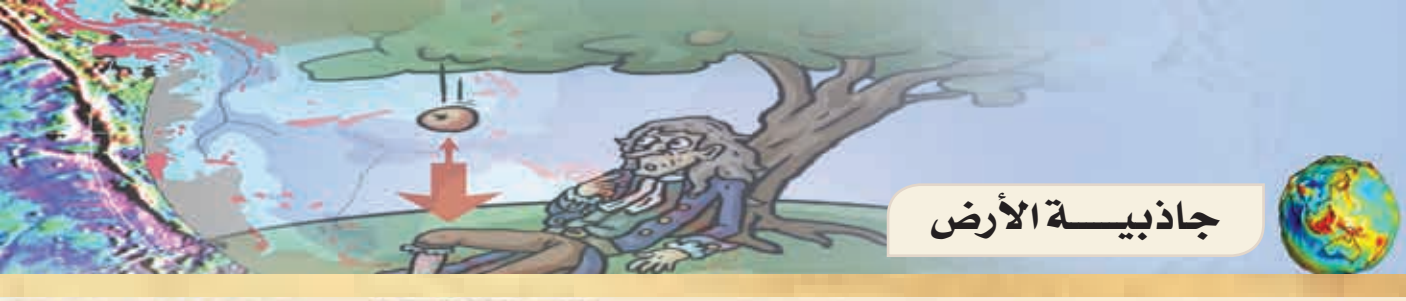
لنا الجبال وكأنها ثابتة، بينما هي في حقيقة الأمر تدور مع الأرض. فجميع الأجسام التي تخضع لجاذبية الأرض ومنها الجبال والبحار والغلاف الجوي وغيرها، تشترك مع الأرض في دورتها اليومية حول محورها، ودورتها السنوية حول الشمس.

الجاذبية من العوامل الأساسية لنشأة الحياة على سطح الأرض، ولها تأثير كبير على حياتنا والشكل الذي تسير به. لا شك أن للجاذبية فضل كبير في تشكل كوكب الأرض فلولا الأرض وجاذبيتها المناسبة لما ووجد الغلاف الجوي بالشكل الذي هو عليه الآن، ولم تكن الحياة لتبدأ على الكوكب الأزرق. الجاذبية هي القوة التي تحافظ على الغلاف الجوي و هو من أهم الأشياء التي تسبب وجود واستمرار الحياة على كوكب الأرض و ذلك لأنه يمنحنا الأكسجين اللازم للتنفس كما أنه يحمي الارض من العديد من أنواع الأشعة الضارة و الأجسام الساقطة من الفضاء مثل النيازك التي تحترق نتيجة احتكاكها بالغلاف الجوي.

باستخدام فكرة الجاذبية استطاع العلماء والمهندسون صناعة الأقمار الصناعية، التي تقوم ببث القنوات التلفزيونية، وغيرها مختص بالطقس، وكذلك تسريع المسابير الفضائية. تحافظ الجاذبية على المسافات بين الكواكب و ثباتها في المدارات الخاصة بها مثل الحفاظ على ثبات موقع كوكب الأرض في المدار الخاص به والحفاظ على ثبات المسافة بينه و بين الشمس و هي المسافة المثالية التي تسمح باستمرارية الحياة على كوكب الأرض لأنه لو اقتربت المسافة أكثر من ذلك لزادت درجة الحرارة على كوكب الأرض ولو ابتعدت المسافة فإن درجة الحرارة سوف تقل و في الحالتين لن تناسب الظروف وجود الحياة و لذلك فإن المسافة التي تحافظ عليها الجاذبية بين الأرض والشمس هي المسافة المثالية.

يرتبط علم الجاذبية الأرضية إرتباطا وثيقا بعدد من العلوم الأساسية، التي ساعدت على تقدمه، وهي علوم الفلك والرياضيات والطبيعة. كما ان هناك علوما أخرى أسهمت تطبيقات علم الجاذبية الأرضية في تقدمها وأضافت المزيد إليها، ومنها علوم الجيوديسيا والجيوفيزياء والجيولوجيا في التطبيقات التالية:

- استكشافات البترول
- الدراسات الجيولوجية الإقليمية
- تحديد التعويض الايزوستاتي
- كشف الرواسب المعدنية
- كتشف الفجوات تحت السطحية (الجاذبية الدقيقة)
- تحديد مواقع الوديان الصخرية المدفونة
- تحديد سمك الطبقة الجليدية
- الغلاف المائي محدثة ما يسمى «المد والجزر البحري»
- كشف الآثار القديمة (الجاذبية الدقيقة)
- شكل الأرض وديناميكيتها (تحركاتها الحديثة).
- الاستخدامات العسكرية (خاصة في مسار الصواريخ)
- مراقبة النشاطات البركانية



الجاذبية الأرضية والقوى المؤثرة عليها

درس الفلكيون القدامى حركة القمر والكواكب، ولكن هذه الحركة لم تُفسَّر بشكل صحيح إلا في أواخر القرن السابع عشر عندما أوضح العالم الإنجليزي إسحاق نيوتن (1642–1727م) أن هناك ارتباطاً بين القُوى الجاذبة للأجسام نحو الأرض وأسلوب حركة الكواكب. بنى نيوتن دراسته على الدراسة الدقيقة لحركة الكواكب التي قام بها إثنان من الفلكيين في أواخر القرن السادس عشر الميلادي، وهما: تيخو براهي الدنماركي، ويوهان كيبلر الألماني. ومن القوانين الثلاثة التي اكتشفها كيبلر، أوضح نيوتن كيف أن قوة جذب الشمس لا بد أن تقل بزيادة المسافة، وافترض أن الأرض لا بد أن تسلك السلوك ذاته، فتمكن من حساب القوة التي تجذب القمر إلى الأرض عند سطحها. أما عالم الطبيعة الإيطالي جاليليو جاليلي (1564–1642م) فقد قدم مساهمات جيدة في مراقبة الأجسام الساقطة في اتجاه الأرض، واستنتج أن معدل السرعة المتزايد (عجلة الجاذبية الأرضية) ثابتة بالنسبة لكل الأجسام، وأن سرعة الجسم الساقط تساوي في الثانية الأولى نصف قيمة عجلة الجاذبية (التثاقلية) في مكان سقوطه على سطح الأرض.

وتنص نظرية نيوتن للجاذبية على أن قوة الجذب بين جسمين تتناسب طردياً مع كتلة كل منهما، ومعنى ذلك أنه كلما زادت كتلة أي من الجسمين زادت قوة الجذب بينهما. وتشير النظرية إلى الكتلة وليس إلى الوزن. فوزن جسم ما على الأرض هو في الواقع قوة جذب الأرض التي تؤثر على هذا الجسم. ويكون للجسم نفسه أوزان مختلفة على سطوح الكواكب المختلفة، ولكن كتلته تظل ثابتة لا تتغير. وتتناسب قوة الجاذبية تناسباً عكسياً مع مربع المسافة

بـين مركـزي ثقـل الجسـمين، فمثـلاً إذا تضاعفـت المسـافة بـين جسـمين، فـإن قـوة التثاقـل (التجـاذب) بينهمـا تصبـح ربـع قيمتهـا الأصليـة.

$$F = G \frac{mM}{R^2}$$

حيـث (M) هـي كتلـة الأرض، (m) هـي كتلـة الجسـم، (R) هـي نصـف قطـر الأرض، (G) هـو ثابـت التجـاذب، ويسـاوي $6.67 \times 10^{-11}\ Nm^2\ kg^{-2}$ وبمـا أن كتلـة الجسـم الآخـر (m) بالنسـبة لكتلـة الأرض (M) صغيـرة جداً، وبالتالـي فـإن المعادلـة السـابقة يمكـن كتابتهـا علـى النحـو التالـي:

$$g = G \frac{M}{R^2}$$

حيث (g) تمثل تسارع جذب الأرض للجسم، وتم تقديرها حسب المعادلة التالية:

$$g = 9.82\ m / s^2$$

إذا افترضنـا أن متوسـط نصـف قطـر الأرض $R = 6370\ km$، وأن الأرض كـرة سـاكنة (تامـة الكرويـة)، وأن توزيـع كثافـة صخورهـا منتظـم، فـإن القـوة المؤثـرة في جسـم مـا علـى مسـافة مـا مـن مركـز الأرض تكـون واحـدة في كل مـكان، بمعنـى أن قيمـة عجلـة الجاذبيـة تكـون واحـدة. ونظـراً لأن الأرض ليسـت تامـة الكرويـة، كمـا أن لهـا حركـة دوران، فـإن هـذا يعنـي تغيـر قيمـة عجلـة الجاذبيـة علـى سـطح الأرض.

أول قياس لتسارع الجاذبية (عجلة الجاذبية الأرضية) كان لجاليليو في تجربته الشهيرة، عندما ألقى فيها أشياء من قمة برج بيزا Pisa المائل. وتسمى وحدة تسارع

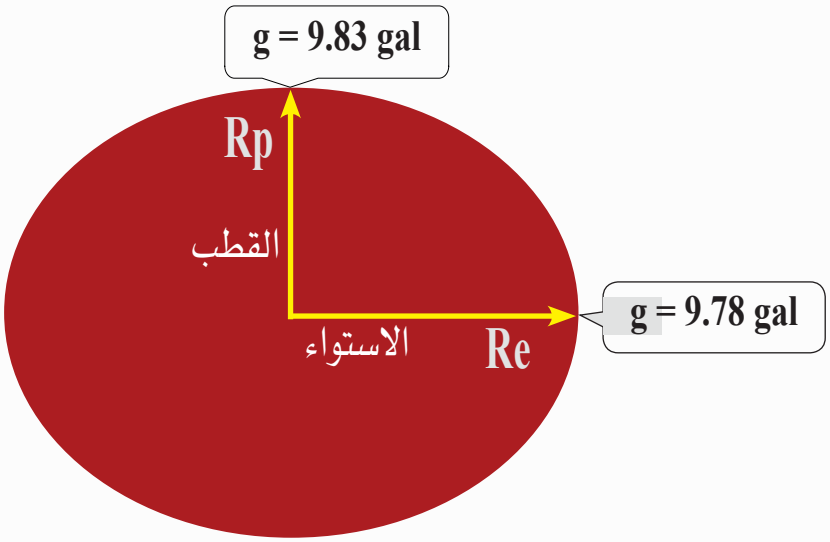
الجاذبية الأرضية (**جال**) بوحدات (سم، جم، ثانية) أو الـ c.g.s، وتعادل ($1cm/s^2$) تشريفاً للعالم **جاليليو**. مقاييس الجاذبية الحديثة يمكن لها أن تقيس التغيرات الطفيفة جداً في تسارع الجاذبية (التثاقلية) إلى جزء واحد من 10^9 (تكافئ المسافة بين الأرض والقمر بدقة 1 متر).

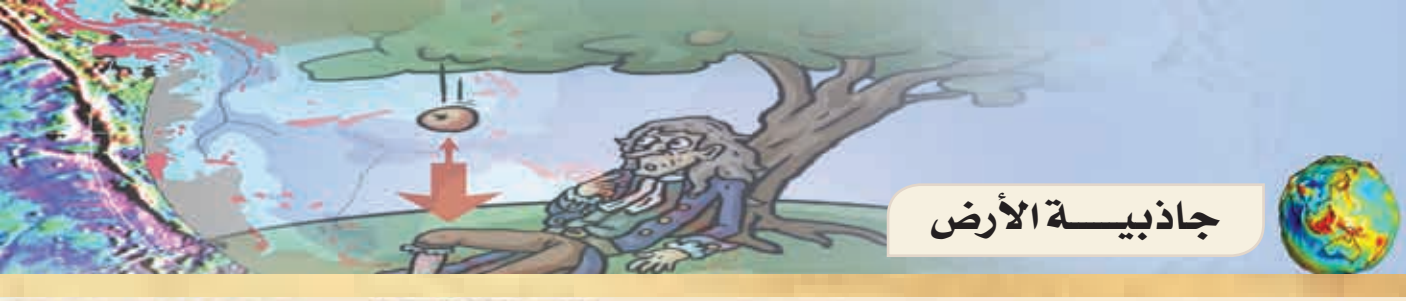
تصل حساسية الأجهزة الحديثة إلى 10 أجزاء في المليون، ومثل هذه القياسات الصغيرة، أدت إلى استنتاج وحدات أصغر مثل المليجال ($1mGal=10^{-3}$ Gal) والميكروجال ($\mu Gal = 10^{-6}$ Gals). وحسب النظام الدولي للوحدات الـ SI، يقاس تسارع الجاذبية بـ $\mu m/s^2$، ويطلق عليها وحدة الجاذبية (الجاذبية) gravity unit (g.u.)، أي أن 1g.u. تساوي 0.1mGal. وحدة الجاذبية ما زالت غير مقبولة عالمياً، وما زالت الـ «mGal» والـ «µGal» واسعة الاستخدام. ولأن قيم الجاذبية المطلوبة في التطبيقات الجيولوجية والمساحية تتفاوت دقتها من 0.05 + إلى 0.03+ مليجال، ونظراً لصغر هذه القيمة فإن أجهزة الجرافيميتر gravimeter يجب أن تكون دقيقة جداً في تصميمها وطرق عملها.

يرى بعض المختصين استخدام مصطلح «الجاذبية أو التثاقلية» بدلاً من الجاذبية، اشتقاقاً من التعبير اللاتيني Gravis التي تعني ثقيلا، في حين أن كلمة جذب هي Attraction. ولقد ورد ذكر كلمة «ثقل» في [الزلزلة، 2] ﴿ وَأَخْرَجَتِ ٱلْأَرْضُ أَثْقَالَهَا ﴾ وكذلك في [القارعة، 6] ﴿ فَأَمَّا مَن ثَقُلَتْ مَوَٰزِينُهُۥ ﴾ وكذلك في الآية [التوبة، 37] ﴿ٱثَّاقَلْتُمْ إِلَى ٱلْأَرْضِ ﴾. وفي قوله تعالى: ﴿وَأَنزَلْنَا ٱلْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنَٰفِعُ لِلنَّاسِ﴾ [الحديد، 25]، فالحديد عنصر وافد من الكون، لم يخلق في الأرض. لأن تكوين ذرة واحدة من الحديد قد تحتاج إلى طاقة تعادل أكثر من أربعة أضعاف طاقة الشمس.

لقد دلت الدراسات الجيوفيزيائية الحديثة أن كثافة الصخور تزداد تدريجياً مع ازدياد العمق، حيث وجد أن مكونات الأرض في اللب (حديد ونيكل) أثقل منها في الوشاح، وفي الوشاح أثقل منها في القشرة. إذ تبلغ كثافة الصخور حوالي 12 جم/ سم^3 في اللب، في حين تبلغ في الوشاح 3.5 جم/ سم^3، وفي صخور القشرة تصل إلى 2.7 جم/ سم^3.

تم حساب قيم الجاذبية عند الأقطاب بـ 983.218 **جال**، في حين قيست عند خط الاستواء بـ 978.032 جال، واستنتج أن هناك فرقاً قدره 5.2 **جال**. وهذا الفرق لا يتفق مع القيم التي تم التوصل إليها نظرياً عند افتراض أن الأرض كروية الشكل، وفي حالة سكون وتوزيع متماثل لكثافتها، حيث يبلغ الفرق 3.4 جال. وهذا الاختلاف ما بين القيمة المحسوبة بواسطة الأجهزة (5.2 **جال**) والقيمة النظرية (3.4 **جال**) إنما يدل على أن الأرض تأخذ شكلاً **إهليجياً** أو **بيضوياً**. قال تعالى: ﴿ وَٱلْأَرْضَ بَعْدَ ذَٰلِكَ دَحَىٰهَآ ﴾ [**النازعات**، 30].





قياس الجاذبية (التثاقلية) الأرضية

هناك طريقتان لقياس قيمة الجاذبية في أي نقطة على سطح الأرض، وهما: الجاذبية المطلقة، والجاذبية النسبية، وكلتاهما تتطلب دقة عالية في القراءات المرصودة باستخدام أجهزة الجاذبية المتطورة.

الجاذبية المطلقة Absolute Gravity

يحتاج تحديد تسارع الجاذبية أو عجلة التثاقلية الأرضية المطلقة إلى طرق معملية دقيقة، وعادة تنفذ فقط تحت الظروف المعملية، وتُستخدم طريقتان للقياس هما: طريقة السقوط الحر وطريقة تأرجح البندول. وتستخدم أجهزة قياس الجاذبية المطلقة للحصول على الجاذبية بدقة عالية في نقاط محددة فوق سطح الأرض، وذلك لتعيين نقاط ضبط أساسية ومعايرة أجهزة قياس الجاذبية النسبية، لأن أجهزة قياس الجاذبية المطلقة ثقيلة، وقد يصل وزنها إلى 300 كجم، ويصعب نقلها من نقطة إلى أخرى.

ومن هذه الأجهزة على سبيل المثال فولار هامون Faller Hammon، وهو جهاز يستخدم طريقة السقوط الحر. وحديثاً أمكن قياس الجاذبية المطلقة لدقة تتراوح ما بين 0.05 + إلى 0.005 + مليجال بعد أخذ سلسلة من القراءات لعدة أيام.

الجاذبية النسبية Relative Gravity

في الاستكشاف الجاذبي عادةً، ليس من الضروري تحديد القيمة المطلقة للجاذبية، بل الأفضل هو قياس التغيرات النسبية. فيتم اختيار محطة أساسية (وهي التي ترجع إلى الـ INGSN71)، وتنشأ محطات جانبية لشبكة ثانوية. جميع بيانات الجاذبية التي تجمع من هذه المحطات خلال المسح تنقص بالنسبة للمحطة الأساسية. وإذا لم يكن من

الضـروري حسـاب القيـم المطلقـة لـ (g)، فتعتبـر قيمـة الجاذبيـة عنـد المحطـات الأساسـية المحليـة تسـاوي صفـراً. المسـافات البينيـة بـين محطـات الجاذبيـة مهمـة بالنسـبة لتفسـير البيانـات. في الدراسـات الإقليميـة، قـد تـوزع المحطـات بكثافـة 2 - 3 محطـات لـكل كم^2، غيـر أنهـا في استكشـافات البتـرول، قـد تزيـد الكثافـة إلـى 8 - 10 محطـات لـكل كم^2. أمّـا في مسـح الدراسـات المحليـة، فيُحتـاجُ إلـى دقـةٍ عاليـةٍ للخصائـص السـطحية، ولذلـك فـإن محطـات الجاذبيـة قـد تُـوزع في شـبكة أطـوال أبعادهـا تتـراوح بـين 5 - 50 متـراً. وعنـد إجـراء الجاذبيـة الدقيقـة Microgravity قـد تصـل المسـافة بـين المحطـات إلـى نصـف المتـر.

مقياس الجاذبية (الجرافيميتر) Gravimeter

الجرافيميتـر عبـارة عـن جهـاز صغيـر، سـهل النقـل مـن نقطـة لأخـرى في مواقـع الرصـد. تعتمـد فكرتـه علـى سـلك زنبركـي متـوازن، يتغيـر توازنـه بتأثيـر أي قـوة إضافيـة مهمـا صغـرت قيمتهـا، ويمكـن قيـاس مقـدار التغيـر الـذي يحـدث. ومـن مميزاتـه سـهولته وصغـر حجمـه وسـرعة القـراءة ودقتهـا. وتنقسـم أجهـزة الجرافيميتـر إلـى: السـاكن Stable وغيـر السـاكن Unstable. أجهـزة قيـاس الجاذبيـة هـي اتـزان زنبركـي متطـور يعلـق في آخـره كتلـة ثابتـة. وزن الكتلـة هـي حاصـل ضـرب الكتلـة في تسـارع الجاذبيـة أو عجلـة التثاقليـة الأرضيـة، وكلمـا زاد الـوزن الـذي يعمـل علـى الزنبـرك فـإن كميـة الاسـتطالة فيـه تتناسـب طرديـاً مـع قـوة التمـدد، أي مـع زيـادة وزن الكتلـة، (الـوزن = حاصـل ضـرب الكتلـة في عجلـة الجاذبيـة الأرضيـة). ثابـت التناسـب هـو ثابـت مرونـة الزنبـرك (K)، هـذه العلاقـة تعـرف بقانـون هـوك Hook. وحيـث أن الكتلـة ثابتـة، فـإن تغيـرات الـوزن سـببها تغيـرات في الجاذبيـة (δg)، وبقيـاس التمـدد في الزنبـرك (δl) يمكـن تحديـد اختلافـات الجاذبيـة. وبمـا أن اختلافـات الجاذبيـة صغيـرة جـداً فـإن التمـدد في أي زنبـرك سـيكون صغيـرا جـداً هـو الآخـر.

أحدث أجهزة قياس الجاذبية الأرضية (الجرافيميتر) من نوع CG - 6

الإجراءات الحقلية في الجاذبية

1. تأثير المد والجزر

يؤثر جذب كل من القمر والشمس على قياسات الجاذبية الأرضية، حيث تقع القياسات تحت تأثير تغير دوري (كل 12 ساعة) في مجال الجاذبية الأرضية، يصل إلى 0.2 مليجال. وجذب القمر أكبر تأثيراً من جذب الشمس على مجال الجاذبية الأرضية. وهناك طريقتان لإلغاء تأثير المد والجزر على قياسات أجهزة قياس الجاذبية «جرافيميتر».

الطريقة الأولى: هي التكرار الدوري لقياسات الجاذبية الأرضية عند نقطة أو أكثر من محطات الجاذبية المطلقة أو الأساسية، وفي زمن يقل عن 6 ساعات. وفي هذه الحالة فإن تصحيح انحراف الجهاز يشمل في الوقت نفسه تصحيح تأثير المد والجزر.

أما **الطريقة الثانية:** فهي استخدام جداول المد والجزر. وتصحيح تأثير المد والجزر يمكن حسابه بعد إجراء التكرار الدوري للقياسات على نقطتين أو أكثر من محطات الجاذبية المطلقة أو الأساسية، واستخدام الرسم البياني للعلاقة بين تغير قيم الجاذبية الأرضية عند محطات تكرار القياسات وزمن القياسات أو باستخدام الحاسبات وبرامج خاصة بتقويم بيانات قياسات الجاذبية الأرضية. ويتيح استخدام الحاسبات وبرامج تقويم البيانات حساب قيم التصحيحات وحساب القيم الصحيحة للجاذبية الأرضية عند نقاط القياس. ويجري تقويم بيانات عجلة الجاذبية الأرضية قبل إجراء أي نوع آخر من التصحيحات.

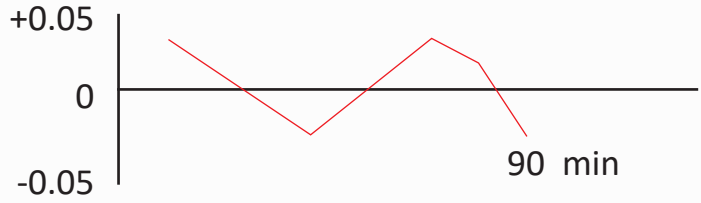
تؤثر تغيرات المد والجزر على كتلة مقياس الجاذبية (الجرافيميتر)، التي عادة ما تتغير في مدى 0.15 + مليجال من القيمة المتوسطة. ونظراً لأن هذه القيم تعتبر كبيرة بالنسبة لدقة معظم أجهزة قياس الجاذبية = (0.01)، لذلك يجب التصحيح. وبما أن

تأثيرات المد والجزر يمكن توقعها بدقة؛ لذلك من السهل عمل برامج حاسوبية تعطي القيم الدقيقة عند أي موقع في أي وقت.

2. تأثير انجراف الجهاز Drift

تعتمد قراءة الجرافيمتر عند أي نقطة على مقياسٍ مدرجٍ dial Scale، وتعتمد على العلاقة بالقيمة المطلقة للثقالة عند هذه النقطة. إذا نقل الجرافيميتر لبضع ساعات أو إن ترك في مكان واحد، ثم قُرأ مرة أخرى فيما بعد عند المكان نفسه، يُلاحظ تغير في القراءة. إذا أخذت قراءات إضافية عبر فترة من الساعات في المكان نفسه، ثم رسمت الجاذبية مقابل الزمن، سوف نجد أن النقاط تميل للسقوط على منحنى أملس. هذا التغير المستمر في قراءات الجاذبية مع الزمن يعرف بـ الإنجراف «drift»، ويحدث بناءً على حقيقة أن زنبرك الجرافيميتر ليس مرناً عاماً، ولكنه معرض لتغير بطيء عبر الفترات الطويلة.

الطريقة المعتادة لتصحيح الانجراف التدريجي هو تكرار القراءات عند محطة الأساس في فترات تتراوح بين ساعة إلى ساعتين. ثم من منحنى الانجراف نحصل على قراءة الأساس التي نطرحها من قراءة المحطة لنحصل على فرق الجاذبية.



تأثير انجراف الجهاز

بما أن جميع قراءات الجرافيميتر ذات تدريج عشوائي، لذلك تكون المعايرة ضرورية كي نعبر عن هذه التدريجات بالمليجال. الطريقة المعتادة لاختبار ثابت المعايرة هي قراءة الجرافيميتر عند محطتين يكون فرق الجاذبية بينهما معروفاً بدقة من قياسات البندول. بعد تصحيح الانجراف التدريجي، نحصل على فرق الجاذبية بين نقطة المشاهدة ومحطة الأساس، بضرب القراءة في معامل المعايرة للجرافيميتر. وبمعلومية الفرق في الجاذبية يمكن حساب الجاذبية المطلقة عند نقطة المشاهدة من الجاذبية عند محطة الأساس المعروفة.

3. المسافة بين المحطات

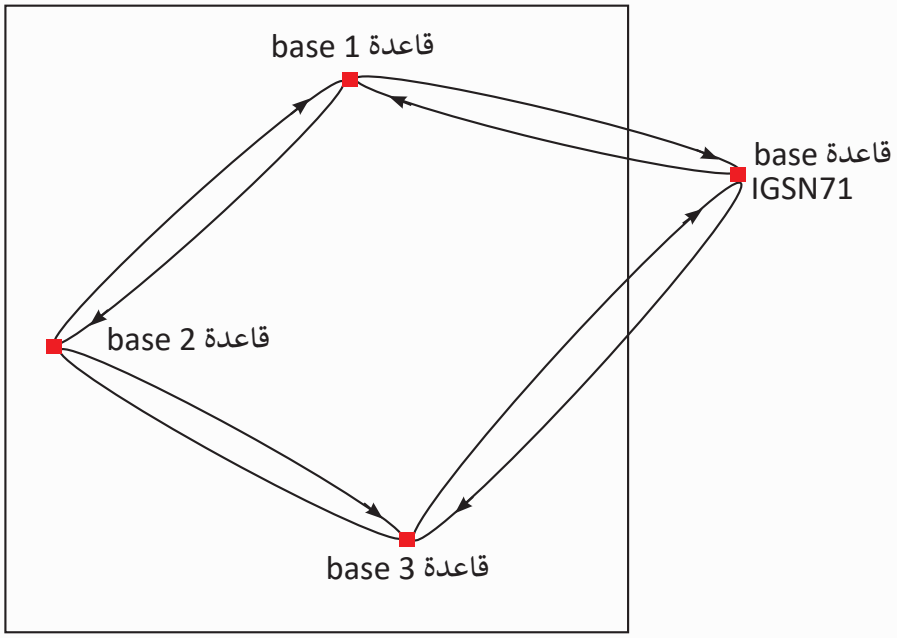
توزع محطات أجهزة الجاذبية (الجرافيمتر)، كلما أمكن، في أركان مربع. يعتمد اختيار طول الشبكة (S) أساساً على عمق البيانات الجيولوجية المطلوبة (H)، بحيث تكون ($S \leq H$). في المسوحات الواسعة، تتراوح (S) ما بين بضعة كيلومترات إلى عشرات الكيلومترات. أما في المدى الضيق فهي تتراوح ما بين 10 إلى 100 متر. وبالنسبة لاستكشافات البترول يكون المدى حوالي كيلومتر واحد، مع الحرص على تجنب وضع المحطات بالقُرب من المعالم الطبوغرافية التي قد تؤثر بشكل كبير على قراءات أجهزة الجاذبية (الجرافيميتر).

4. إنشاء محطة القاعدة

من المفضل عادة ربط قياسات الجاذبية بأخرى ذات جاذبية مطلقة معروفة بدقة، لذلك يجب أن نجد IGSN71 أو FGBS الأقرب محلياً، ثم ننسب القياسات إلى قيم IGSN71 أو FGBS بالرغم من أن ذلك ليس ضرورياً للمسوحات المحلية المحدودة، لأن هذه المسوحات تبحث عن تغيرات الجاذبية، ولكن بالنسبة للأغراض البحثية يفضل ربط المحطات بالـ IGSN71. لعمل ذلك، يُفترض معدل انحراف تدريجي خطي وفترات زمنية

بينية قصيرة، بحيث تدخل تغيرات المد والجزر في منحنيات الانحراف التدريجي كتغيرات خطية.

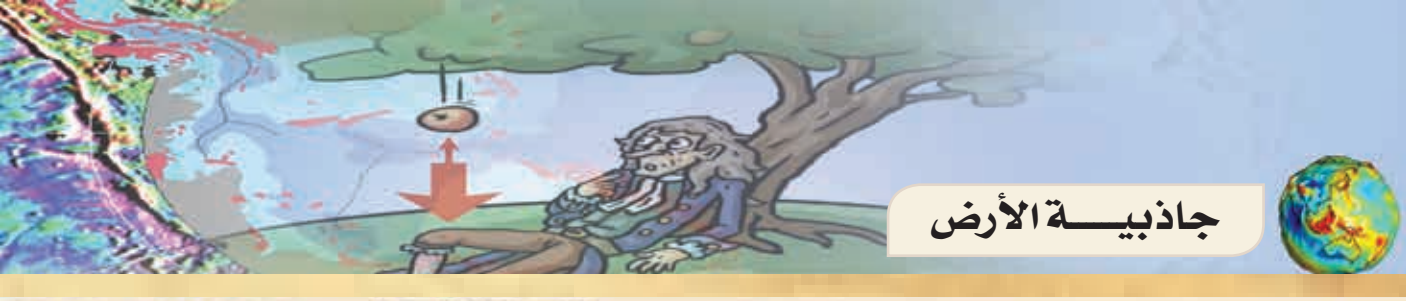
طريقة التكرار تبدأ عند محطة IGSN71، وبعد الحصول على قراءة هناك، تعتبر هي محطة القاعدة 1، ثم تتابع بالعودة إلى محطة IGSN. هذا التسلسل يعطي فروق الجاذبية النسبية بين المحطتين بعد تصحيح الانحراف التدريجي. وبما أن قيم الجاذبية المطلقة معروفة في محطة الـ IGSN71، إذاً، تُعرف القيمة المطلقة للجاذبية في محطة القاعدة 2. وهكذا نحدد قيمة الجاذبية المطلقة عند محطة القاعدة 3. في العملية النهائية، تُستخدم محطة القاعدة 3 لمعرفة قيمة المحطة الـ IGSN71. نادراً ما تكون هذه القيمة كالقيمة المنشأة أصلاً، والفرق بينهما هو مؤشر على كمية الخطأ في قياسات محطات القاعدة من 1 إلى 3.



إنشاء محطات القاعدة

5. تحديد الارتفاعات

يجب معرفة ارتفاع المحطات في مدى من 25 - 30 سم لكي تحتفظ قيم شاذات بوجير Bouguer بدقة أفضل من 0.1 مليجال. تبين الخرائط الطبوغرافية مواقع العلامات المرجعية (Benchmarks)، وهي نقاط ذات ارتفاع مقاس بدقة عالية جداً. العلامات المرجعية هي عبارة عن أنبوب إسطواني من النحاس الأصفر مثبت في قاعدة من الخرسانة، وهي تعتبر نقطة مرجعية للمسوحات المتنقلة. وهناك أيضا ما يعرف بنقاط الارتفاع، توضح على معظم الخرائط الطبوغرافية، وهي نقاط تم تحديد ارتفاعاتها. وبالرغم من أن هذه النقاط توضع في مواقع سهلة التعريف مثل تقاطع الطرق، إلا أن النقطة نفسها قد لا تُعرف في الحقل، مما قد يتسبب بخطأ كبير. حديثاً، اُستخدم نظام تحديد المواقع العالمي GPS لهذا الغرض .



تصحيح بيانات الجاذبية Gravity Data Correction

تتأثر الأرض بقوى التثاقل (التجاذب) من القمر والشمس، وعلى ضوء ذلك، يحصل لها تشوهات من فترة لأخرى. مما يترتب عليه تأثر قيم الجاذبية عند أي نقطة بهذه التشوهات. علاوة على ذلك، تتغير قيم الجاذبية من موقع لآخر. وتتغير القراءات أيضاً في الموقع نفسه. وهذا الفرق يعرف بشاذات الجاذبية، وتفسيره ضروري لمعرفة مكونات باطن الأرض. على ضوء هذه التغيرات تصحح قراءات الجاذبية الأرضية للعوامل التالية:

- **قوة جذب الأرض.**
- **قوة الطرد المركزي (تكون أعلى ما يمكن عند خط الاستواء).**
- **نصف قطر الأرض (عند خط الاستواء أكبر منه عند الأقطاب).**
- **شكل الكتل الأرضية وتغير طبوغرافية الأرض من موقع لآخر.**
- **موقع جهاز الرصد بالنسبة لمستوى سطح البحر.**
- **تغير كثافة الأجسام بين جهاز القياس ومستوى سطح البحر.**
- **الجذور خفيفة الكثافة للقارات والجبال العالية.**
- **الجذور العكسية Antiroots عالية الكثافة للمحيطات.**

بعد الانتهاء من إجراء قياسات الجاذبية الأرضية، ولمقارنة هذه القياسات مع قيم الجاذبية القياسية عند نقطة القياس، يلزم إجراء بعض التصحيحات على قيم الجاذبية الأرضية المقاسة قبل استخدامها في الأغراض العلمية البحثية والاقتصادية المختلفة. وتُجرى هذه التصحيحات للوصول بقيم الجاذبية الأرضية المقاسة إلى الدقة المطلوبة

لهذه الدراسات. وتهدف هذه التصحيحات إلى أولاً: التخلص من عدد من الظواهر المؤثرة في دقة القياسات. وثانياً: أخذ نسبة القياسات إلى مستوى معين من سطح الأرض كمرجع عام لتلك النوعية من القياسات. وتشمل ما يلي:

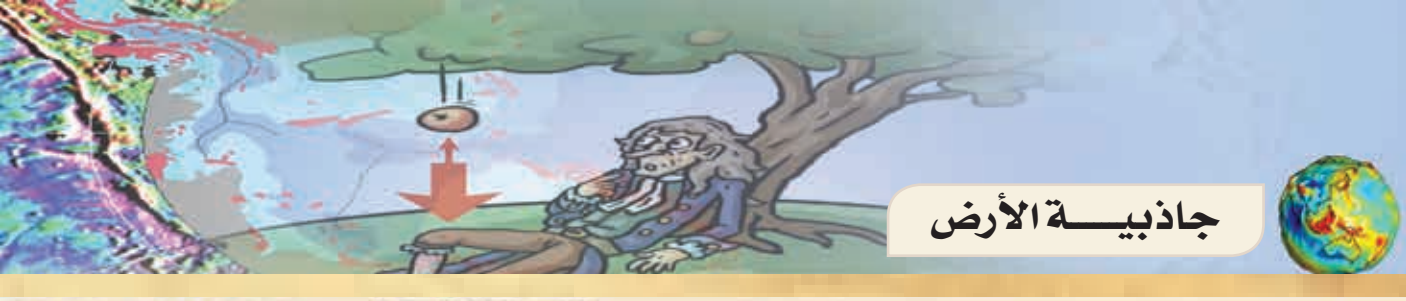
أولاً : تصحيحات لانحراف الأجزاء المرنة في أجهزة القياسات وتأثير المد والجزر، وهي تصحيحات يلزم إجراؤها قبل إرجاع قيمة الجاذبية الأرضية إلى المستوى المرجعي الثابت.

ثانياً : تصحيحات تساعد في حساب قيم الجاذبية الأرضية وإرجاع قيمها إلى مستوى ثابت تم اختياره لهذا الغرض، تصحيح (خط العرض – الهواء الحر – بوجير – التضاريس).

تصحيح خط العرض Latitude Correction

يعمل هذا التصحيح لإزالة زيادة الجاذبية من خط الاستواء إلى الأقطاب. تتغير الجاذبية مع خط العرض بسبب شكل الأرض الإهليجي، وبسبب السرعة الزاوية لأي نقطة على سطح الأرض، حيث تصل حدها الأعلى عند خط الاستواء، وتصل إلى الصفر عند الأقطاب.

- **ونتيجة التفلطح في شكل الأرض فإن عجلة الجاذبية عند القطبين تزيد عن قيمتها عند خط الاستواء بحوالي 5.17 جال، ويمكن تفسير هذا الاختلاف أو هذه الزيادة كما يلى:**
- **قوة الطرد المركزي التى تعمل عند خط الاستواء ويغيب تأثيرها عند الأقطاب، وهي تعمل على زيادة عجلة الجاذبية عند الأقطاب بحوالي 3.39 جال.**



- **أي نقطة عند الأقطاب هي أقرب إلى مركز الأرض من أي نقطة عند خط الاستواء، مما يؤدي إلى زيادة عجلة الجاذبية عند الأقطاب بحوالي 6.63 جال.**

- **بسبب معامل شكل الكتلة Mass-Shape Factor للأرض فإن جذب الأرض عند خط الاستواء يكون أكبر منه عند الأقطاب، مما يؤدي إلى نقصان عجلة الجاذبية عند الأقطاب بحوالي 4.85 جال.**

- **وبالتالي، فإن إجمالي التغير في عجلة الجاذبية عند القطب عنه عند خط الاستواء 3.39 + 6.63 – 4.85 = 5.17 جال.**

وكما سبق ذكره، هناك زيادة قدرها 21 كم في نصف القطر الاستوائي عنه عند الأقطاب، وبالتالي نجد أن النقاط القريبة من خط الاستواء أبعد من مركز الأرض عنها عند الأقطاب، مسببة زيادة في الجاذبية من خط الاستواء باتجاه الأقطاب. ومقدار الكتل الأرضية تحت المناطق الاستوائية هي أكبر منها تحت المناطق القطبية.

وعلى ضوء ذلك، نجد أن تصحيح خط العرض $0.812\sin 2\emptyset$ مليجال/ كم. هذا التصحيح يطرح أو يجمع لفرق الجاذبية المقاسة اعتماداً على موقع خط عرض المحطة من محطة القاعدة. **(يجمع التصحيح إذا كانت المحطة شمال محطة القاعدة، ويطرح إذا كانت المحطة جنوب محطة القاعدة)**.

$$^{\delta}g_L = - 8.108 \sin 2\emptyset \quad \text{g.u.per km N}$$

وفي هذا الصدد، فإن معادلة النظام الجيوديسي المرجعي لحساب عجلة الجاذبية عند أي خط عرض:

- معادلة **Helmert**

- $g = 978.030\ (1+0.005302\ \sin 2\phi - 0.00007\ \sin^2 2\phi)$

حيث ϕ هي قيمة زاوية خط العرض.

- المعادلة الدولية **International Formula (1930)**

$g = 978.05\ (1+0.0052884\ \sin 2\phi - 0.00005\ \sin^2 2\phi)$

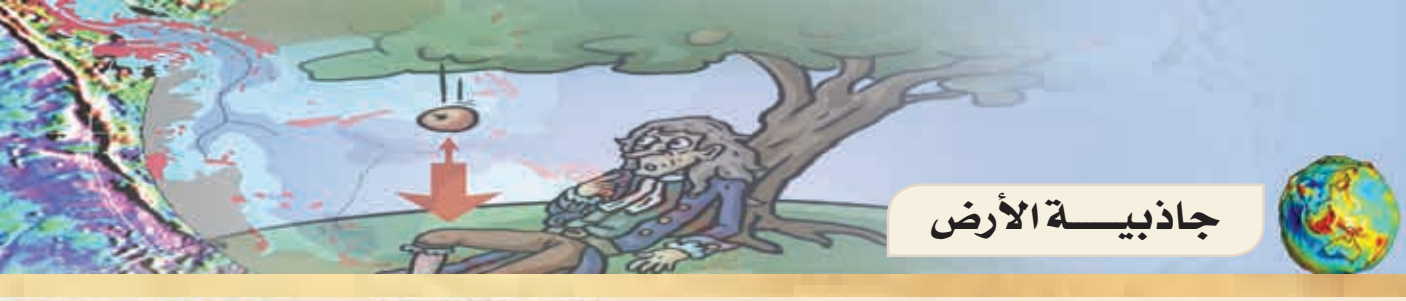
كما ذُكر سابقاً، فإن السطح المستوى الذي يمثل بهذه المعادلة للجاذبية يسمى السطح المكور أو مكور الأرض Spheroid

تصحيح الارتفاع (الهواء الحر) Elevation (Free-Air) Correction

تختلف قيمة التثاقلية (الجاذبية) مع الارتفاع وذلك لأن نقطة القياس الموجودة عند منطقة مرتفعة تكون أبعد عن مركز الأرض من نقطة القياس الموجودة في منطقة منخفضة، وبالتالي تزيد عجلة الجاذبية في النقطة الأولى عن قيمتها في النقطة الثانية. ويمكن حساب معدل هذا التغير كالتالي:

قيمة عجلة الجاذبية عند أي نقطة من السطح المكور أو مكور الأرض تساوي:

$g = GM/R^2$ حيث أن (g) هي عجلة الجاذبية و(M) هي كتلة الأرض و(R) هو نصف قطر الأرض و(G) هو ثابت الجذب.



وقيمة التغير الرأسي في قيمة عجلة الجاذبية في الاتجاه (z) تساوي:

$$dg/dz = dg/dR = -2GM/R = -2g/R$$

وبالتعويض عن قيمة عجلة الجاذبية $g = 980.629$ gals وقيمة نصف قطر الأرض $R = 6.367 \times 10^8$ cm نجد أن:

$$dg/dz = -2\ (980.629) / 6.367 \times 10^8 = -0.3086 \times 10^{-5}\ gal/cm = -0.3086\ mgal/m$$

وقد أخذ في الاعتبار لحساب قيمة هذا التصحيح؛ كروية الأرض وتجانسها، ووجد أن قيمة الجاذبية الأرضية تقل بمقدار 0.3086 مليجال/م، أي أنه يلزم إضافة تصحيح قدره $h \times 0.3086$ مليجال لقيمة عجلة الجاذبية الأرضية المقاسة، حيث (h) هي قيمة الارتفاع عن متوسط سطح البحر مقدرةً بالمتر.

يضاف تصحيح الهواء الحر إلى الجاذبية المقاسة إذا كان موقع المحطة فوق مستوى سطح البحر أو (السطح المرجعي أو محطة القاعدة)، وتطرح إذا كان العكس. ويتغير تصحيح الهواء الحر قليلاً مع تغير خط العرض من القيمة 0.3086 مليجال/م عند خط الاستواء إلى 0.3088 مليجال/م عند القطبين.

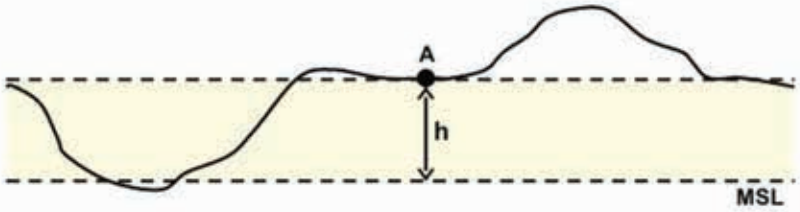
تصحيح بوجير Bouguer Correction

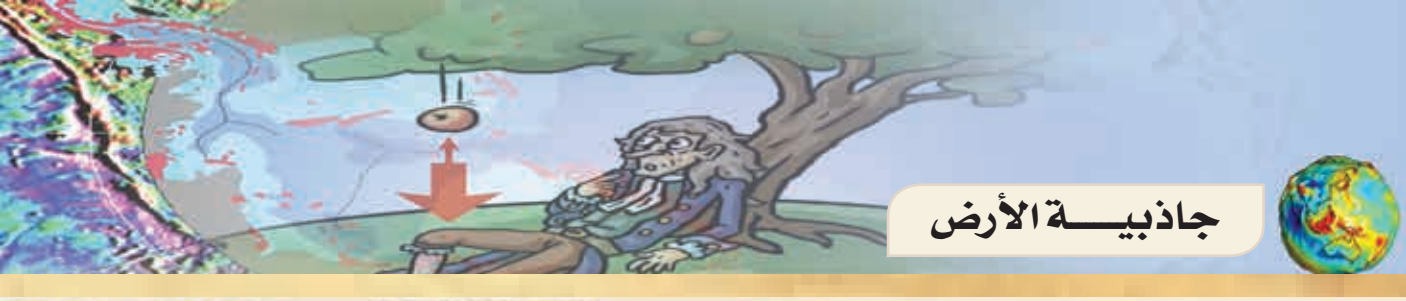
يهدف تصحيح بوجير إلى العودة بقيمة الجاذبية الأرضية المقاسة إلى قيمتها الحقيقية مع الأخذ في الاعتبار ثقل المادة الصخرية بين محطة القياس وسطح الجيوئيد (متوسط ارتفاع سطح البحر)، بالإضافة إلى تأثير الارتفاع نفسه. وقد سُمي هذا التصحيح بتصحيح بوجير نسبة إلى العالم الرياضي الفرنسي بيير بوجير (1698-1758م)، الذي حاول تعيين شكل الأرض. وتطرح قيمة التصحيح من القيمة المقاسة في حالة انخفاض محطة القياس عن سطح الجيوئيد. فهذا التصحيح يمثل قيماً سالبةً فوق المناطق الجبلية، وقيماً موجبةً في قيعان البحر، عكس تصحيح الهواء الحر.

في الاختلاف السابق (اختلاف الهواء الحر)، أُخذ في الاعتبار ارتفاع نقطة القياس فقط فوق سطح الأرض، ولكننا في الواقع لا نقيس عجلة الجاذبية فوق نقطة القياس ونحن معلقون في الهواء، ولكننا نرتفع صاعدين فوق تل أو جبل أو هضبة، ومادة هذه الأرض المرتفعة لها كتلة، ولها بالتالي قوة ثقل (جذب) لأسفل، وهذا ما يُسمى بتغير بوجير. ولحساب قيمة التغير في عجلة الجاذبية العائد لتأثير تلك الكتل التي تعلو سطح الأرض أو سطح المستوى المرجعي Datum، يُفترض أن هذه الكتلة هي شريحة من صخور ذات سمك (h)، وأن سطحها مستوٍ، وكثافة مادتها(ρ). إذاً، ثقل (جذب) تلك الشريحة من الصخور تساوي:

$$g = 2\pi Gh$$

$$g_B = + 0.04193 \times \rho \times h \quad \leftarrow \text{Bouguer slab formula}$$





وبالتعويض عن قيمة $G = 6.6732 \times 10^{8}$ إذن :

$$g = 0.04193\ h \text{ mgals/m} \quad \text{or} \quad 0.01278\ dh \text{ mgals/ft}$$

أي أن قيمة عجلة الجاذبية تزداد بقيمة 0.04193 مليجال لكل ارتفاع يعادل مترا واحداً من الصخور. أي أن تأثير بوجير يكون دائماً عكس تأثير الهواء الحر.

بعد إجراء تصحيحات البوجير، يمكن حساب ما يسمى شاذات البوجير، وذلك بطرح قيمة عجلة الجاذبية القياسية من قيمة عجلة الجاذبية الأرضية المقاسة بعد إجراء كل من تصحيحي الهواء الحر والبوجير. كما يمكن إنشاء خرائط تسمى خرائط البوجير. وتستخدم هذه الخرائط في أغراض دراسات وبحوث وتطبيقات علم الجاذبية الأرضية.

تصحيح الارتفاع ($^{\delta}g_E$) = (الهواء الحر - تصحيح بوجير)

$$^{\delta}g_E = {}^{\delta}g_F - {}^{\delta}g_B.$$

Substituting in the terms $^{\delta}g_F = 3.086h$ and $^{\delta}g_B = 0.4192\rho h$

$$^{\delta}g_E = (3.086 - 0.4192\rho)\ h \text{ (g.u.)}$$

where ρ is the average rock density in Mg/m^3.

تصحيح التضاريس Terrain Correction

لإجراء قياسات دقيقة لعجلة الجاذبية الأرضية، ينبغي وضع تصحيح قيمة عجلة الجاذبية الأرضية المقاسة بالنسبة لطبوغرافية المنطقة المحيطة في الاعتبار. ويسمى تصحيح التضاريس. ومن الضروري إجراء هذا التصحيح للوصول بقياسات عجلة الجاذبية الأرضية إلى دقة عالية تتطلبها بعض الدراسات. وتأتي أهمية هذا التصحيح،

أن تصحيح البوجير تكون عالية نسبياً في حالة قُرب محطات قياس الجاذبية الأرضية من الوديان، وذلك لاشتمال تصحيح البوجير على جذب المادة الصخرية. وحيث أن المادة الصخرية غير موجودة، فإنه يلزم إضافة تصحيح التضاريس لإلغاء جذب المادة الصخرية. أيضاً في محطات القياس القريبة من الجبال تكون قيمة الجاذبية الأرضية المقاسة أصغر من قيمتها الحقيقية، وبالتالي فإنه يلزم إضافة تصحيح التضاريس للحصول على القيمة الصحيحة.

ويجري حساب تصحيح التضاريس باستخدام نظام خاص، يُمكّن من حساب متوسطات الارتفاعات من الخرائط الطبوغرافية ومن استخدام معادلات خاصة. ويضاف تصحيح التضاريس لقيمة تصحيح البوجير. ثم يتم إنشاء خرائط البوجير بعد إجراء هذه التصحيحات.

تصحيح إيتفوش EOTVOS

عندما يثبت جهاز قياس الجاذبية على ظهر سفينة أو طائرة مروحية، يتأثر تسارع الجاذبية التي تقاس بالمركبة الرأسية للتسارع (كوريوليس) Coriolis، الذي هو دالة في السرعة واتجاه حركة المركبة. ولمعادلة ذلك، تضبط بيانات الجاذبية بتطبيق تصحيح إيتفوش Eotvos، والتي سميت على اسم مخترعها الفيزيائي فون إيتفوش Von Eotvos الذي وصف تأثيرها في نهاية الثمانينات من القرن الماضي.

هناك مركبتان لهذا التصحيح، الأولى: تسارع طرد مركزي تعمل للخارج مصاحبة لحركة العربة أثناء سفرها فوق السطح المنحني للأرض، والثانية: هي التغير في تسارع الطرد المركزي الناتج عن حركة العربة بالنسبة لحركة دوران الأرض حول محورها. في

الحالـة الثانيـة، فـإن الجسـم الثابـت علـى سـطح الأرض يسـير بسـرعة الأرض عنـد هـذه النقطـة، ويـدور حـول محـور دورانهـا في اتجـاه شـرق - غـرب. إذا انتقـل هـذا الجسـم تقـل سـرعته في اتجـاه الشـرق (X)، وتزيـد سـرعته بالنسـبة للسـرعة الدورانيـة بالقيمـة نفسـها. وبالعكـس إذا انتقـل بسـرعة (Y) في اتجـاه الغـرب، تقـل سـرعته النسـبية بالقيمـة نفسـها. وبالتالـي، أي نقـلٍ لجهـاز الجاذبيـة الـذي لـه مركبـة في اتجـاه شـرق - غـرب، يكـون لـه تأثيـر كبيـر علـى قيـاس الجاذبيـة. أمـا بالنسـبة لأجهـزة قيـاس الجاذبيـة المنقولـة علـى السـفن، فيكـون تصحيـح ايتفـوش Eotvos في حـدود 350 g.u. أمـا بالنسـبة لأجهـزة قيـاس الجاذبيـة المنقولـة جـواً، حيـث تزيـد السـرعة عـن 90 km/h (حوالـي 50 عقـدة knots)، قـد يصـل تصحيـح إيتفـوش Eotvos إلـى 4000 g.u.

التفسير الوصفي والكمي لمعطيات الجاذبية

يهدف التفسير الجيولوجي لشاذات الجاذبية الأرضية إلى التعرف على سمك وعمق وكثافة التراكيب الجيولوجية المسببة لهذه الشاذات، فضلا عن الوحدات الحركية (التكتونية) السائدة. وينقسم التفسير الجيولوجي لشاذات الجاذبية الأرضية إلى: تفسير وصفي وتفسير كمي.

يقوم التفسير الوصفي لشاذات الجاذبية الأرضية على وصف الشاذات ومدلولاتها الجيولوجية من حيث:

- **هيئة وشكل الشاذات وامتدادها الإقليمي والمحلي والتراكيب الجيولوجية التي قد تمثلها.**
- **تغير قيم شاذات الجاذبية الأرضية والتراكيب الجيولوجية التي يحتمل وجودها.**

أما التفسير الكمي لشاذات الجاذبية الأرضية فيقوم على تحديد وتعيين نوعية التراكيب الجيولوجية المسببة لهذه الشاذات من الصدوع وأحواض الترسيب.. وخلافه. ولإجراء هذا النوع من التفسير يجب أن يوضع في الاعتبار عنصران مهمان يتميز بهما مجال الجاذبية الأرضية وهما:

- **مجال الجاذبية الأرضية عند نقطة هي محصلة لجميع التراكيب تحت السطحية التي تؤثر في هذا المجال، والتي يتم رصدها بأجهزة قياس الجاذبية الأرضية.**
- **لا يوجد حل أوحد يمكن الحصول عليه من تغير شاذات الجاذبية الأرضية.**

تعـرف شـاذة التثاقليـة Gravity Anomaly في الدراسـات الجيوديسـية بأنهـا الفـرق بـين قيـم الجاذبيـة المقاسـة عنـد محطـة مـا، وقيمـة الجاذبيـة النظريـة حسـب المعادلـة الدوليـة عنـد خـط عـرض تلـك النقطـة. وعلـى ضـوء الهـدف مـن الدراسـة، هنـاك نوعـان مـن شـاذات الجاذبيـة:

1. شاذة الهواء الحر Free Air Anomaly

شـاذة الهـواء الحـر = قيمـة الجاذبيـة المحسـوبة – الجاذبيـة النظريـة + تصحيـح الهـواء الحـر.

2. شاذة بوجير Bouguer Anomaly

شـاذة بوجيـر = قيمـة الجاذبيـة المحسـوبة – الجاذبيـة النظريـة + تصحيـح الهـواء الحـر – تصحيـح بوجيـر + تصحيـح التضاريس.

عمومـاً، فـإن شـاذة الهـواء الحـر هـي أصغـر مـن شـاذة بوجيـر. وشـاذة بوجيـر على اليابسـة في معظـم الأحيـان تكـون قيمهـا سـالبة، وفي المحيطـات موجبـة. شـاذة الهـواء الحـر تعطـي معلومـات جيـدة عـن الجاذبيـة الفعليـة علـى سـطح الأرض، في حـين أن شـاذة بوجيـر تعطـي معلومـات عـن الكتـل تحـت السـطحية.

وللحصـول علـى نتائـج مرضيـة مـن تفسـير شـاذات الجاذبيـة الأرضيـة، فإنـه يلـزم فصـل مجـال الجاذبيـة الأرضيـة إلـى: مجـال إقليمـي Regional؛ يمثـل التراكيـب الجيولوجيـة العميقـة والتـي لهـا امتـداد اقليمـي، ومجـال محلـي Residual أو Local؛ يمثـل التراكيـب الجيولوجيـة ذات الامتـداد المحلـي والتـي تتواجـد غالبـا في الطبقـات الرسـوبية للقشـرة الأرضيـة. ولفصـل مجـال الجاذبيـة الأرضيـة تُسـتخدم طـرقٌ مختلفـة (يعتمـد بعـض منهـا علـى تسـوية خطـوط

الكنتور) على خرائط أو قطاعات الجاذبية، ويعتمد البعض الآخر على طرق رياضية وإحصائية. ويلزم الإشارة هنا إلى أن مجالات الجاذبية الأرضية المفصولة تختلف وتتباين تبعاً للطريقة المستخدمة واختلاف الافتراضات والمعطيات. ويجري تحليل كل من المجالين الإقليمي والمحلي كل على حِدة لدراسة التراكيب الجيولوجية الإقليمية والمحلية على الترتيب.

أيضاً، يجب الاستعانة بالبيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية المتاحة كافة، للحصول من خلال تفسير شاذات الجاذبية الأرضية، على نتائج تمثل بدرجة من الدقة التراكيب الجيولوجية المسببة لهذا المجال. وينقسم التفسير الكمي لمجال الجاذبية الأرضية إلى **قسمين: الأول** منهما يشتمل على تطبيق عدد من طرق التحليل لشاذات الجاذبية الأرضية مع البيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية المتوفرة للحصول منها على عمق وسمك وامتداد التراكيب الجيولوجية تحت السطحية، ويسمى بالتفسير المباشر لشاذات الجاذبية الأرضية. أما **القسم الثاني**: فيقوم على مقارنة شاذات الجاذبية الأرضية المحسوبة لعدد من الأشكال المنتظمة وغير المنتظمة، والتي يمكنها أن تمثل التراكيب الجيولوجية التي يحتمل تواجدها تحت السطح، مع شاذات الجاذبية الأرضية المقاسة، ويسمى ذلك بالتفسير غير المباشر لشاذات الجاذبية الأرضية.

الضغط المتوازن (إيزوستاسي) Isostasy

عندما خلق الله سبحانه وتعالى القارات، بدأت على هيئة قشرة صلبة رقيقة تطفو على مادة الصهير الصخري، فأخذت تميد وتضطرب، فخلق الله الجبال البركانية التي كانت تخرج من تحت تلك القشرة، فترمي بالصخور خارج سطح الأرض، ثم تعود فتثقله إلى الأرض، وتتراكم بعضها فوق بعض مكونة الجبال، وتضغط بأثقالها المتراكمة على الطبقة اللزجة، فتغرس فيها جذوراً من مادة الجبل، فيكون الجذر سبباً لثبات القشرة الأرضية وإتزانها. قال تعالى: ﴿أَلَمْ نَجْعَلِ ٱلْأَرْضَ مِهَٰدًا ۝٦ وَٱلْجِبَالَ أَوْتَادًا ۝٧﴾ [النبأ]. تشير الآية إلى أن الجبال أوتاد للأرض. ومن المعروف أن جزءاً بسيطاً من الوتد يظهر على السطح، والجزء الآخر يكون في معظمه تحت السطح. لقد أثبتت الدراسات العلمية الحديثة أن للجبال جذوراً تمتد داخل المناطق عالية الكثافة لضمان ثباتها واستقرارها.

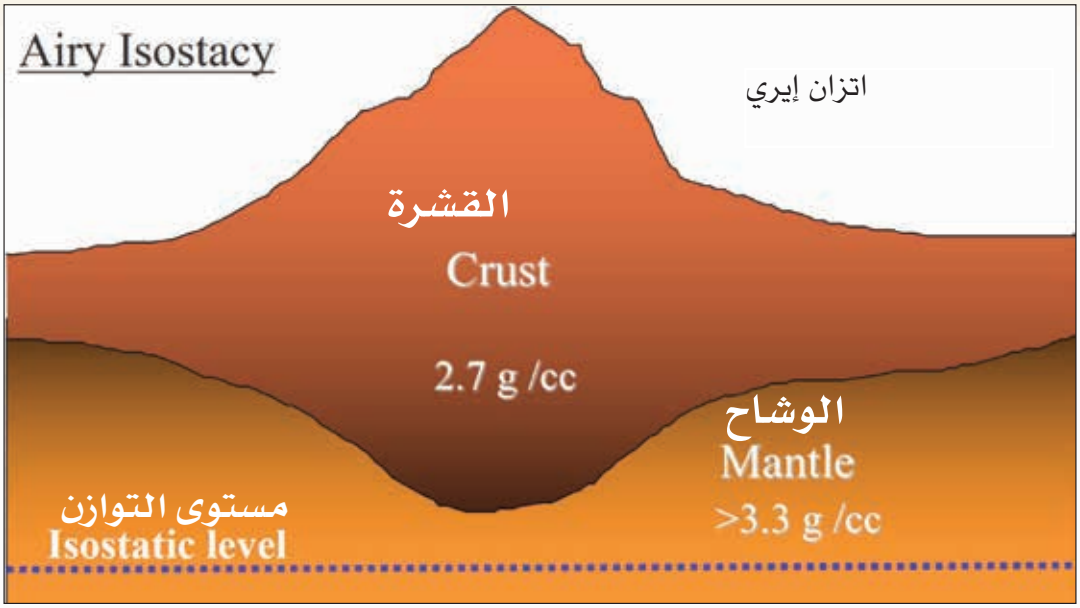
يتلخص مفهوم اتزان القشرة الأرضية في أن أي كتلة تعلو سطح البحر يجب أن تُعادل بنقص في الكتلة تحت سطح البحر وتحت قيعان المحيطات، فالقشرة التي هي أخف كتلة من المعتاد، يجب أن يكون أسفلها كتلة أكبر من المعتاد، بحيث يكون تأثير الوزن الكلي على وحدة المساحة منتظماً، ليتوفر التوازن عند أي عمق تحت الغلاف الصخري. وقد قدم كل من إيري Airy وبرات Pratt تفسيراً علمياً لحالة توازن القشرة الأرضية.

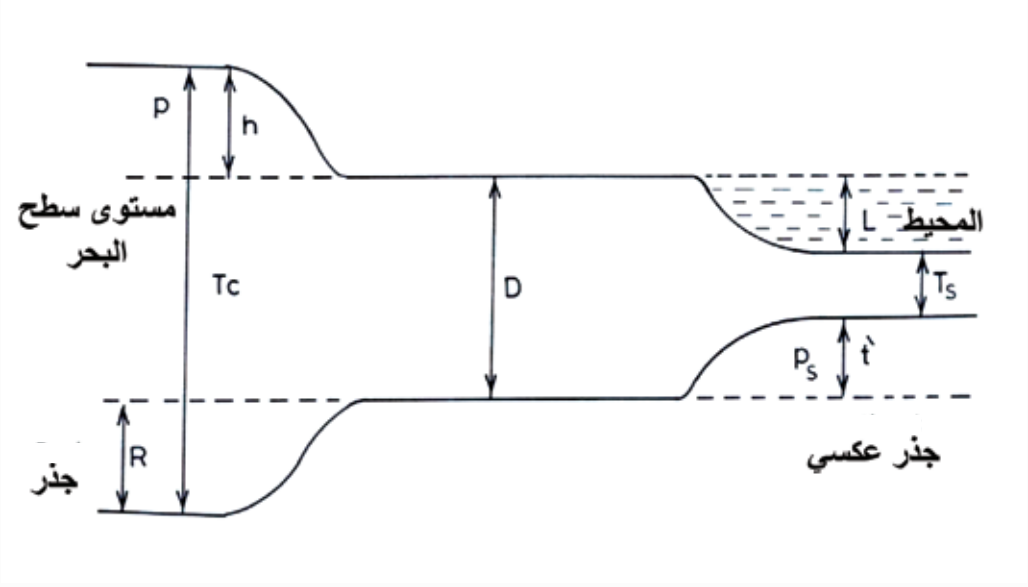
أصبحت نظريتا إيري وبرات (1855م) حقيقة ملموسة مع تقدم المعرفة بتركيب الأرض الداخلي عن طريق انعكاس وانكسار الموجات الزلزالية. فقد أصبح معلوماً أن للجبال جذوراً مغروسة في الإعماق قد تصل إلى 8 أضعاف ارتفاعها فوق سطح الأرض، أو 5 أضعافها بالنسبة للمحيطات أو البحار. قال تعالى ﴿وَأَلْقَىٰ فِي ٱلْأَرْضِ رَوَٰسِيَ أَن تَمِيدَ بِكُمْ﴾[النحل 15] وقال تعالى: ﴿وَجَعَلْنَا فِي ٱلْأَرْضِ رَوَٰسِيَ أَن تَمِيدَ بِهِمْ﴾ [الأنبياء 31].

وكما تُثَبتُ السفن بمراسيها التي تغوص في الماء، كذلك تُثَبتُ قشرة الأرض بمراسيها الجبلية التي تغوص جذورها في طبقة لزجة، شبه سائلة، تطفو عليها القشرة الأرضية.

نظرية إيري - هسكانين Airy's Theory (1855)

تفترض هذه النظرية أنه كلما كان ارتفاع الجبل عالياً كلما كان عمق الجذر كبيراً. وكذلك فإن المناطق الجبلية البارزة لها جذور إلى الداخل في شكل بروز الجبل، والبحار لها جذور إلى أعلى في شكل عمق البحر. اقترح إيرى Airy أن القشرة الأرضية هي غلاف صلب يطفو فوق طبقة تحت سطحية شبه سائلة ذات كثافة عالية. وتحت الجبال يغوص قاع القشرة الأرضية في هذه الطبقة تحت السطحية أكثر مما هو تحت الأرض التي هي في مستوى البحر، ويكوّن ما يسمى بالجذر. في حين أن قيعان المحيطات تعلو قطاعات رقيقة من القشرة الأرضية. كما هو موضح في الشكل أدناه، والذي يبين مقترح إيرى Airy.


Airy Isostacy
اتزان إيري
القشرة
Crust
2.7 g /cc
الوشاح
Mantle
>3.3 g /cc
مستوى التوازن
Isostatic level


P
h
مستوى سطح البحر
Tc
D
L
المحيط
Ts
Ps
t`
R
جذر
جذر عكسي

نظرية إيري

وبتطبيق نظرية إيري Airy في المناطق الجبلية نجد أن:

$$\rho\, h = (\rho s - \rho)\, R$$

حيث تمثل (ρ) كثافة صخور القشرة و(ρs) كثافة الصخور البازلتية الأكثر كثافة والتي تقع تحت المحيطات و(R) سمك الجذور تحت الجبال و(h) ارتفاع الجبال.

وفي حالة المحيطات تصبح المعادلة على النحو التالي:

$$(\rho - 1.03)\, h = (\rho s - \rho)\, t`$$

حيث (t`) تمثل سمك جذور المياه

ولحساب عمق التوازن في المناطق الجبلية (TC)

$$TC = h + D + R$$

وعمق التوازن في المناطق البحرية (TS)

$$TS = D - t` - L$$

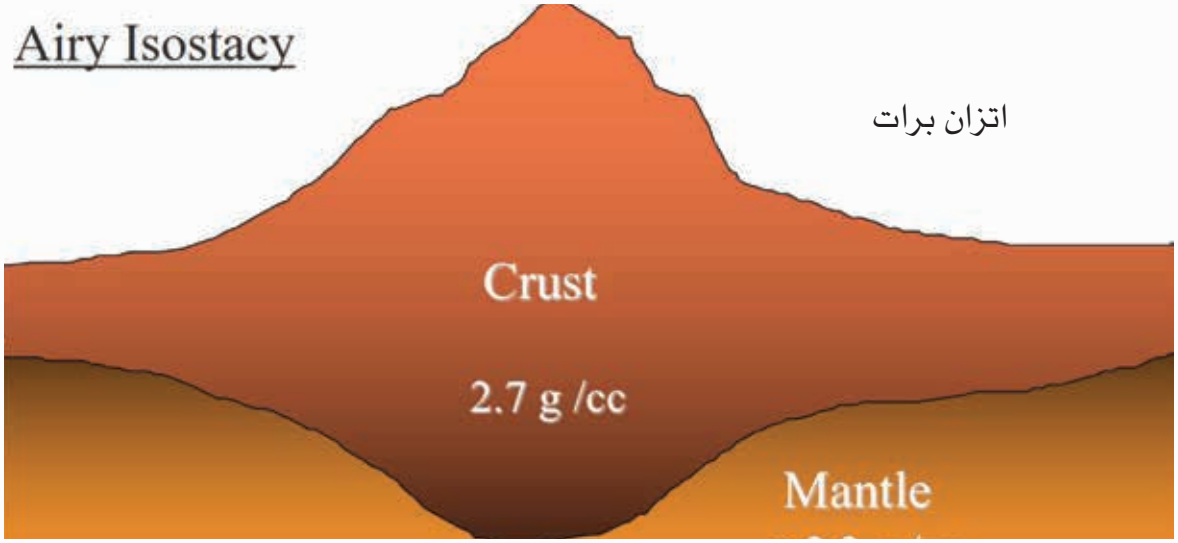
حيث (L) عمق المحيط

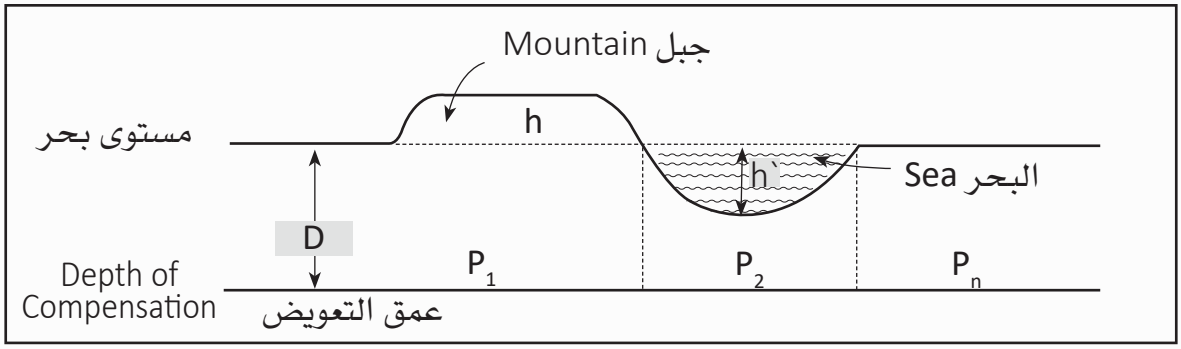
نظرية برات (1855) Pratt's Theory

تفترض نظرية برات أنه كلما أزداد ارتفاع الجبال فوق سطح الأرض قلت كثافتها بسبب ارتفاع درجة الحرارة في باطن الأرض. ونظراً لاختلاف الكثافة تنشأ الكتل الجبلية وعند عمق معين، يُعرف بعمق التوازن، تتوازن الكثافات والضغوط.

اقترح برات Pratt أن الكتلة الزائدة للجبال فوق سطح البحر تتوازن بنقص في الكتلة تحت سطح البحر. ولكنه افترض أن القشرة الأرضية لها سمك منتظم (تحت سطح البحر) مع قاعدتها في أي مكان يسند وزناً منتظماً على وحدة المساحة. وتحت الجبال، هذه الشروط تتطلب نقصاناً في كثافة الصخور الأرضية، وتحت المحيطات، يتطلب أن

تكون كثافة الصخور أكبر من المتوسط لتتوازن مع ماء المحيط ذي الكثافة الأقل من العادي. انظر الشكل التوضيحي التالي الذي يبين مقترح برات Pratt، يوضح الشكل أدناه مقترح برات.





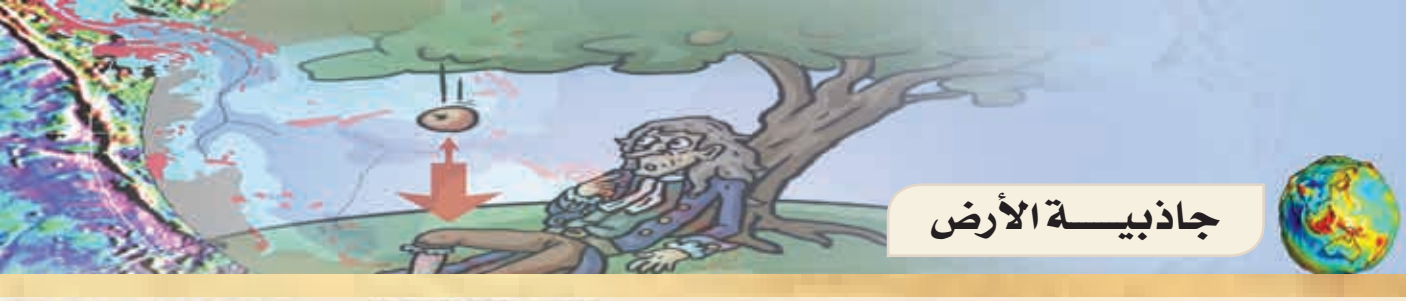
نظرية برات

وعلى ضوء هذه النظرية، نجد أن كثافة الكتل الأرضية تساوي 2.67 جم/سم^3، تحت الجبال، و3 جم/ سم^3 تحت المحيطات، وأن كثافة مياه البحار= 1.03 جم/ سم^3، وارتفاع الجبال فوق مستوى سطح البحر (h)، وعمق البحار (h`)، وعمق التعويض (D)، نجد أن:

$$h\ (\ 2.67\ )\ =\ D\ (\ 3\ -\ 2.67\ )$$

ويمكن حساب عمق التعويض (D) تحت المحيطات حسب نظرية Pratt

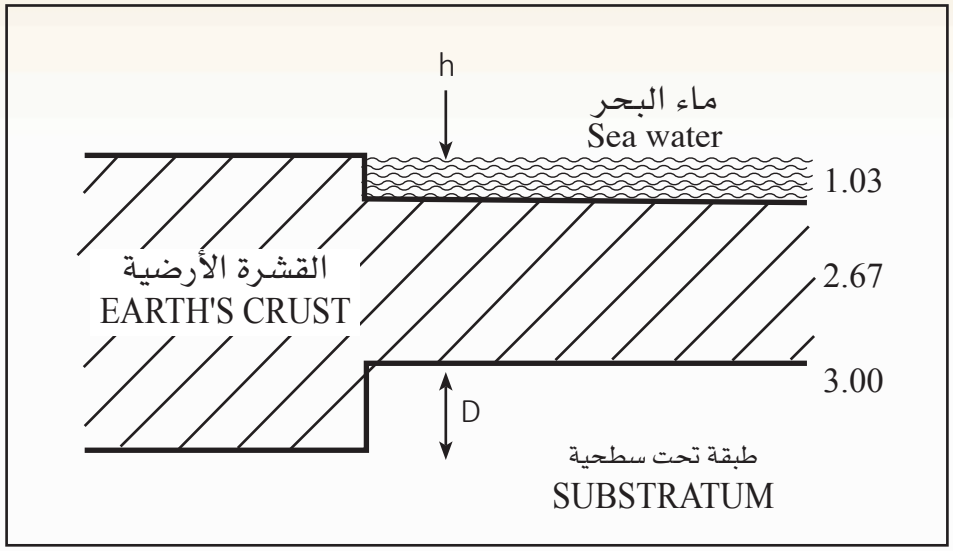
$$h`\ (2.67 - 1.03\ )\ =\ (\ 3 - 2.67\ )\ D$$



حساب عمق التعويض Depth of Compensation

من المتعارف عليه أن قيم الجاذبية المحسوبة عند أي محطة تتأثر بقوة جذب وكثافة الكتل الجبلية. وتزداد كثافة الكتل الجبلية تحت المحيطات والمكونة في الغالب من صخور بازلتية عنها تحت القارات والمكونة في الغالب من صخور جرانيتية. ويفترض التصحيح المتوازن أن الكتل الأرضية متوازنة وثابتة رغم النتوءات البارزة في بعضها كالجبال وفي الأعماق مثل المحيطات، ولكن هناك وعلى عمق 100 - 115 كم تقريباً تحت سطح الأرض، يوجد المستوى الذي تتوازن فيه كل التأثيرات رغم اختلاف كثافة المكونات فوق هذا المستوى حتى سطح الأرض، وأطلق عليه عمق التعويض (D) Depth of Compensation، فعلى سبيل المثال؛ لو افترضنا أن صخور القشرة الأرضية ذات الكثافة (2.67) جم/ سم^3، وهي تطفو على مواد أكثر كثافة (3.0) جم/سم^3، كما هو موضح بالشكل أدناه ارتفاع الجبال فوق سطح الأرض (h)، نجد أن العمق الذي تتوازن عنده الكتل تحت القارات يعادل تقريباً 8 أضعاف ارتفاع الجبال فوق سطح الأرض.

$$D = 2.67 / (3.0 - 2.67) \sim 8\ h$$



يوضح حساب عمق التعويض

أما بالنسبة لحساب عمق التعويض تحت المحيطات، فنجد أن كثافة مياه البحار تساوي (1.03) جم/سم^3، وفرق الكثافة بين مياه البحار وصخور القشرة تحسب على النحو التالي، كما في الشكل أعلاه : $D = (2.67 - 1.03) / (3.0 - 2.67) \sim 5\ h$

نستنتج من ذلك أن عمق التعويض تحت المحيطات = 5 h ، وتحت القارات = 8 h. فلو كان معدل عمق المحيطات في العالم = 4 كم تقريباً، فإن هذا يعني أن سمك القشرة المحيطية يجب أن تكون أقل سماكة من القشرة القارية بمقدار 20 كم على الأقل.

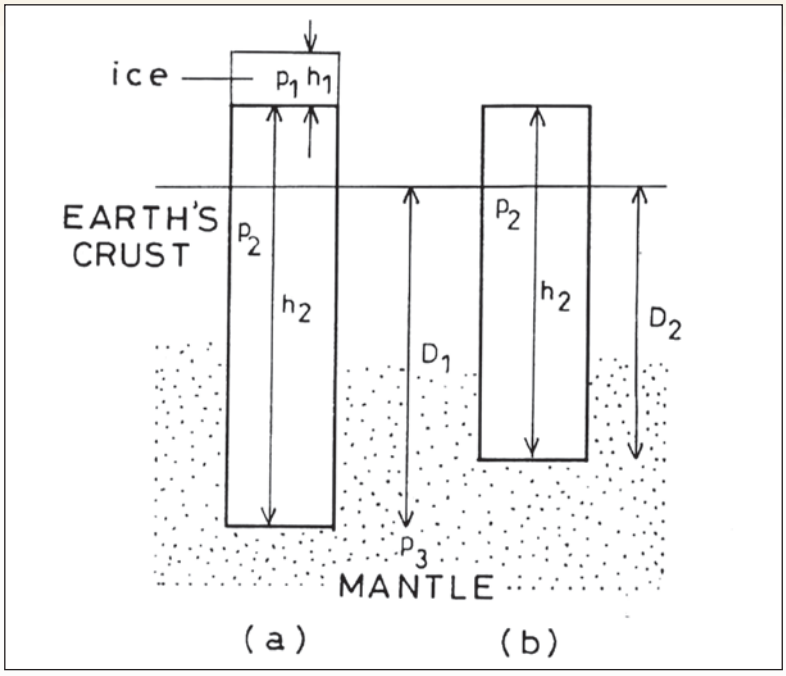
ولو افترضنا أن قشرة الأرض هي في وضع اتزان في الحالتين الموضحتين في الشكل المرفق، الأولى: مع وجود كتلة جليدية، والأخرى بدون كتلة جليدية، فإننا نجد:

في الحالة الأولى: وجود كتلة جليدية.

$$\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 = \rho_3 D_1$$

في الحالة الثانية: بدون كتلة جليدية

$$\rho_2 h_2 = \rho_3 D_2$$



حساب عمق التعويض مع وجود كتلة جليدية (a) وبدون كتلة جليدية (b)

وبطرح المعادلتين السابقتين نجد أن

$$\rho_1 h_1 = \rho_3 (D_1 - D_2)$$

وبالتالي فإن سمك الكتلة الجليدية

$$h_1 = \rho_3 (D_1 - D_2) / \rho_1$$

$(D_1 - D_2)$ تمثل كمية رفع الأرض.

يتضح مما سبق أهمية تصحيح الجاذبية للضغط المتوازن isostasy لحساب الشكل والحجم الحقيقي للأرض.

مفهوم الجاذبية من المنظورين الإسلامي والأوروبي

العلمـــــــاء العرب والمســـــــلمون

اصطلح العلماء العرب والمسلمون على تسمية الجاذبية بـ(الميل الطبيعي)، وهي كما نلاحظ متأثرة بالاصطلاح الأرسطي، إلا أنّهم لم يقفوا عند حدود المصطلح أو الفلسفة اليونانية الرامية إلى تفسير وفهم ظاهرة الجاذبية، بل أعملوا فيها عقولهم ومنطقهم، الذي تميز بالمنهجية العلمية والتجريبية الأقرب إلى عقلية غاليليو ونيوتن، وقد درس هذه الظاهرة مجموعةٌ كبيرةٌ من العلماء والمتكلمين، في محاولة منهم لفهمها، مستخدمين من أجل ذلك كل الأمثلة الممكنة في عصرهم.

ونضم صوتنا إلى صوت الباحث قدري طوقان الذي قال: «نحن لا ندعي بأن العرب أو (غيرهم) وضعوا الجاذبية وقوانينها وما إليها في الشكل الرياضياتي الطبيعي الذي أتى به نيوتن، إنما جل ما في الأمر أن العرب أخذوا فكرة الجذب عن اليونان وزادوا عليها ووضعوا بعض القوانين لسقوط الأجسام، ثم أتى بعد ذلك نيوتن وأخذ ما عمله غيره في هذا المضمار وزاد عليه، وبفضل ما وهبه الله من العبقرية وما اتصف به من المثابرة والثبات استطاع أن يضع الجاذبية بالشكل الذي نعرفه مما لم يسبق إليه، ولا شك أن له في ذلك فضلاً كبيراً جداً، ولكن هذا لا يعني تجريد العرب ومن قبلهم اليونان من الفضل، فلواضع الأساس في علم من الفضل ما للمكتشف أو للمخترع فيه» (طوقان، 1934م).

قال إبراهيم النظّام: إنّ كلّ شيء قد يداخل ضده وخلافه؛ فالضد هو المانع الفاسد لغيره... وزعم أن الخفيف قد يداخل الثقيل، ورب خفيف أقل كيلاً من الثقيل وأكثر قوة منه، فإذا داخله شغله- يعني أن القليل الكيل، الكثير القوة يشغل الكثير الكيل، القليل القوة (الفيومي، 2010م) - وهو هنا يربط بين كمية المادة وقوة ثقلها، وهذه إشارةٌ مهمةٌ، لأنه ثمة مواد ذات حجم صغيرٍ وثقلٍ كبيرٍ، وأي مادة تمزج معها تكسبها خصائصها الثقالية، وهو يردّ بذلك على حالة التناقض التي افترضها أرسطو، بأنّه لا يمكن إجراء المداخلة بين الجسمين الثقيل والخفيف. إذاً فقد لاحظ النظّام هذا التناقض قبل غاليليو الذي سبق وذكرنا أنه اعترض عليه بمثال ربط حجرين أحدهما خفيف والآخر ثقيل.

لقد سعى الكندي لإثبات صيغ القوانين التي تحكم سقوط الأجسام، وهو موضوع لم يلق من علماء العرب كثير اهتمام، ويقول إن له كتاباً (في قوانين التجاذب) (عبدالباقي، 1991م)، لكننا لم نعثر عليه لنبحث في مضامين تلك القوانين، وتعتقد زيغريد هونكه أنّ هذا الكتاب قد أهمل ولم يحظ باهتمام المترجمين إلى اللاتينية (هونكه، 1981م). ومما يلفت إليه الانتباه أنه ربط من خلال رسائله بين حركة القمر وحركة المد والجزر (الكندي، 1950م)، واعتقد بوجود أثرٍ متبادلٍ فيما بينهما، فهو كما نعلم حالياً يقلل من دوران الأرض حول نفسها، وهو ما يجعل اليوم على كوكبنا يدوم 24 ساعة بعد مرور 4.6 مليار سنة، بينما كان اليوم 20 ساعة فقط قبل مليار سنة، ولو لم يوجد القمر نهائياً لكان اليوم على الأرض لا يزيد عن 8 ساعات، تسطع فيه الشمس من 3-5 ساعات فقط (كومنس، 1997م). كما تحدث الكندي عن حركة الأرض والماء «وإنّ حركة الأرض والماء المكانية الطبيعية هي إلى وسط الكل» (الكندي، 1950م). وفي هذا إشارة إلى أنّ الأرض والماء تنجذب إلى مركز كلٍ من الماء والأرض.

يـرى الباحـث محمـود شـلتوت أنّـه يعـزى لأحـد أولاد موسـى بـن شـاكر (أو إلـى أبيهـم) القـول «بالجاذبيـة العامـة» بـين الأجـرام السـماوية ممـا يربطهـا بعضهـا ببعـض. وأنّ الجاذبيـة الأرضيـة عقـل الأجسـام تقـع علـى الأرض (شـلتوت، 2009م). بمعنـى أنّهـم بحثـوا في سـقوط الأجسـام، وأنّهـم أدركـوا وجـود قـوة تجـاذب فيمـا بينهـا تختلـف عـن مادتهـا (عبـد الباقـي، 1991م).

تنـاول مؤلـف مجهـول (يعتقـد المؤرخ بـول كـراوس أنّـه مـن أهـل حـران الموجودين في بغـداد) في كتـاب (الروابيـع) المنسـوب لأفلاطـون مسـألة قـوة الجذب بين الشـمس والقمـر ومحاولـة تفسـير ظاهـرة المـدّ والجـزر اعتمـاداً علـى وجـود قـوى جـذب علويةٍ، ونجـد في هـذا الكتـاب حواريـة بـين شـخص اسـمه أحمـد وأفلاطـون، الأمـر الـذي يعنـي أن واضعـه عربـي وليـس مترجمـاً عـن اليونانيـة: «قـال أفلاطـون: وعنـد انتدابـك في العمـل فاسـتعن في التحليـل بالقمـر، وفي التصعيـد بالشـمس إلـى أن قـال: فـإن أثرهمـا يظهـر.

قال أحمد: الذي أنبأك به قول له فيه وفي سائر آرائه مذهب أنا مخرج لك جمله، فلنبدأ ببعض ما أتي به بعض تلامذة الشيخ أفلاطون: فمنهم غلوقن فيقول: إن من رأي الأوائل أن ما بين الاجتماع والاستقبال القوة للقمر، وبين الاستقبال والاجتماع القوة للشمس. فكلّ أمرٍ من الأمور التي يستولي عليها هذين الكوكبين يكون الأثر للكوكب في أوان قوته واستيلائه أكثر. فيقول الفيلسوف: إنّ الاختيار لأوان التحليل بعد الاجتماع، والتعقيد بعد الاستقبال. وقد تكلم في هذا النوع تلامذة الشيخ وأكثروا القول وخطّأوا الفيلسوف في رأيه هذا. وذلك أنّهم رأوا أن القوة تنجذب إلى العلو بعد الاجتماع أكثر منه بعد الاستقبال؛ واحتجوا في ذلك بالمد والجزر وغير ذلك من القوى الطالبة للعلو» (بدوي، 1997م).

إذاً الغاية من هذه الحوارية الخيالية بين أحمد وأفلاطون أنّ ظاهرة المد والجزر تزداد عندما يحدث ما يسمى بعلم الفلك (الاجتماع) بين جرمين وأكثر مع الأرض، كأن تصبح الشمس والقمر والأرض على خط مستقيم واحد، عندها، وهذه حقيقة صحيحة، يصبح المدّ أعظمياً فيجذب مياه البحار والمحيطات للأعلى على أحد طرفي كوكب الأرض، في حين أنه يحدث مدٌّ أعظمي على الطرفين الآخرين، وهو ما يؤكد أثر الجاذبية المتبادل بين الأرض والقمر.

تكلم ثابت بن قرة الحراني عن الجاذبية قائلاً: «إنّ المَدرة تعود إلى أسفل، لأنّ بينها وبين كلية الأرض مشابهةٌ في الأعراض من البرودة واليبوسة والكثافة، والشيء ينجذب إلى مثله، والأصغر ينجذب إلى الأعظم، وإلى المجاور الأقرب قبل انجذابه إلى مجاوره الأبعد» (أبو خليل وآخرون، 1996م). ومن هذا النص نلاحظ إدراك ثابت بن قرة لعدة عوامل تتعلق بالجاذبية، وهي تعدّ إضافة مهمة على ما طرحه السابقون نوردها فيما يأتي:

- **أن الأجسام ذات الوزن النوعي الأثقل من وزن الهواء النوعي تنجذب من فوق إلى تحت؛ كما هو حال المدرة (قطعة الطين اليابس).**
- **ينجذب الجسم الصغير إلى الكبير (أي لا بد من وجود جسمين).**
- **ينجذب الجسم إلى الأقرب ويتأثر به أكثر من انجذابه للجسم البعيد (الارتباط بالمسافة).**

لكن ثابت لم يضعنا بصورة العلاقة بين هذه العوامل من جهة، وما هي علاقتها بقوة التأثير المتبادل فيما بينها من جهة أخرى، ولو فعل لكانت قفزة نوعية باتجاه قانون الجاذبية العام قبل أن يعلن عنه نيوتن.

وقال ثابت بن قرة في شرحه لسبب ميل الأجزاء الثقيلة المتجانسة فيما بينها من جميع الجوانب هو «طلب كل جزءٍ موضعاً يكون فيه قربه من جميع الأجزاء قرباً متساوياً إذ عنده ميل المدرة إلى السفل ليس لكونها طالبة للمركز بالذات بل لأن الجنسية منشأ الانضمام، فقال: لو فُرِضَ أنّ الأرض تقطعت وتفرقت في جوانب العالم ثم أطلقت أجزاؤها لكان يتوجه بعضها إلى بعض ويقف حيث يتهيأ تلاقيها» (الحلي، (د.ت)). وهي فرضيّةٌ مهمّةٌ جداً، تسبق فرضيّة لابلاس في شرح كيفية تشكل الأجرام السماوية المعروفة بالفرضية السديمية.

تحدث أبو القاسم ابن خرداذبة (توفي 300هـ/913م) بشكلٍ عام عن وجود الجاذبية الأرضية، وقد شبَّه قوة التصاقنا بالأرض بماثل في تأثيره قوة التصاق المغناطيس الجاذب للأجسام الحديدية. يقول: إنّ «بنية الخلق على الأرض أنّ النسيم جاذب لما في أبدانهم من الخفة، والأرض جاذبة لما في أبدانهم من الثقل، لأنّ الأرض بمنزلة الحجر الذي يجتذب الحديد» (ابن خرداذبة، 1898م). وليس علينا فهم النص على أنّه إشارة إلى حقل الجاذبية الأرضية الذي يماثل الحقل المغناطيسي المتولد حوله، والذي يشد إليه كل من يقع فيه، وإنّما كان يقصد بها حالة التجاذب الكائنة بين جسمين أحدهما يشد الآخر.

وقد تناقل عدد من العلماء والجغرافيين العرب مقولة ابن خرداذبة هذه؛ إذ نجدها مكررةً لدى ابن الفقيه (كان حياً عام 290هـ/903م) في كتابه (مختصر كتاب البلدان)، وعند أبو عبد الله المقدسي (توفي 390هـ/1000م) في كتابه (أحسن التقاسيم في معرفة الأقاليم).

كان أبو علي الجُبَّائي (الأب) يقول – كما قالت المعتزلة – إنّ الثقل هو الثقيل والخفة هي الخفيف و«إنما يكون الشيء أثقل بزيادة الأجزاء» (الأشعري، 1950م). وقوله هذا كان رداً على بعض من قال بأنّ الثقل غير الثقيل والخفة غير الخفيف، مثل أبو الحسين الصالحي، الذي اتفق معه أبو هاشم الجُبَّائي (الابن) الذي قال بأن الثقل عَرَضٌ يحلُّ في الجسم فيصبح ثقيلاً، كما يحل اللون أو الحرارة بالجسم (البغدادي، 1928م). وقول أبو علي بأن الثِقَلُ هو الثقيل، والخِفّة هي الخفيف، أي الثقل مادة الشيء، ومادة الشيء هي الشيء نفسه (فروخ، 1969م).

بالوقوف على عبارة أبو علي (أثقل بزيادة الأجزاء) نجد أنّه لم يكن يقصد بها الزيادة الحجمية فحسب، وإنما الزيادة الوزنية أيضاً، مما يزيد من كثافة الجسم (خشيم، 1968م). ونعلم نحن حالياً من وجود ارتباط بين كتلة الجسم وثقله (أو وزنه). وهي فكرة من الأفكار النظرية التي عولجت من قبل المتكلمين العرب والمسلمين، وتستحق الذكر وتكاد تقترب كثيراً من فهمهم لحقيقة الكتلة قبل نيوتن، ويعتقد أبو علي الجبائي أن الرطوبة واليبوسة عاملان مؤثران على مقدار الثقل والخفة، فقد كان يرى: «أنّ موجب الثقل هو الرطوبة وموجب الخفة اليبوسة». والدليل على ذلك- بحسب رأيه- هو أنّ الرطوبة كامنةٌ في الجسم الثقيل ويخلو منها الجسم الخفيف، فالذهب، وهو جسم معروف بثقله بالنسبة للخشب، إذا صُهر ذاب وظهرت رطوبته التي كانت موجودة فيه قبل أن يعرض للنار، أما الخشب فبسبب خلوّه من الرطوبة ييبس ويتكلس ويتحول إلى رماد، فالنار تزيده يُبساً بإفناء الرطوبة القليلة الموجودة فيه. وقد أنكر أبو هاشم نظرية أبيه وقال: إنّ الخفة والثقل «كيفيتان حقيقيتان» في الذهب والخشب (الإيجي، 1997م).

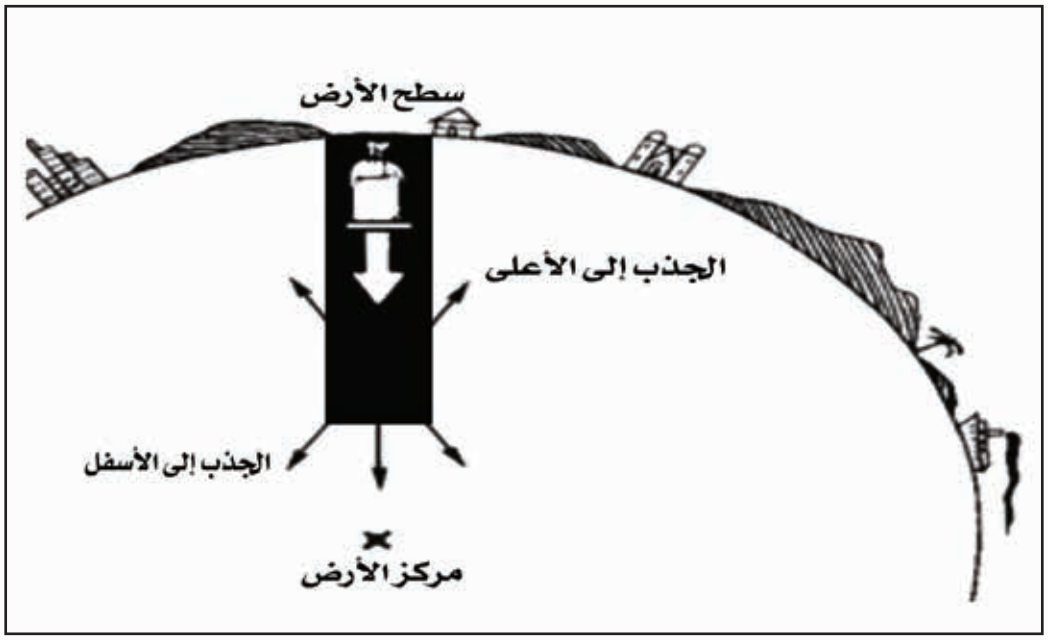
يعود أبو بكر فيذكر المثال الذي تكلم عنه ثابت بن قرة دون أن يقدم لنا رأياً جديداً في ذلك؛ فيقول: «إننا إذا رمينا المدرة إلى فوق فإنّها ترجع إلى أسفل فتصلنا، إن فيها قوةً تقتضي الحصول في السفل حتى إذا رميناها إلى فوق أعاد تلك القوة إلى أسفل» (الرفاعي، 1973م).

طرح عبد الله بن أحمد الكعبي في أمثلته وتجاربه مثال التفاحة قبل نيوتن، لكن ليس لإثبات الجاذبية بل لتأكيد مغالطةٍ تنفي مبكراً قانون الجاذبية الأرضية. يقول الكعبي: «لو أنّ رجلاً قبض على تفاحة في الهواء بإصبعه، ثم باعد بإصبعه عنها تهوي إلى الأرض، قال: وليس يشك أنّ إبعاد إصبعه منها، هو المولد لها لذهابها نحو الأرض، وهذا المولد هو حركة عن الجسم وليس حركة إليه» (الخيون، 1997م). فهو يحاول أن يثبت أنّ الحركة التي نشأت ليست بفعل الجاذبية الأرضية للتفاحة وإنّما نتيجة إبعاد الأصابع وتولّد حركةً ذاتيةً للجسم.

ويكشف لنا ابن مثويه عن قولٍ في منتهى الدقة كان أبو القاسم قد توصل إليه يوضح العلاقة بين الجسمين الخفيف والثقيل، وخضوعهما لتأثيرٍ واحد حتى في الخلاء، فقال: «وقد فرّق أبو القاسم بين الخفيف والثقيل فقال: إنَّ الخفيف تصح حركته على هذا الحد، ومنعه في الثقيل، ولو قيل إنّ الأمر بالعكس من ذلك لكان قريباً، فإنك إذا رميت الخفيف لم تجد سرعة حركته كسرعة حركة الثقيل، والمانع الذي في الجو يمنع الخفيف بأكثر من منعه الثقيل، ولا وجه يمكن الإشارة إليه يمنع من توالي الحركات في الثقيل إذا كانت الأحوال سليمة ولا عارض في الجو، والذي لأجله يقع الفصل بين نزول الخفيف والثقيل هو الهواء الذي في الجو، **وإلا فلولاه لكنا إذا أرسلنا حجراً وريشةً ينزلان معاً، إلا**

أنّ الهواء مانع للخفيف من النزول، والثقيل يُخرقه، هذا هو الصحيح في علة ذلك عند شيوخنا - رحمهم الله - وإن كان أبو هاشم (الجبائي) قد استبعده» (ابن مثويه، 1975م). وفي هذا النص دليلٌ قاطعٌ على معرفة العلماء العرب والمسلمين بتساوي سقوط الأجسام كلها في حقل الجاذبية الأرضية، مناقضين بذلك أرسطو وسابقين كل من غاليليو ونيوتن أيضاً في تجربته في الأنبوب المخلّى من الهواء التي وضع فيها قطعة معدنية وريشةً بخمسمائة عام على الأقل. وقد أجريت تجربة إلقاء ريشةٍ ومطرقةٍ على سطح القمر من قبل رواد رحلة الفضاء أبولو15 في عام 1971م. وتأكد لهم ذلك فعلاً.

ناقش أبو هاشم الجبائي (الابن) مسألة سقوط الجسم تحت سطح الأرض بفعل ثقله؛ لكن اعتباراً من سطح الأرض نحو مركزها، وليس من الهواء نحو سطح الأرض، وهي حالةٌ جديدةٌ لم تدرس من قبل، إلا أنها ستعود للظهور مع نيكول أوريسم في أطروحته عن (الكون والسماوات). قال أبو هاشم: «ويلزم لو فعلنا في الأرض خرقاً وأرسلنا فيه حجراً أن يقف ولا يذهب مع أن ما فيه من الثقل موجب الهوي» (ابن مثويه، 1975م). لكنه لم يوضح هل الخرق يصل نحو الطرف الآخر من الأرض أم يقف عند مركزها تماماً؟ فالجاذبية يقل تأثيرها على الجسم عندما ينزل أو يرتفع عن سطح الأرض، وتبلغ قيمتها العظمى عند السطح.



يوضح الشكل الحالة التي تكلم عنها أبو هاشم الجبائي حيث توقع أن ينعدم أثر الجاذبية عليه كلما غاص الجسم أكثر تحت سطح الأرض (بيرلمان، 1977م). في حين أنّ الجسم يخضع في هذه الحالة لنوعين من الجذب ناتجٌ عن طبقات الأرض الداخلية والخارجية (لانداو، 1978م). أي يظهر لدينا جذب إلى الأعلى وآخر نحو الأسفل.

اهتم ابن الحائك، أبو محمد الحسن بن أحمد بن يعقوب بموضوع الجاذبية، وهو يقرّر بأنّ النار تتحرك «إلى فوق والهواء متموج يمنةً ويسرةً على وجه الأرض، والماء يتحرك ويسير سفلاً، والأرض واقفةً راكدةً لذا كانت أكثر من الثلاثة قبولاً، وكان تأثير الأجرام العلوية والعناصر السماوية فيها أكثر، وكانت على ما فاتها من الأجسام أغلب وأشد جذباً من الهواء والماء من كل جهاتها؛ فهي بمنزلة حجر المغناطيس الذي تجذب قواه الحديد إلى كل

جانبٍ» (الهمداني، 1983م). فهو يشير إلى خاصية الجاذبية المحيطية للأرض، ويماثل بينها وبين جاذبية المغناطيس، كما سبق وفعل **ابن خرداذبة**، وفي سياق حديثه عن الأرض وما يرتبط بها من أركانٍ ومياهٍ وهواءٍ نجد الهمداني يقول: «فمن كان تحتها (تحت الأرض) فهو في الثبات في قامته كمن فوقها، ومسقطه وقدمه إلى سطحها الأسفل، كمسقطه إلى سطحها الأعلى، وكثبات قدمه عليه، فهي بمنزلة حجر المغناطيس، الذي تجذب قواه الحديد إلى كل جانب، فأما ما كان فوقه فإن قوته وقوة الأرض تجتمعان على جذبه... فالأرض أغلب عليه بالجذب لأنّ القهر من هذه الحجارة لا يرفع العلاة (السندانُ) ولا سفله الحداد» (الهمداني، 1983م). وذلك ينبهنا إلى أنّ الجاذبية قوةٌ كائنةٌ بين الجسمين، لكنّ الأكبر منهما حجماً وكتلةً هو من يشدّ الآخر إليه، وجميع من عليها يشعرون بالاستقامة في وقوفهم على سطحها، سواء كانوا في جنوب الأرض أو شمالها.

يبدو أنّ هذه الأفكار المبكرة كان مكتوب لها أن تطمس على أيدي اللاتين الأوربيين عندما انتقلت إليهم لجهلهم بحقيقتها، فهذا معلم الكنيسة لاكتاتيتوس Lacteatus يتساءل مستنكراً: «هل هذا من المعقول؟ أيعقل أن يجنّ الناس إلى هذا الحد، فيدخل في عقولهم أنّ البلدان والأشجار تتدلى من الجانب الآخر من الأرض وأنّ أقدام الناس تعلو رؤوسهم؟» (هونكه، 1981م).

وهو ما قد يفسر لنا سبب تأخر حركة الاستكشاف الجغرافي؛ فعندما فكر كريستوف كولومبس أن يعبر المحيط الأطلسي كان الكثير من الناس يعتقدون أن الأرض منبسطة فقالوا إن كولومبس سوف يسقط فور وصوله لحافتها ولم يعلموا أن الأرض كروية.

ينقل لنا ابن طاهر المقدسي تفسير ظاهرة المد والجزر لدى اليونانيين دون أن يبيّن لنا رأيه الخاص في الظاهرة، فيقول: «واختلفوا في المدّ والجزر فزعم أرسطاطاليس أنّ علة ذلك من الشمس؛ إذا حرّكت الريح فإذا ازدادت الرياح كان منها المد، وإذا نقصت كان عنها الجزر وزعم طيماوس أن المد بانصباب الأنهار في البحر، والجزر بسكونها وزعم بعضهم أنّ ذلك المد بامتلاء القمر والجزر بنقصانه» (المقدسي، (د.ت))، ويقصد «بامتلاء القمر» طور البدر.

تكلم أبو بكر بن بشرون (كان حياً عام 390هـ/ 1000م) عن تمركز قوة الثقل في مركز الأرض وعن إحاطة هذه القوة، التي يسميها بالروحانية الماسكة، بأية قوى أخرى، فقال في ذلك: «والرصاص حجر، ثلاث قوى مختلفة الشخوص ولكنها متشاكلةٌ ومتجانسةٌ، فالواحدة روحانية نيرة صافية وهي الفاعلة، والثانية نفسانية وهي متحركة حساسة، غير أنّها أغلظ من الأولى ومركزها دون مركز الأولى، والثالثة قوةٌ أرضيةٌ حاسةٌ قابضةٌ منعكسةٌ إلى مركز الأرض لثقلها، وهي الماسكة الروحانية والنفسانية جميعاً والمحيطة بهما» (ابن خلدون، 1988م). هذه الفكرة ستعود للظهور مع أفكار إخوان الصفا، لدى محاولة تفسيرهم لمفعول التأثير عن بعد.

تناول إخوان الصفا مسألة قوى الجذب بين الأجرام السماوية المختلفة، كما تحدثوا عن الجاذبية الأرضية. فنراهم يستعرضون أقوال من سبقهم: «اعلم أنّ سبب وقوف الأرض وسط الهواء ففيه أربعة أقاويل:

- **منها ما قيل إنّ سبب وقوفها هو جذب الفلك لها من جميع الجهات بالسوية، فوجب لها الوقوف في الوسط لما تساوي قوة الجذب من جميع الجهات.**

- **ومنها ما قيل إنه دفع الفلك لها من كل الجهات مثل ذلك، فوجب لها الوقوف في الوسط لما تساوت قوة الدفع من جميع الجهات.**
- **ومنها ما قيل إن سبب وقوفها في الوسط هو جذب المركز لها بجميع أجزائها من جميع الجهات إلى الوسط، لأنه لما كان مركز الأرض مركز الفلك أيضاً وهو مغناطيس الأثقال يعني مركز الأرض، وأجزاء الأرض لما كانت ثقيلةً فانجذبت إلى المركز، وسبق جزء واحد وحصل في المركز، وقف باقي الأجزاء حولها، يعني حول النقط، يطلب كل جزء منها المركز فصارت الأرض بجميع أجزائها كرة واحدة بذلك السبب.**
- **والوجه الرابع ما قيل في سبب وقوف الأرض في وسط الهواء هو خصوصية الموضع اللائق بها» (إخوان الصفا، (د.ت)).**

وما ذكروه كان قد ورد في نظرية أرسطو وبطليموس أنّ الأرض مركز الكون وأنّها ثابتة والكل من حولها يسبحون، ولذلك فهي تتعرض لقوى جاذبة من قبل ما يحيط بها من كل الجهات، كما أنها تؤثر بمركزية ثقلها على كل ما يحيط بها. كما نجد أنّهم يعتنقون الرأي الأرسطي بأنّ «الأجسام وهي في أمكنتها الطبيعية الخاصة لا توصف بالخفة أو الثقل، فإذا ما خرجت من أمكنتها وصفت بالثقيلة إن كانت حركتها نحو مركز الأرض، وبالخفيفة إن كانت حركتها نحو المحيط، ولعل الثقل والخفة تكونان أيضاً بسبب الموانع التي تعوق الجسم من أن ينتظم في مكانه الطبيعي، فيقع التنازع، ويكون على أشده في مركز الأرض وأضعفه في المحيط» (إخوان الصفا، (د.ت)).

أي أنّ الخفة والثقل تظهر في الجسم بحسب الجهة التي يتوجه نحوها، فإذا كانت نحو المحيط للأعلى فهو خفيف، وإذا كانت نحو الأسفل كان ثقيلاً.

ثم يعرج إخوان الصفا إلى الحديث عن الثقل مرةً أخرى فيقولون: «وأما الثقل والخفة في بعض الأجسام، فهو من أجل أنّ الأجسام الكليّات كل واحد له موضعٌ مخصوصٌ، ويكون واقفاً فيه لا يخرج إلاّ بقسر قاسر، وإذا خُلّي رجع إلى مكانه الخاص به، فإن منعه مانعٌ وقع التنازع بينهما، فإن النزوع نحو مركز العالم يسمى ثقيلاً، وإن كان نحو المحيط يسمى خفيفاً، وقد بينا في رسالة السماء والعالم كيفية ذلك» (إخوان الصفا، (د.ت)).

وقد عثرنا على نص على غايةٍ من الأهمية موجود في الرسالة السادسة من الجسمانيات الطبيعيات، الذي يتناول ماهية الطبيعة يقول فيه إخوان الصفا: «إنّه ينبثّ من جرم الشمس قوة روحانية في جميع العالم، فتسري في أفلاكه وأركان طبائعه ومولداتها، في جميع الأجساد الكلية والجزئية، وبها يكون صلاح العالم وتمام وجوده وكمال بقائه» (إخوان الصفا، (د.ت)).

ويؤكدون أن هذه القوة الروحانية- التي سبقهم بالحديث عنها ابن بشرون ويمكننا تفسيرها بحقل الجاذبية حاليًا - تصدر عن كل الأجرام السماوية، وكونهم يعتقدون بصحة نظرية مركزية الأرض السائدة، فقد افترضوا أن هذه القوة الروحانية يجب أن تلتقي في نقطة واحدة هي مركز الأرض كونها مركز الكون: «وهكذا ينبثّ من كلّ كوكبٍ من الثوابت قوة روحانيةٌ تسري في جميع جسم العالم من أعلى الفلك الثامن الذي هو الكرسي الواسع إلى منتهى مركز الأرض» (إخوان الصفا، (د.ت)).

حتى نفهم مقصدهم أكثر سنبحث في معنى (القوة الروحانية) أكثر، وهو مصطلح شائع الاستخدام كثيراً في رسائلهم، فقد ذكروه لدى حديثهم عن صفات

الصوت والضوء في الرسالة 17 من الجسمانيات الطبيعيات بقولهم: «ثم إنّ لكل صوتٍ صفةً روحانيةً تختص به خلاف صوت آخر..» (إخوان الصفا، (د.ت)).

وكذلك لدى حديثهم عن انتقال الضوء في الهواء يذكرون أنّه يجب «أن تعلم أنّ جسم الهواء شريفٌ، وهو متوسطٌ بين الطرفين، فما هو فوقه ألطف منه وهو النور والضياء، وما هو أكثف وهو الماء والتراب، ولما كان الهواء أصفى من الماء وألطف وأشرف جوهراً وأخف حركةً، صار النور يسري فيه ويصبغه بصبغته ويودعه روحانيته، لأنّه قاربه وجانسه بما فيه من اللطافة» (إخوان الصفا، (د.ت)).

وبذلك يكون معنى (الروحانية) التي استخدموها هو الشيء اللطيف غير المرئي الذي ينبعث من جرم أو جسم ويؤثر في جسم أو جرم آخر بعيد أو قريب منه، وقد وضحوا معنى «اللّطافة» عندما تكلموا عن الحرارة فهم يقصدون بها المقدرة على النفوذ في الأجسام فقالوا: «ومن الصور المتممة لذات النار اللطافة التي تولّدها الحرارة، وتتلوها سرعة النفوذ في الأجسام» (إخوان الصفا، (د.ت)). وهو المعنى القريب جداً أيضاً من تعريف جابر بن حيان للروح بقوله: «الروح هو الشيء اللطيف الجاري مجرى الصورة الفاعلة» (جابر بن حيان، 1935م). إلا أن تعريف إخوان الصفا يتضمن مفهوم التأثير عن بعد والتأثير ضمن مجال أو حقل قوة والقدرة على النفوذ في الأجسام، وحسبنا أن هذا هو جوهر مفهوم الحقل أو المجال.

من ناحية أخرى نجد أن ربط إخوان الصفا بين (القوة) و (الروحانية) له دلالته؛ فكما نعلم أنّ مفهوم القوة لديهم يعني ما هو غير محسوس أو مجسّد أو غير مدرك بالحواس بحسب المعنى الأرسطي للكلمة، وليس بالمعنى الفيزيائي الحديث.

إذاً؛ يصبح معنى (القوة الروحانية) كمصطلح مركّب: الشيء اللطيف الخفي الذي له أثرٌ عن بعد، وقد ظهر هذا المعنى تماماً لدى حديثهم عن النفس الكلية فذكروا أنها «فاضت من العقل» وأن لها «قوتين ساريتين في جميع الأجسام» وأنه تؤثر بالشخص «بحسب قبول شخص تأثيراتها» (إخوان الصفا، (د.ت)).

لنعتبر أن ما طرحوه من باب «الفرضية النظرية أو الكلامية» المصاغة بمصطلحاتهم الخاصة، لكن أليس قريباً جداً من الواقع الحقيقي اليوم؟! وألا يستحق النظر منّا والتأمل أن يقال مثل هذا الكلام منذ ألف سنةٍ بمثابة محاولة لتفسير الارتباط الكائن بين الشمس وبقية الأجرام؟!

لقد كان ينقصهم التعبير الرياضياتي ليدعم فكرتهم، كما فعل ماكسويل عندما نجح في التعبير عن خطوط الحقل المغناطيسي التي افترض وجودها الفيزيائي التجريبي فاراداي بأنها متجهات، مستفيداً قبل ذلك من أعمال اللورد كلفن.

ولو سألنا نيوتن نفسه الذي صاغ قانون الجاذبية العامة نفسه ما هي قوة الجاذبية؟ فكان سيرد علينا: بأنه لا يعرف شيئاً عنها ومن السخف البحث في ماهيتها، فهو «لا يختلق الفرضيات»، لذلك كان يؤكد دوماً أنه يريد أن يكتفي بوصف نتائج القوى القابلة للقياس والملاحظة، أي الحركة ذاتها، وهذا التهرب يعتبره البعض «تعقلاً من جانبه»، لأنّ نظرية الحقول الكمومية التي ستظهر في القرن العشرين ستصف القوى على أنها تجلٍّ لتبادل جسيماتٍ موجودةٍ بالقوة بشكلٍ دائم، بين جسيمات مادية مثل (البوزونات)، وأخرى مثل (الفرميونات) (ليستين، 1998م).

يرى أبو بكر محمد بن الحسن الكرجي (توفي 406هـ/1030م) في كتابه (أنباط المياه الخفية) إلى أنّ الماء أثناء «جريته يطلب الشكل الكري؛ فإذا وجده لم يجر بتة، وكذلك الأبنية والأمكنة المرتفعة عن وجه الأرض تنهار وتقع طلباً للمركز واستدارة كرة الأرض» (الكرجي، 1892م). أي لا يمكننا تفسير سقوط الأبنية المنهارة للأسفل إلا لطلبها مركز الجذب في الأرض.

لم يقدم ابن سينا الجديد على ما قاله أرسطو في هذا الموضوع إذ يعتقد بأنّ «لكل جسم مكانه الطبيعي أو ميزة تقتضي طبيعته أن يتحرك إليه، فالنار مثلاً تتحرك إلى أعلى، والجمر عادةً وطبيعياً يتحرك إلى أسفل، والمتحرك إلى الوسط هو الذي يسمى ثقيلاً، أما المتحرك عن الوسط فيسمى خفيفاً». وقد استخدم ابن سينا لفظ الميل الطبيعي ليعبر به عن قوة الثقالة الأرضية حيث قال: «وكلما كان الميل الطبيعي أقوى، كان أمنع لجسمه عن قبول الميل القسري، وكانت الحركة بالميل القسري أفتر وأبطأ» (ابن سينا، 1983م). أي كلما كان تأثير قوة الجاذبية أكبر كانت أكثر تأثيراً من أي قوة خارجية أخرى. وقد شرح الفكرة أكثر بهمنيار بن المرزبان تلميذ ابن سينا في كتابه (التحصيل) فيقول: «ويجب أن يكون في الجسم في حال ما يتحرّك معنى زايد عن الطبيعة، وذلك لأن الجسم في مكانه الطبيعي ذو طبيعة، ولكن لا يكون ذا حركة، وهذا المعنى الزائد يسمَّى ميلاً، وهو الذي يشاهد في حال ما يتحرك الجسم إلى مكانه الطبيعي من الدفع القوي لمقاومه» (ابن المرزبان، المحصل، مخطوطة المكتبة الأحمدية بحلب، رقم 1122، الكتاب الثالث، ص 247ظ).

ويكمل ابن المرزبان معمماً تأثير الجاذبية على كلّ حركة تحدث، وذلك لكون الجاذبية: «كل حركة فهي تصدر عن ميل كما عرفته، وهذا الميل في نفسه معنىً من

المعاني، به توصّل إلى حدود الحركات، ومُحال أن يكون الواصل إلى حد ما واصلاً بلا علةٍ موجودةٍ موصولة، محال أيضاً أن تكون هذه العلة غير التي أزيلت عن المستقر الأول، وهذه العلة يكون لها قياس إلى ما يزيله يسمى ميلاً، ومن حيث هو موصل لا يسمى ميلاً. الميل مالا يُقسر ولم يُقمع أو لم يَفسد، فإنّ الحركة التي تجب عنه تكون موجودةً» (ابن المرزبان، المحصل، ص 260 و 261-ظ).

اقترب أبا رشيد النيسابوري (توفي نحو 440هـ/1048م) كثيراً من فهمه لتأثير الجاذبية على سقوط الأجسام، ورد على الكعبي (الذي سبقه بمائة عام) في مثال الريشة والحجر بقوله: «وعندنا أنّ المولد للهوي ما فيه من الثقل، يدلّ على ذلك أنّ الهويَ يقع بحسب ثقله، حتى إذا كانت ريشة، فارق في حالها في الهويّ حال التفاحة، وإنْ كان رفع اليد لا يختلف على أنّ تنحيه عنها، ليس لها بالتوليد في جهة من الاختصاص، ما ليس له بغيرها» (الخيون، 1997م).

وما لاحظه نيوتن من سقوط التفاحة - إن صحّت رواية التفاحة كما قلنا- وتأثير الجاذبية عليها هو تماماً ما لاحظه كلٌّ من الكعبي والنيسابوري، لكن الفرق بينهم هو وضع الصياغة الرياضياتية للقانون من قبل نيوتن، وبأخذ الفارق الزمني (حوالي ثمانية قرون) بعين الاعتبار بينهم وما رافقه من تطور في حساب التفاضل والتكامل من جهة، والعلاقة بين الرياضيات والفيزياء من جهة أخرى، إضافة لخصوصية كل مرحلة من تاريخ العلم التي مرّ بها تطوره، كفيلٌ بأن يشفع - برأينا- لكل العلماء العرب والمسلمين عدم وضعهم لصياغةٍ رياضياتيةٍ لمعظم الظاهرات الفيزيائية وفق الصيغ التي نعرفها بها نحن اليوم.

وفي مسألة أخرى طرحها الكعبي في (عيون المسائل) يقول فيها: « يجوز أن يوجد الجسم متوالي الحركات حتى لا تقع فيه سكون، إذا كان الكلام في أخفّ

الأشياء، ولا يجوز ذلك في الثقيل». وفي موضع آخر من الكتاب نفسه قال: «لابد من أن ينتهي الجسم الثقيل المنحدر إلى حال تتوالى حركاته، فلا يكون له في الهواء سكون البتة». فيعترض أبو رشيد النيسابوري عليه بقوله: «اعلم أن هذين القولين يتناقضان. **والصحيح عندنا، أنّ توالي الحركات ممكن في الثقيل والخفيف، ولكن إذا رمينا جسماً خفيفاً، فإنه لا تكون حركته في السرعة، كحركته إذا كان ثقيلاً. فلا بد أن يكون ما يعرض في الجو من العوارض، يمنع الخفيف من الحركة، مالا يمنع الثقيل**. فمتوالي الحركات في الجو في الثقيل أمكن منه في الخفيف، فلا أدري بأي وجه قال ذلك، ومتى كان الجسمان يتحركان لا في الآخر، فيعلو أحد النصفين، ويسفل الآخر، ويزول المانع فيهوي، فعلى هذا الوجه يحصل التجاذب» (الفيومي، 2010م).

ولا شك لدينا حالياً نصّ عربي يعود للقرن (5هـ/11م)، قبل أن يطرح غاليليو تجربته المشهورة – إن كان صحيحاً أيضاً أنه قام بها – على برج بيزا بإلقاء جسمين أحدهما أثقل من الآخر ليناقض بها قول أرسطو، في القرن السادس عشر الميلادي.

تناول البيروني مفهوم الجاذبية في كتابه (القانون المسعودي) فهو يرى أنّ «جذب السماء للأرض من كل النواحي بالسواء، وذلك يبطل الجزء، ومنها المنفصل عنها، فإن ما يلحقه من الجذب من جهة الأرض أفتر، فلا محالة أنّ الخلاء الذي في باطن الأرض يمسك الناس من حواليها» (البيروني، القانون المسعودي، 1952م). وهو يشير بذلك إلى وجود نوعين من الجاذبية هما: جاذبية السماء للأرض (جاذبية كونية بعيدة)، وجاذبية الأرض لما فوقها وحولها (جاذبية محلية قريبة)، فالشيء ينجذب إلى النطاق الذي يقع في مجاله وإن كان

هـو ونطاقـه منجذبـين بدورهمـا إلـى جـرم السـماء. والبشـر بحكـم وجودهـم علـى سـطح الأرض فهـم منجذبـون إليهـا، وهـي بدورهـا منجذبـة إلـى السـماء، ويبلـغ ذلـك الجـذب أقصـاه في باطـن الأرض، حيـث تنطلـق الجاذبيـة الأرضيـة و «النـاس علـى الأرض منتصبـو القامـات علـى اسـتقامة أقطـار الكـرة، وعليهـا أيضـاً تـزول الأثقـال إلـى أسـفل» (البيرونـي، القانـون المسـعودي، 1952م). ثـم يبـين أنّ كل الأشـياء علـى الأرض ملتصقـة «علـى مثـال خـروج الأنـوار علـى أغصـان الشـجرة المسـماة (كذنـب) فإنهـا تحتـف عليـه، وكل واحـد في موضعـه علـى مثـال الآخـر لا يتدلـى أحدهـا ولا ينتصـب غيـره، فـالأرض تمسـك مـا عليهـا لأنهـا في جميـع الجهـات سـفلٌ والسـماء في كل الجهـات علـو» (البيرونـي، تحقيـق مـا للهنـد ...، 1925م).

ويعـود مـرةً أخـرى لمناقشـة الأمـر عندمـا طُرحـت مسـألة حركـة الأرض والعلاقـة بينهـا وبـين الجاذبيـة، فـالأرض جـرم كبيـر مقارنـةً بـأي جـزءٍ مـن أجزائهـا، كمـا أنّهـا أشـد حركـةً مـن هـذه الأجـزاء، لذلـك فـإن لهـا قـدرة علـى جذبهـا بشـكل كبيـر، وهـذه النظريـة فيهـا ردٌّ علـى نظريـة بطليمـوس في طفـو الأرض وسـكونها. يقـول البيرونـي: «ولنعـد الآن إلـى الأصـل الخامـس، وهـو ينقسـم إلـى قسـمين: يقتضـي أحدهمـا انتقـال الأرض مـن الوسـط إلـى جهـةٍ مـا، والجهـة المقابلـة لـكل مسـكن أولاهـا، لأن السـفل في سـمتها فيتصـوّر هـوي أجـزاء الأرض إليهـا، فـإن اسـتقرت متنقلـة كذلـك في موضـع اقتربـت فيـه إلـى موضـع مـن السـماء وتباعـدت عـن نظيـره، ولـو كان ذلـك لوجـد لهـا في الموضـع الـذي انتقلـت إليـه حـال مـن الأحـوال التـي عددناهـا في خروجهـا مـن الوسـط وليـس مـن ذلـك شـيء بموجـود، وإن امتـدت في الهـوي ولـم تسـتقر وجـب منـه وقـت الحركـة أن لا يلحـق بهـا شـيء ثقيـل منفصـل عنهـا لتحركهمـا معـاً، وإن كل الأرض لا محالـة أشـد حركـةً لفضـل عظمهـا علـى مـا هـو

أصغر منها من أجزائها، لكن الهيئة والصخرة العظيمة سيّان في اللحوق بها وإن تفاوتت المدة فيه، ولزم أيضاً أن يبلغ الأرض السماء في جهة الهُويّ إلا أن تصير للسماء أيضاً حركة نحو تلك الجهة مساويةً لحركة الأرض كما حكاها محمد بن زكريا الرازي عن الشمنية فتصير حركة الأرض وسكونها بمثابة واحدة للزومها في كليهما الوسط، وهذا ما اعتمده بطليموس في هذا القسم، إلا أن دفعه تعجب المتعجب من كون الأرض مع ثقلها في الهواء طافية غير راسبة بما أشار إليه من صغيرها بالقياس إلى السماء غير دافع له ولا مغنٍ شيئاً، فكل العالم إلى أقصى نهايته لو كان من أثقل الأشياء غير مخالف بعظمه حال الأرض في الطفو والسكون، بل لو توهمت الأرض مرتفعة وفي وسط العالم هيأة واقفة لكان التعجب على حاله بقدر حصتها من الثقل، ولن يزول مالم يتبين أنها وغيرها من الأثقال مضطر إلى الوقوف هناك وبقدر مالها من الثقل تسرع إليه وتتسابق نحوه لتستقر في حقيقة السفل، ثم الأقاويل في سبب هذا الاضطرار كثيرةٌ منها جذب السماء الأرض من كل النواحي بالسواء» (البيروني، القانون المسعودي، 1952م).

أثار هذا الكلام حفيظة ابن سينا، فدارت بينه وبين البيروني جملةٌ من المراسلات العلمية، جمعت فيما بعد بكتابٍ واحد عنوانه (أجوبة الشيخ الرئيس عن مسائل أبي الريحان البيروني)، فقد وضع البيروني بحث أرسطو موضع الشك، وهو بحث حول أنّ الجسم الذي يُتمّ حركةً دائريةً منتظمة لا يمكن أن يكون له (ثقالة) أو (خفة)، وعلى أساس هذه العلاقة فإن كامل المنظومة الكونية تصبح في موضع الشك. في حين أننا نجد أنّ ابن سينا يتبع أرسطو ويؤكد على أن مثل هذا الجسم، وخصوصاً الكرة السماوية لا يمكن أن تسعى إلى الأسفل

أو إلى الأعلى، وإنما تبقى في (مكانها الطبيعي)، وهنا لا يسود لا ثقل ولا خفة، وخصوصاً العناصر التي تسعى إلى الأعلى ليست لثقل العناصر، وإنما السعي نحو مركز الكون، وهنا يسأل البيروني في السؤال الثاني في الفيزياء: مَنْ مِنَ الاثنين على حق؟ هل الذي يؤكد أن الماء والأرض (الجسم الثقيل) يتحركان إلى مركز الكون، والهواء والنار (الجسم الخفيف) يتحركان باتجاه معاكس، أو ذاك الذي يقول إنّ جميع العناصر تسعى إلى المركز والأثقل فيها يسبق الأخف؟ (غريغوريان وروجانسكايا، 2010م).

مع ذلك يعتمد ابن سينا وجهة نظر أرسطو، ويفترض البيروني أنّ كل الأجسام دون استثناء تسعى إلى مركز الأرض، ويستدل على هذا الرأي فيما بعد في عمله عن المساحة، حيث يقول: إن الجاذبية هي خاصية السعي من كافة الجهات نحو المركز، وعلى هذا الأساس يفسر كروية سطح الماء، وسبب تشوش هذا السطح ناجمٌ عن انعدام التماسك بين ذراته. وبالعلاقة مع قاعدة بطليموس يقدم البيروني آراءً مختلفةً حول تفسير أن «الأرض بغض النظر عن جاذبيتها فإنها تسبح في الهواء ولا تنحرف». ويذكر بطليموس أنّه ثمة حركتان متعاكستان بوقتٍ واحدٍ لجسمين ثقيلين، إحدى هاتين الحركتين تتوجه نحو مركز الكون، أما الثانية فتنطلق منه. وبحسب رأي البيروني فإنّ هذا مستحيل في الحالة العامة، ولكن يمكن أن ينشأ هذا الوضع عندما تكون إحدى الحركتان طبيعية، والثانية صنعية (غريغوريان وروجانسكايا، 2010م). يقول البيروني في ذلك: «إنّ وجود كل عنصر في مكانه الطبيعي هو أمر غير مؤكد؛ لأنّ المكان الطبيعي للثقل - أي الجهة القاعدية- هو المركز، والمكان الطبيعي للخفة -أي الجهة المرتفعة- هو المحيط. ومع ذلك فإن المركز ليس سوى نقطة، وجزء من

الأرض لا يمكن أن يتناسب مع المركز بغض النظر عن الحجم الصغير الذي يمكن تخيله له... أما فيما يتعلق بالإطار الخارجي الذي يمكن تصوره منطقة سطح، فهو أيضاً غير قادرٍ على الإمساك بأيّ جسم يكون بإمكان الأجسام الخفيفة الوزن الصعود إليه. ثم إذا ما سمحنا للماء بالجريان بحرية وأزلنا من أمامه جميع العوائق فإنه سيصل إلى المركز من غير أدنى شك، فليس هناك أيُّ أساسٍ للادعاء القائل بأن المكان الطبيعي للماء هو على سطح الأرض. وينتج عن ذلك انتفاء وجود مكان طبيعي لأيِّ جسمٍ كان» (نصر، 1991م).

لقد مضى البيروني إلى أبعد من ذلك؛ عندما استخدم المشاهدة والتجربة والقياس مراتٍ عديدةٍ عندما تعامل مع المفاهيم الطبيعية، فهو يقدر أهمية تطبيق الرياضيات على علوم الطبيعة. لذلك نراه يعتقد بإمكانية قياس قوة الجاذبية عن طريق الوزن. يقول ما خلاصته: إنّ الحساب من طبع الإنسان، ويصبح قياس أيّ شيء معروفاً إذا ما قارناه بشيء آخر يرقى إلى ذات النوع ومتفق عليه كوحدة قياس. وهكذا يصبح الاختلاف بين أيّ شيء وبين هذا القياس أمراً معروفاً أيضاً (نصر، 1991م)، ويستطيع الناس مثلاً: «تقدير جاذبية الأجسام الثقيلة عن طريق الوزن» (البيروني، تحقيق ما للهند ...، 1925م).

لم يكن ابن باجة ليقبل بمذهب أرسطو في الحركة، مع أنّه أحد أكبر الشراح له بعد ابن سينا، وقد وضع رأيه في شروحاته على كتاب (السماع الطبيعي) لأرسطو. ويمكن القول، باستخدام المفاهيم الفيزيائية الحديثة، أنّ قوة الجاذبية عند ابن باجة، لا تتحدد في جوهرها بالعلاقة بين كتل الأجسام المختلفة، وإنما هي قوة مطلقة لحركة الجسم الذاتية، تفعل على غرار فعل الروح في البدن، لذلك فإنه يرفض أن يكون للوسط دورٌ جوهريٌ في حركة الجسم، فلا يعترف له إلا بدور العائق بعد

انفصاله عن الشيء الذي أعطاه الحركة أول الأمر، يجب أن تكون هي الأخرى من طبيعة داخلية، أما آلية انتقال هذه الحركة فيبسطها ابن باجة في شروحه على المقالتين السابعة والثامنة من (السماع الطبيعي) (ابن باجة، 1991م). يقول ابن باجة: إنّ «المتحرك من ذاته فبينٌ أنه متقوّمٌ من المحرّك والمتحرّك، وما كان غير متقوّم من هذين الجنسين فليس بمتحرك من ذاته، مثال ذلك الحجر، فإنّ المحرك فيه ليس بذاته، لكنه فيه من خارج عن ذاته بالقسر، فإن الذي للحجر بذاته كونه أسفل، وإذا كان كذلك فليس بمتحرك، وإذا كان فوق فوجوده إنما هو له بقاسرٍ يقسره، وإذا تنحى القاسر تحرك إلى أسفل؛ فلذلك يحتاج في الحجر ضرورة إذا تحرك أن يكون أسفل بالقوة، ولا يكون أسفل بالقوة إلا بأحد وجهين: أحدهما طبيعي وهو متى كان الحجر أرضاً بالقوة، والثاني غير طبيعي: وهو متى كان بالفعل ناراً أو ماء أو هواء فكان فوق بالفعل، وأسفل بالقوة. وهذه القوة في النار بالطبع لأنّ النار بذاتها أن تكون فوق بالفعل، ويلزم ذلك أن تكون أسفل بالقوة من أجل الهيولى الأولى المشتركة. وقد تكون أسفل بالقوة، وهو إذا كانت أيضاً بالفعل، فأمسكها ماسكٌ فوق فهذه القوة للحجر ليست طبيعية، لكنها بالطبع من أجل الهيولى» (ابن باجة، 1991م).

إنّ نظرية ابن باجة عن حركات الأجسام الثقيلة، تشتمل على الافتراضات نفسها الأساسية التي ستكون لدى نظرية غاليليو لاحقاً، وتصوّر هذه النظرية أنّ الجاذبية تعمل كطاقةٍ حركيةٍ ضمنيةٍ تؤثّر على الجسم الثقيل من داخله وتبين الحسابات والقياسات الأساسية الصحيحة هذه القوة الحركية هي عبارة عن فراغ هندسي يتجه نحو مركز العالم والسرعات الأساسية أو الطبيعية للأجسام ذات طبيعةٍ مختلفةٍ ومتنوعةٍ من الكثافة التي يتضمنها الجسم الثقيل لتكون متناسبة في حالة كمال طبيعتها كما تتناسب مع كثافاتها (Moody, 1975).

هـذا المفهـوم كان واضحـاً أيضـاً في فكـر ابـن باجـة، وذلـك عندمـا تنـاول حركـة الأجـرام السـماوية والتـي كان يُعتقـد بأنهـا تحـدث بسـبب مـواد معنويـة أو روحيـة تدعـى بالعقـول وهـي تختلـف عـن المجـالات الكرويـة المتحركـة بفعـل تلـك المـواد، ومـع هـذا فهـي مفعلـة داخليـاً فهـي مثـل «الأفـكار» التـي هـي عبـارة عـن رغبـة «حافـزة أو حثيثـة» (Moody, 1975).

ثـم يقـوم ابـن باجـة بمحاولـة تقـديم تفسـير علمـي مقنـع لمسـألة سـقوط الحجـر وفـق مصطلحـات المنطـق الأرسـطي؛ فيقـول: «**فأمـا كيـفَ حـرَّك الثقـل الحجـر؟ فنحـن نقـول فيـه**: قـد تبـين في مواضـع كثيـرة أنّ الهيولـى لا صـورة لهـا، ولا هـي شـيءٌ موجـودٌ بالفعـل، وإنّمـا وجودهـا أبـداً بالقـوة إحـدى المقـولات العشـر (أي مقـولات أرسـطو العشـر التـي لا تخضـع للتعريـف الحصـري، وإنمـا يمكـن وصفهـا بالكشـف عـن بعـض خاصياتهـا التـي تتميـز بهـا)، وهـذا هـو مرتبتهـا في الوجـود. وبـيّن أيضـاً أنّ الموجـود ينقسـم إلـى المقـولات العشـر، وإن الجوهـر الكائـن الفاسـد قوامـه بهـذا الموضـع الـذي هـو الهيولـى الأولـى، وبمعنـى آخـر هـو بـه موجـود، وهـو الصـورة. والهيولـى يوجـد فيهـا ضـرورة أكثـر مـن مقولـة واحـدة، فإنّـه ليـس يمكـن أن يوجـد جوهـر هيولانـي خلـواً مـن أعـراض كثيـرة، ومثـل أن يكـون ذا كـم وذا أيـن وذا كيـف إلـى غيـر ذلـك مـن أجنـاس المقـولات العشـر، لكـن تتقـدم في الهيولـى ضـرورة أحـد أنـواع الجوهـر، ولذلـك يوجـد في الهيولـى مـا يوجـد فيهـا مـن أنـواع المقـولات التسـع، وقـوام مـا فيـه المقـولات التسـع إنمـا هـو بمـا في مقولـة الجوهـر، ومـا في مقولـة الجوهـر يوجـد في حـدود مـا في المقـولات التسـع. ولا يمكـن أن يكـون شـيء ممـا في المقـولات وقوامـه خلـوٌ مـن الجوهـر، وبهـذا يفـارق الجوهـر الأعـراض، فـإن الجوهـر إنمـا هـو معنـى يوجـد في المـادة الأولـى، والمـادة الأولـى إنمـا هـي موجـودة كمـا قلنـا

بأنها بالقوة وإنما هي بالقوة أحد الجواهر من حيث هي ما هي، فهي بالقوة أحد أنواع العرض من حيث هي جوهر ما، وكذلك هي بالفعل أحد الجواهر بذاتها وهي أنواع الأعراض فإنها جوهرٌ ما» (العلوي، 1983م).

يقول ابن ملكا البغدادي: «... ثم سماءٌ بعد سماءٍ، كل في حيزه الطبيعي، إلا هذه التي تلينا (فإنّها) تسكن في أحيازها الطبيعية، وتتحرك إليها- إذا أخرجها مخرجٌ عنها - حركةً مستقيمةً تعيدها في أقرب مسافةٍ إليها على ما يرى». ويقصد بكلامه السابق أنّ الجسم يسقط سقوطاً حرّاً تحت تأثير قوة جذب الأرض متخذاً في ذلك أقصر الطرق في سعيه للوصول إلى موضعه الطبيعي، وهو الخط المستقيم، ويرى أنّ الجسم عندما نقذف به فإنه «يصعد بطيئاً، ويهبط بطيئاً أما بطء الصعود فلضعف الميل القاسر ومقاربة الميل الطبيعي أن يقاومه، وأما ضعف الهبوط فلأنه أوّل قوّة الميل الطبيعي بتولي إبطال ما بقي من قوة الميل القاسر أولاً فأول حتى يبطل فيبطل مقاومته؛ فلذلك يكون أشد الميل الطبيعي في آخره وأشد الميل القسري في أوله» (البغدادي، 1939م).

ويؤكد أبو البركات على ما قد طرحه الكعبي والنيسابوري من قبل، من تأثير الجاذبية نفسه على كل الأجسام بغض النظر عن شكلها وحجمها وثقلها: «وأيضاً، **لو تحركت الأجسام في الخلاء، لتساوت حركة الثقيل والخفيف، والكبير والصغير، والمخروط المتحرك على رأسه الحاد، والمخروط المتحرك على قاعدته الواسعة، في السرعة والبطء**، لأنّها إنما تختلف في الملأ بهذه الأشياء بسهولة خرقها لما تخرقها من المقاوم المخروق كالماء والهواء وغيره» (البغدادي، 1939م).

تكلم أبو الفتح الخازني عن الأجسام الساقطة التي تنجذب في سقوطها نحو مركز الأرض (أبو خليل وآخرون، 1996م). وقد بين في كتابه (ميزان الحكمة) العلاقة بين الجاذبية والمسافة التي يقطعها، كما تناول مبدأ التثاقل، وذكر بأنّ الانجذاب يكون باتجاه مركز الأرض دائماً (الرفاعي، 1973م).

ويمضي الخازني إلى أعمق من ذلك بملاحظته للجاذبية التي تتأثر بها أجزاء الجسم نفسه فيقول: «وكل جسم ثقيل يكون على مركز العالم، فإنّ مركز العالم يكون في وسطه ويكون ميل أجزائه مع جميع جهاته إلى مركز العالم تقسم كل واحد منها الجسم بقسمين معادلي الثقل عند ذلك السطح». و«كل جسم ثقيل يتحرّك إلى مركز العالم فإنّه لا يتجاوز المركز، وإنه إذا انتهى إليه انتهت حركته وإذا انتهت حركته صار ميل جميع أجزائه إلى المركز ميلاً متساوياً، وإذا انتهت حركته فإن وضع المركز منه حينئذ لا يتغير» (الرفاعي، 1973م).

نظراً لتصنيف ابن طفيل لحركة الأجسام إما علويّة وإما سفليّة، فهو يؤكد في قصته (حي بن يقظان) على أن ثمة شيء مشترك لجميع الأجسام، وشيء ينفرد به كل جسم عن الآخر. فالشيء المشترك هو (الجسمية) ذات الطبيعة المادية، والشيء الذي يتميز به جسم عن آخر، هو الثقل في أحدهما والخفة في الآخر، والمعنيان السابقان يميزان بشكل خاص الأجسام فقط (ابن طفيل، 1995م).

تنبه أبو عمران موسى بن ميمون القرطبي إلى أنّ القدماء لاحظوا ارتباط قوة المد والجزر بالقمر فقال: «ذكرت الفلاسفة أن للقمر قوةٌ زائدةٌ وخصوصيةٌ بأسطح (بمادة) الماء، و دليل ذلك زيادة البحور والأنهار بزيادة القمر، والجزر مع إدباره أعني صعوده وانحطاطه في أرباع الفلك على ما هو بين واضح عند ترصّد ذلك» (ابن ميمون، (د. ت)).

كما طرح ابن ميمون فكرة تأثير الأجسام في بعضها بعضاً، ولا يقصد بذلك تأثر الأجسام ببعضها بسبب التمازج، بل بسبب قربها أو بعدها عن بعضها أيضاً: «وقد تبين في العلم الطبيعي أنّ كل جسم يفعلُ فِعلاً ما في جسم آخر فلا يفعل فيه إلا بأن يلقاه أو يلقى ما يلقاه، إن كان ذلك الفاعل إنما يفعله بوسائط... وهكذا نجد أسباب كل ما يحدث في الوجود من حوادث يكون سببها امتزاج الاسطقسات التي هي أجسام فاعلة بعضها في بعض ومنفعلة بعضها عن بعض أن سبب حدوثها قرب جسم من جسم أو بُعد جسم عن جسمٍ» (ابن ميمون، (د . ت)).

وفي موقع آخر يؤكد وجود قوةٍ تمسك بين أجزاء الكون كافة، لكنه لم يجد إجابةً شافيةً فيترك السؤال: هل مصدر هذه القوة هو الفلك المحيط أم غير ذلك؟ مفتوحاً على أمل أن يظهر من يجيب عنه.

«واعلم أنّ القوى الواصلة من الفلك لهذا العالم على ما قد بان أربع قوىً: قوةٌ توجب الاختلاط والتركيب ولا شك أنّ هذه كافية في توليد المعادن؛ وقوة تعطي النفس النباتية لكل نبات، وقوة تعطي النفس الحيوانية لكل حي، وقوةٌ تعطي القوة الناطقة لكل ناطق وكل ذلك بتوسط الضوء والظلام التابع لنورها ودورتها حول الأرض... كذلك في العالم بجملته قوة تربط بعضه ببعض، وتحرس أنواعه من أن تبيد، وتحرس أشخاص أنواعه أيضاً مدة ما يمكن حراستها، وتحرس أيضاً بعض أشخاص العالم هذه القوة، فيها نظر هل هي بواسطة الفلك أم لا؟» (ابن ميمون، (د . ت)). لقد عبر ابن ميمون عن الجاذبية بأنها قوة مؤثرة عن بعد، كما فعل من قبل ابن بشرون وإخوان الصفا، لكنه لم يدرك ما يتعلق بهذه القوة من عناصر كالكتلة والبعد.

عالـج الإمـام فخـر الديـن الـرازي في الفصـل الخامـس مـن كتابـه (المباحـث المشـرقية) موضـوع سـقوط الأجسـام وعلاقتـه بالجاذبيـة، فيسـتعرض أقـوال السـابقين ثـم ينقضهـا واحـداً إثـر الآخـر، فيقـول: «الفصـل الخامـس في اختـلاف النـاس في سـبب حركـة النـاس (قـد) ذكـروا في ذلـك وجوهـاً خمسـةً:

- (**الأول**) الأجـرام كلهـا ثقـالٌ طالبـةً للمركـز ولكنهـا متفاوتـةٌ في الثقـل، ولكـن الأثقـل يسـبق ويضغـط الأخـف إلـى فـوق حتـى يتمهـد لـه الاسـتقرار في السـفل، وهـذا باطـل بوجهـين: أمـا أولاً: فـلأنّ انضغـاط الأعظـم أبطـأ ونحـن نـرى أن حركـة النـار العظيمـة إلـى العلـوّ ليسـت أبطـأ مـن حركـة النـار الصغيـرة، وأمّـا ثانيـاً: فـلأن المندفـع كلمـا بعـد عـن المبـدأ ذهبـت سـرعته وهاهنـا ليـس كذلـك.
- (**الثاني**) أنّ المقلّ هـو يخلـل الخـلاء والمرسـب هـو لا يخلـل الخـلاء، وهـذا باطـل لأن الجسـم الـذي يتخلله الخـلاء لابـد وأن تكـون فيـه أجـزاء لا يتخللهـا الخـلاء وتلـك الأجـزاء صاعـدةٌ وليـس صعودهـا بسـبب تخلـل الخـلاء.
- (**الثالـث**) أن المقـلّ هـو اللـين والمهبـط هـو الصلابـة وهـو باطـلٌ لأنـه يلـزم أن يكـون الحديـد والحجـر أثقـل مـن الذهـب والزئبـق.
- (**الرابـع**) أن تحـدد الزوايـا هـو مبـدأ الحركـة للأشـكال المتحـددة إلـى فـوق لسـهولة الخـرق والتمكـن مـن النفـوذ، وإن انفـراج الزوايـا واسـتعراض السـطوح هـو السـبب في الثقـل، وهـو باطـل لأن تحـدد الأشـكال معـين علـى سـهولة الحركـة ولكنـه لا يكـون سـبباً لحصولهـا كمـا أنّ حـدّة السـيف لا تكـون علـة لحصـول القطـع بـل لا بـد مـن قاطـعٍ نعـم هـي علـةٌ لسـهولة القطـع.
- (الخامس) أنّ الخلاء يجذب الأجسام إلى نفسه جذباً يسبق بالأثقل فالأثقل ثم

يحيط به الأخف فالأخف، وهو فاسدٌ لما ثبت في باب الخلاء أنّ الخلاء لو كان فليس له جذبٌ للأجسام، وإذا بطلت هذه المذاهب فالحق ما قدمناه من أن لكل واحد من هذه العناصر حيزاً طبيعياً فإذا فارقت أحيازها لقاسرٍ فعند زوال ذلك القاسر تعود بطباعها إلى أحيازها الطبيعية» (الرازي، 1990م).

وقد طرح الإمام فخر الدين الرازي فكرة أنّ الجسم ينجذب إلى الجسم المجاور له أكثر مما ينجذب للجسم البعيد عنه، وهو يدخل بذلك عامل المسافة بين الأجسام وعلاقته بمفهوم التجاذب، قال: إنّ «انجذاب الجسم إلى مجاوره الأقرب، أولى من انجذابه إلى مجاوره الأبعد ...» (الرازي، 1990م).

وكما تكلم قبله ثابت بن قرة، أقرّ فخر الدين الرازي في كتابه (المحصّل) بأنّ الثقل أمرٌ زائد على الحركة من خلال إحدى المسائل وبرّر ذلك بقوله: «لأن الثقيل الممكن في الجو قسراً نحسّ بثقله والزق المنفوخ المسكن تحت الماء قسراً نحس بخفته مع عدم حركتهما» (الرازي، 1991م).

ويعلق الطوسي على ذلك بقوله: « والخفة والثقل لم يذهب أحد إلى أنهما ليسا بزائدين على الحركة بل هما عرضان يسميهما المتكلمون اعتماداً والحكماء ميلاً» (الرازي، 1991م).

وقد تنبه الإمام فخر الدين الرازي إلى التناسب الطردي لقوة الثقالة الأرضية مع مقدار كتلة الجسم وبالتالي ثقله، يقول: إنّ «الأجسام كلما كانت أعظم، كان ميلها إلى أحيازها الطبيعية أقوى، وكلما كان كذلك، كان قبولها للميل القسريّ أضعف، لما بيّنا أن الميل الطبيعي عائق عن القسري، والشيء كلما كان العائق عنه أقوى كان وجوده أضعف» (الرازي، 1964م).

الأوربيـــــون

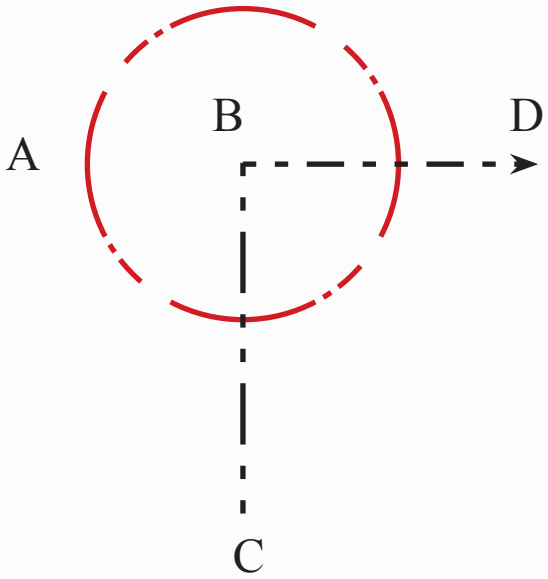
بحث عدد من العلماء الأوربيين في محاولة تفسير ظاهرة الجاذبية، وقد مهدت أعمالهم على مدى 400 سنة كافة الخيوط لنيوتن لينسج منها نظريته التي سيُكتب لها أن تسيطر 200 سنة على الفكر العلمي العالمي، حتى مجيء أينشتاين ليعلن أنها ليست أكثر من حالة خاصة من نظرية النسبية العامة.

تشجّع ألبرت الساكسوني في القرن الرابع عشر الميلادي على طرح فرضية أنّ «الأرض تتحرك والسماء ساكنة»، فقد بدت فكرة سكون الأرض في وقتها، لم يكن لها من سببٍ أو داعٍ فيزيائي، وبات البحث متوجهاً للإجابة عن التساؤل: هل ستنقذ هذه الفرضيةً الجديدة الظاهرات الطبيعية؟ الأمر الذي جعل الحياة تدبّ في أوصال الرؤية الفيثاغورسية القديمة القائلة بسكون الأفلاك، وتنتشر في علوم العصور الوسطى (برهييه، 1998م).

ويعتقد ألبرت الساكسوني أنّه ليس لدى الأرض جاذبيةً منتظمةً لأنّ «القسم الذي لا تغطية مياه البحر، وكونه معرض لأشعة الشمس سيكون موسعاً ومتمدداً أكثر من القسم الذي يغمره البحر. فضلاً عن ذلك، لو كان مركزها الهندسي يتوافق مع مركز الجاذبية ومع مركز الكون فإنها ستكون بالكامل مغمورة بالمياه». وثمّة أثرٌ لبرهان آخر يوجد في كتابات ألبرت الساكسوني، كان قد طرحه سلفه الأسبق والتر بورلي W. Burley (توفي 1357م) يقول فيه: إذا كان كل العناصر لديها الشكل الكروي ذات مراكز في مركز الكون، فكلّ عنصرٍ سيكون في مكانه الطبيعي، لكن حينئذٍ ستكون الأرض بأكملها مغمورة بالمياه، وقد حلّ جون دنس سكوت J. D. Scot (توفي 1308م) هذه المسألة بصعوبة في كتابه (الدكتور سابتيليز Dr. Subtilis) وبتفسيرٍ مشتركٍ نهائيٍ ليقدّم لنا إدراكاً

بـأن قسـماً مـن الأرض غيـر مغطـى بالمـاء وذلـك حتـى تسـنح للكائنـات الحيـة بـأن تعيـش آمنـة؛ لهـذا أعتقـد ألبـرت الساكسـوني بـأنّ مركـز الأرض هـو مركـز الجاذبيـة وليـس مركزهـا الهندسـي الـذي توضـع في مركـز الكـون. ونظـراً لكـون الأرض غيـر مثبتـة في مـكان، فـإنّ أسـباباً كثيـرة وعديـدة مثـل التسـخين بأشـعة الشـمس قـد يُنتـج اختلافـاً بتوزيـع الجاذبيـة في كتلـة أو بقعـة أرضيّـة وقـد تزيـح جاذبيتهـا، وكآليـة أكثـر توسـعاً فقـد ذكـر ألبـرت الساكسـوني عمليـة التـآكل والحـت (Dugas, 1957).

ناقـش جيوفانـي بنديتـي في كتابـه (تأمـلات متنوعـة) الـذي نشـر عـام 1585م، مسـألة سـقوط الأجسـام، وبـيّن أنّ الأجسـام غيـر المتسـاوية في الـوزن والمصنوعـة مـن المـادة نفسـها في الفـراغ، فإنهـا تقطـع المسـافة نفسـها في الوقـت نفسـه، علـى عكس رأي أرسـطو، كمـا أنّـه سـبق بـه غاليليـو بتجربتـه الشـهيرة (فوربـس، 1992م).

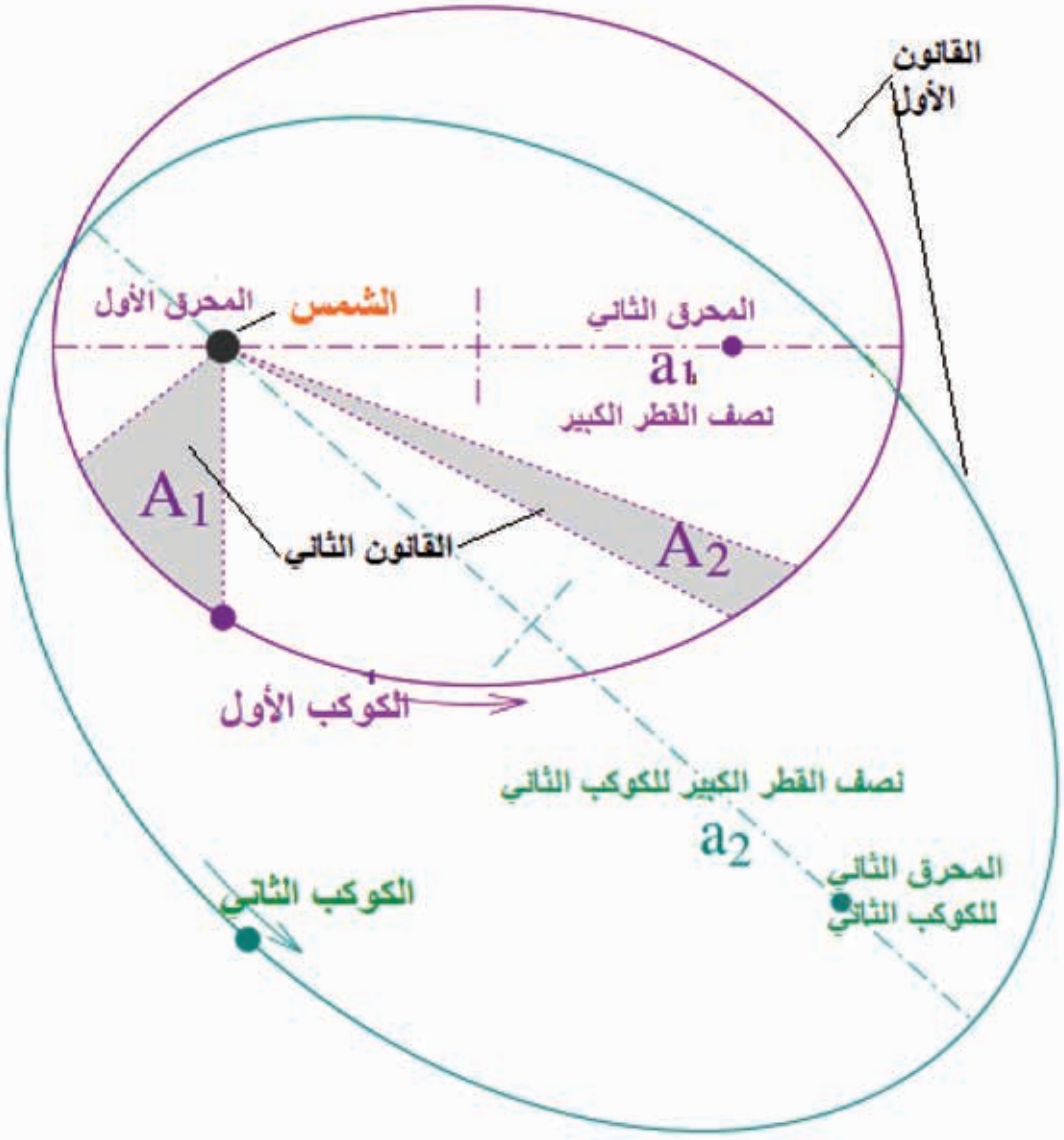


فـرق بيرناردينـو بالـدي B. Baldi (تـوفي 1627م) في الديناميـك بـين الجاذبيـة الطبيعيـة وبـين الجاذبيـة القسـرية والتـي يكـون فيهـا تأثيـر الطاقة المركبـة الخارجية متعلقٌ بهـا، ففـي القذيفـة التـي تحركهـا حركـة نقـل بسـيطة، يتزامـن مركـز الثقـل الطبيعـي B مـع مركـز الثقـل غيـر القسـرية وتحـت تأثيـر الدافـع باتجـاه BD (الشـكل أعـلاه). هـذان المركـزان مختلفـان نظريـاً فقـط وليـس عمليـاً» ويضيـف بالـدي بأنـه تتوقـف القذائـف عـن الحركـة بسـبب تأثيـر طبيعتهـا واندفاعهـا اللذيـن يحكمانهـا والتـي مـن المسـتحيل أن تكـون طبيعيـةً، لكنهـا مؤقتـةٌ وعرضيـةٌ تمامـاً وقسـريةٌ. حاليـاً لا يوجـد حركـةٌ قسـريةٌ دائمـة أبـداً... وطالمـا يسـود ويسـيطر القسـر، تكـون الحركـة القسـرية مشـابهةً تمامـاً للحركـة الطبيعيـة وهـي أدنـى في البدايـة وفيمـا بعـد وبتأثيـر حقيقـي جـداً علـى الحركـة، فإنهـا تصبـح أكثـر سـرعةً بعـد ذلـك، فـإن القسـر المؤثـر يضعـف رويـداً رويـداً وفي النهايـة تتباطـأ الحركـة إلـى أن تتلاشـى في الوقـت نفسـه، في حـين تصـل القـوة الدافعـة والجسـم المتحـرك إلـى حالـة السـكون. ويـرى دوهيـم أنّ «هـذا الـرأي غريـبٌ وغيـر منطقـي تمامـاً، فـإذا افترضنـا أن الجاذبيـة الطبيعيـة هـي طاقـةٌ حركيـةٌ ودائمـةٌ، فإنهـا تعطـي في كل لحظـة قـوة دافعـةً جديـدةً، وليـس باسـتطاعتنا أن نسـتنتج مـن هـذا أن الجاذبيـة صنعيـة، أي أنّ القـوة الدافعـة التـي تمنحهـا الطاقـة الحركيـة، تولـد قـوةً دافعـةً مـن نـوعٍ ثـانٍ». ومـع هـذه الغرابـة في هـذه الأطروحـة إلا أنّـه تعامـل معهـا مارين ميرسـين وتَولاهـا روبرفـال، واتّبـع دوهيـم أثرهـا وكذلـك ديـكارت (Dugas, 1957).

يعتبـر يوهانـس كبلـر تلميـذ الفلكـي تيخـو براهـي ومسـاعده الكبيـر، وقـد تـرك لـه إرثـاً كبيـراً مـن الملاحظـات الاسـتقرائية التـي لـم ينشـرها والتـي تتعلـق بمسـارات الكواكـب حـول الشـمس والأرض، وقـد حـاول كبلـر أن يثبـت أنّ المـدارات بيضويـةٌ

وليست دائريةً كما كان سائداً حتى عصره. وقد نُدهش عندما نعلم أن كبلر كان متعلقاً بالتنجيم كثيراً- وهو ما جعل غاليليو لا يأخذ أبحاثه بعين الاعتبار- فقد ألهمه التنجيم باعتقادٍ كبيرٍ في وجود قوة تنبثق من الشمس كأشعتها، هي التي تسبب حركة الكواكب بما فيها الأرض، وتفسر مدّ البحار كنتيجةٍ لتأثير القمر. لقد كانت فرضيات كبلر هذه مشتقة من فكرة أساسية في التنجيم تعارض عقلية أرسطو، لذلك فقد رفضها ممثلو علم الفلك العقلاني مثل غاليليو وديكارت وبويل، وتقبلوا تفسير غاليليو للمد على أنه نتيجة لحركة الأرض نفسها. هذا الفصل بين الفلك والتنجيم هو ما جعل نيوتن يرفض فكرته هو نفسه في الجاذبية، وإن كانت أصلاً تعود لأفكار روبرت هوك، وهو ما دفع بالديكارتيين الفرنسيين لرفض نظرية نيوتن في الجاذبية (عويضة، 1995م).

يبيّن كبلر نفسه في المثال الآتي لكوبرنيكوس بأنه فيثاغورسي فيما يتعلق بالجاذبية، لهذا أنكر الأطروحة التقليدية التي قدّمها ألبرت الساكسوني في القرن الرابع عشر ويقول في ذلك: إنّ «مبدأ الجاذبية خاطئٌ، لأنّ نقطةٌ رياضياتيةٌ واحدةٌ، سواء هي مركز العالم أو أية نقطة أخرى، فإنّها لا تستطيع أن تحرك أجساماً ثقيلة بفعالية، ولا أن تكون مادة حيث يميلون إليها؛ لذا تركها الفيزيائيون وأثبتوا أنّ مثل هذه القوة بوسعها أن تعود إلى نقطةٍ ليست بجسم، وإنّما هي عبارة عن تصور سببي تماماً». ويتابع أنّه «من المستحيل للقوة الهائلة لحجر، والتي تجعل الجسم يتحرك من نفسه، أن يبحث عن نقطة رياضياتية كمركز الكون دون أن يعتبر الجسم الذي يتضمن تلك النقطة والموضوع في وضعٍ معين؛ لهذا تركها الفيزيائيون وبيّنوا أنّ الأشياء الطبيعية لديها ميل لتلك الأمورٍ غير الموجودة».



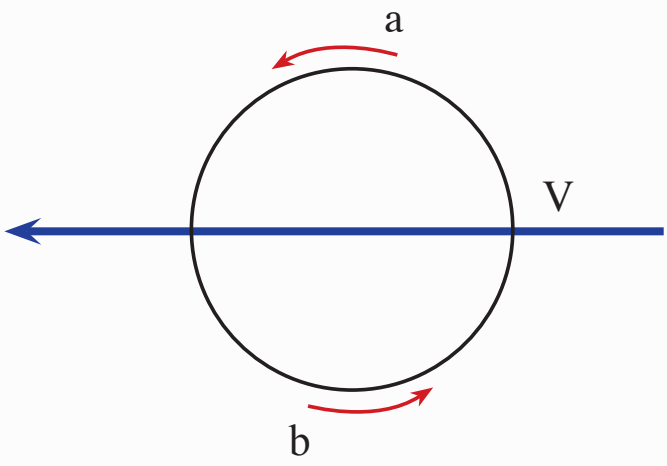
ملخص تصويري لقوانين كبلر الثلاثة

ويؤكد كبلر على مبدأ الجاذبية الحقيقي بقوله: «الجاذبية هي التأثير المشترك بين جسمين أساسيين (الجاذبية المادة المؤثرة والمادة النسبية الداخلية المشتركة) التي تميل إلى توحيدهما وضمهما معاً. إنّ القدرة المغناطيسية ذات خاصيةٍ للنوع نفسه. وهي الأرض التي تجذب الحجر، مع أنه قد لا يميل نحو الأرض، وبذات الطريقة، إذا وضعنا مركز الأرض عند مركز الكون، فإنها لا تتجه نحو مركز الكون الذي يحمل الأجسام، بل بالأحرى إلى مركز الجسم حول الذي تعود إليه، بمعنى آخر، الأرض. أيضاً سيتم توجيه الأجسام الثقيلة أياً كان مكان الأرض متجهٌ إليه، بسبب القدرة التي تحركها»، و«إذا لم تكن الأرض مستديرة، فلن تتحرك الأجسام الثقيلة مباشرةً باتجاه المركز القادم من الاتجاهات. وإنما حسب ما تأتي من مكان أو آخر، لأنّها ستكون محمولة إلى نقاط مختلفة»، و «إذا توضع حجران في موقع محدد في الكون قرب بعضهما وخارج مجال جاذبية كل الأجسام التي قد تجذبهما، فسيغدو هذان الحجران مثل مغناطيسين يميلان للتوحد في موقع وسطي وسيقطعان مسافتين حتى يتوحدان ويكونان في نسبة عكسية بالنسبة لكتلتهما» (Dugas, 1957).

وكما نلاحظ فقد تناول كبلر – وقبل نيوتن– فكرة التجاذب ومجال الجاذبية والقانون الناظم لقوة التجاذب، وإن كان غير صحيح، إلا أنّه شعر بضرورة وجود قانون يمكننا من خلاله وصف هذه القوة. ولو قارنا كلامه بكلام العلماء العرب فلن يختلف كثيراً، اللهم في فكرة النسبة العكسية.

كتب كبلر أيضاً: «تثبت الملاحظة أنّ كل شيء يحوي رطوبة ينتفخ عندما يكبر القمر وينكمش حين ينحسر أو يتضاءل القمر». وبعد ذلك صحح هذا الرأي قبل الأطروحة النيوتونية المتوقعة. «لا يتصرف القمر كنجم مبلل أو رطب، بل

ككتلة مشابهة لكتلة الأرض، إنه يجذب مياه البحر ليس لأنها سوائل، بل لأنها ذات خاصية لديها مادة أرضية لها جاذبيتها الخاصة بها». هذا التجاذب تبادلي، «إذا كان من المستحيل أن يتأثر كل من الأرض والقمر بقوة مادية أو بقوة متساوية ما، فكل منهما وفي مداره، عندها سترتفع الأرض نحو القمر والقمر سيهبط نحو الأرض إلى أن يندمج هذان النجمان. وإذا امتنعت الأرض عن جذب المياه التي تغطي بها نفسها، فسترتفع كل أمواج البحر وتجري باتجاه جسم القمر».



وبالعودة إلى الأطروحة التي طرحها قبل ذلك كل من كالكاغيني وغاليليو عن مد وجزر البحر والتي تم توضيحها بالحركة النسبية الآتية: تدور الأرض من الشرق إلى الغرب وفي الوقت نفسه تحركها السرعة v الانتقالية. عند a تضاف الحركتان سوية عند b وهما تميلان للتوازن، وبسبب قصورهما الذاتي، فإن مياه البحر تتبع هذه الحركة تماماً. وبسبب هذا التأخر، فإن الجزر يحدث مرتين مع هذا، إذا تم تركيب الحركتين بشكل تام، فسيكون لديهما فترة دوران

الأرض. لهذا يؤول غاليليو ظاهرة المد كدليل عن حركة الأرض، في حين يتمسك مناوئو النظام الكوبرنيكي بالانجذاب القمري (Dugas, 1957).

الأفكار التي كانت تدور عن قانون الانجذاب بحد ذاتها متغيرة ومبهمة. وبحسب روجر بيكون، فإنّ كل التأثيرات عن بعد كانت منتشرة في إشعاعات مستقيمة مثل الضوء، وقد وافق كبلر على هذا التناظر. ومعروف منذ زمن أقليدس أن كثافة الضوء المنبعث من مصدر يتفاوت بنسبةٍ عكسية مع مربع المسافة من المصدر. في هذا التناظر البصري، فإن فعاليات الحركة التي تنبعث من الشمس وتتصرف وفقها الكواكب، يجب أن تتبع القانون نفسه، ولكن بقي كبلر أرسطياً، فقد كانت القوة بالنسبة له تتناسب مع السرعة. بهذا استنتج كبلر النتيجة الآتية: من قانون المساحات، ثابت= rv. أي أن الحركات الفعالة للشمس على الكواكب تتناسب عكساً مع البعد عن الشمس. وحتى يتوافق هذا مع التناظر البصري، افترض كبلر أن الضوء ينتشر في كافة الاتجاهات في الفضاء، بينما الحركات الفعالة كانت فعالة فقط في مستوي خط الاستواء الشمسي (Dugas, 1957).

نشر جيوفاني باليانـي عام 1638م كتابه (عن الحركة الطبيعية للأجسام الثقيلة)، وقد بين فيه أنّ سرعة سقوط الأجسام كلها واحدةٌ في الفراغ، كما أنه وجد تناسباً بين الكتلة والوزن (فوربس، 1992م).

في بحث كتبه نحو عام 1590م رفض غاليليو تصنيف أرسطو للحركات بأنّها طبيعية وقسرية وإرادية (مجلة آفاق علمية، 1989م)، وفي هذا البحث ظهرت نتائج تجربته. ويعتبر راسل أن هذه التجربة أول أعمال غاليليو المهمّة (راسل، 2008م)، مع أنّه لم ينفذها شخصياً في برج بيزا.

وسبق أن وجدنا كيف أن العلماء العرب والمسلمين قد سبقوا علماء الغرب وأدركوا أنّ الأجسام كلها تسقط بالتسارع نفسه ضمن حقل الجاذبية لولا وجود مقاومة الهواء.

لقد كان غاليليو عرضة للأفكار الخاطئة الخاصة المنسوبة إلى بيكون، واقتناعه الجمالي بأنّ المدارات الكوكبية يجب أن تكون دائرية منعه من التسليم بصحة قوانين كبلر، وقد نفر باستمرار من نظرية الجاذبية لأنّه لم يتمكن من أن يقبل فكرة التأثير عن بُعد (Stableford, 2006) .

حتى عصر ديكارت خلال القرن السابع عشر الميلادي كانت الجاذبية تعدّ جزءاً من جوهر أي جسم، وكانت تعدّ نزعةً داخليةً في الجسم، إمّا للوصول إلى مكانه الطبيعي أو للاتحاد مع جسم آخر مشابه وأكبر منه. وقد تغير هذا المفهوم فجأةً على يد ديكارت بأنه ليس للعنصر الفضائي في ذاته إلا شكل وحجم وحركة، وهي صفات لا تتضمن أي دافع للحركة في اتجاه معين أو للاتحاد في كيان واحد. أما إذا بدا مثل هذا الدافع موجوداً، فلا بد أن ننسبه إلى مؤثرات خارجية، ويجري هذا عن طريق مادة سماوية تصنع دوامات حول الأرض يجعلها تدور بشكل يومي. وتحاول هذه المادة أن تنطلق في اتجاه المماس، وهو ما يولد قوة طاردة مركزية نصف قطرية بالنسبة إلى الأرض الدائرة حول نفسها (فوربس، 1992م).

وقبل ذلك كله كان ديكارت يدرك بأن الجاذبية قوة تجمع كل أجزاء الأرض إلى بعضها بعضاً وتشدها نحو المركز، ويقول في ذلك: «أرغب حالياً في أن تتفحصوا ما هي جاذبية هذه الأرض؟ أي القوة التي توحد كل أجزائها وتجعلها تنزع كلها نحو مركزها، أكثر أو أقل، تبعاً لكون كل واحدة منها أكثر أو أقل

حجماً وصلابةً، وقوام هذه القوة يكمن في أن أجزاء السماء الصغرى التي تحيط بالأرض، لما كانت تدور حول مركزها بسرعةٍ أشد بكثير من أجزاء الأرض، تميل بقوة أشد منها كذلك للابتعاد عنه وبالتالي تدفعه نحوه» (ديكارت، 1999م).

إذاً يرتكز ديكارت في تفسير ظاهرة الجاذبية إلى الفكرة الأرسطية ألا وهي امتناع وجود الخلاء في الطبيعة، وهو ما دفعه لتبني وجود المادة الأثيرية التي تملأ الفراغ المحيط بالأرض. لقد حاول ديكارت وغيره من علماء عصره البحث في ماهية الجاذبية، إلا أنّه اعترف بعدم معرفته للسبب الحقيقي لهذه الظاهرة، يقول في ذلك: «.. فأنا لا أعرف منهم أحداً، على سبيل المثال، لم يفترض الثقل في الأجسام الأرضية، ومع أنّ التجربة تبرز لنا بوضوح تام أن الأجسام التي تسمى ثقيلة تنزل نحو مركز الأرض، فنحن لا نعرف بذلك طبيعة ما نسميه ثقلاً، أعني أننا لا نعرف السبب أو المبدأ الذي يجعلها تسقط بهذه الكيفية، ويبقى علينا أن نتعلم ذلك من معطيات أخرى» (ديكارت، 1999م).

أعطى غاسندي قانون القصور الذاتي تعبيره الأكثر فعالية لدى مناقشته لحالة حجر متوضّع في فراغٍ خالٍ من أية مادة. يقول غاسندي: «بالأساس الأحجار هي بلا حراك وقد تبقى كذلك، وباعتبار أن تلك الحجارة لا تستطيع أن تتحرك من تلقاء نفسها على الإطلاق، كونها لا تحمل صلةً بالعالم، والتي قد تفترضها أيضاً حتى يتم إبطالها. لا يوجد مكان أدنى أو منطقة كذلك، حيث تكمن الحركة، لأنه قد لا يوجد منطقة أعلى قد يتم تصورها حتى ترتفع أو تصعد. إذاً دعنا نفترض دفعاً بسيطاً أو جاذبية نحو أي جزء آخر من الفراغ، مع حركات متساويةٍ أو منتظمةٍ بالإجمالي في أجزاء هذا الفراغ كافة، ولأنه يوجد سبب، لماذا ينبغي أن تكون أكثر بطئاً في بعض الأجزاء الأخرى كونه لا

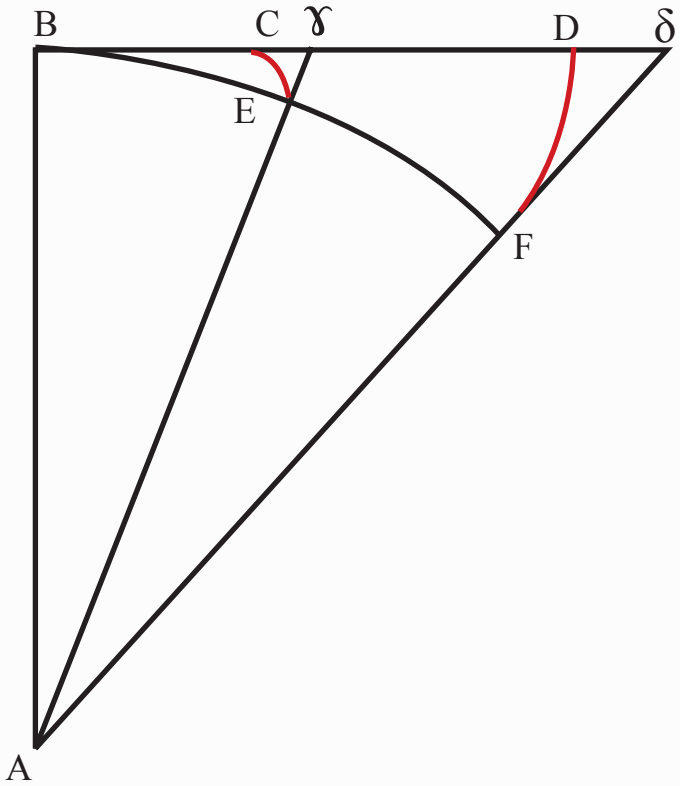
يوجد مركز حيث تكون أقرب، أو لعلها تتحرك للأمام بسرعة أكثر مما كانت قبل استمرارية قوة الدفع الأولى، يجب أن تعزز القوة الباعث الأول جداً، هذا بالنسبة إلى ازدياد سرعة حركة الحجارة. ولذلك تأتي بحيث تتحرك نحو الجسم وهو في وضع حركة مسبقاً ولا يزيد في مدته فقط، بل يسرع الحركة من ذلك. الحركة بأكملها تتأثر مرة واحدة، وهي غير قابلة للإزالة بذاتها ولا يمكن أن يجري إضعافها أو تحديدها، سوى بسبب مؤثرٍ خارجي ما، حيث القوة التي تكبحها. لنفترض أن الفراغ الذي ننتظر أن يتم قذف الحجر منه، هو خلاء مطلق أو هو بمثابة الفضاءات التخيلية، ومن ثم علينا الاعتراف بأنه قد يتم حمله في خط ثابت ومباشر ومن خلال الفضاء عينه وبحركة منتظمة ودائمة إلى أن يلتقي بفراغ آخر ما، مليء بالإشعاع المغناطيسي، مع مادةٍ مقاومةٍ أخرى» (Pav, 1966).

وبهذا يكون غاسندي قد فاق غاليليو الذي رأى العالم من خلال زجاج الجاذبية الملون، ففي حين كان غاليليو يراوغ بإيجاز حول فكرة الدائرية، اعتبر غاسندي الجاذبية كقوة خارجية والحركة الانجذابية بمثابة اندفاعٍ، لقد كاد يحقق النصر (Pav, 1966).

يبدو أنّ بوريللي قد تأثر بفكرة فلوطارخوس، فقد شبّه الكوكب في دورانه حول الشمس بحركة الحجر الدائر المربوط بخيط، ويميل الكوكب إلى الإفلات من الشمس، وقال: بما أنّ الكوكب لا يبتعد عن الشمس، فيجب أن توجد قوةٌ تجذبه دوماً نحوها. وعندما يتعادل ميل القوة الجاذب مع الميل للإفلات عن الدوران، عندها يبقى الكوكب في مداره (مطلب، 1978م).

في كتابه (الاهتزاز على مدار الساعة Horologium Oscillatorium, 1659) قدّم هايغنز ثلاثة عشر مقترحاً غير مثبتين عن القوة النابذة والبندول المخروطي، حيث قام هايغنز بحساب قيمة القوة الطاردة المركزية التي تؤثر على نقطة تتحرك على محيط دائرةٍ، إذا ما نسبت الحركة إلى مجموعة من المحاور التي تدور معها (فوربس، 1992م).

في هذه الأطروحة يعتبر هايغنز أنّ الجاذبية - أي الميل نحو السقوط- تظهر من خلال توتر الخيط الذي يدعم الجسم. ولقياسه، فمن الضروري اعتبار الحركة الأولى للجسم بعد أن ينقطع الخيط، يشبه الميل بهذه الطريقة التشبث بالحياة، قبل أن يكون لديه وقت ليضمحل كما في الشكل ادناه.



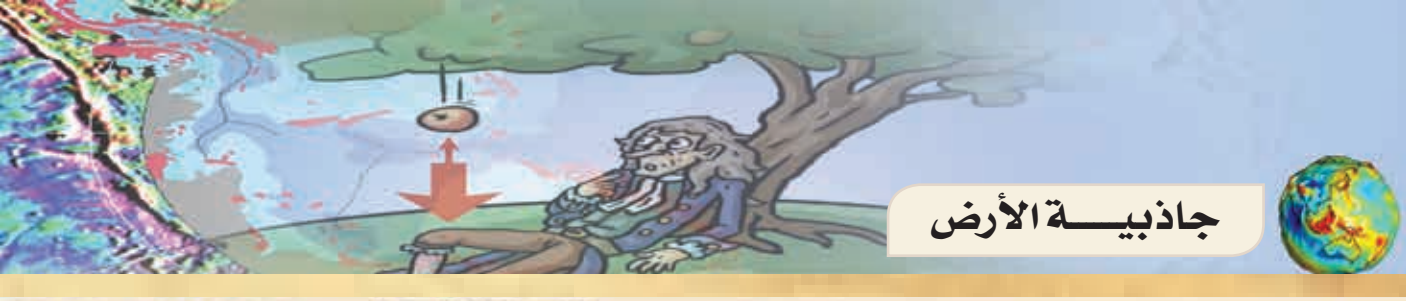
لتحديد هذا، يقوم هايغنز بتحديد جسم مربوط بعجلة دوارة، وبطريقة وضع فيها نظام وإشارة مربوطة بالعجلة، افترض أنّ العجلة كبيرة بما يكفي لتحمل رجلاً مشدوداً إليها، يحمل هذا الرجل خيطاً موصولاً بكرة من الرصاص بيده، بسبب دوران الخيط يمتد بالقوة نفسها كما لو أنه مثبت في مركز العجلة. وخلال أزمنة متساوية يقطع الرجل قوسين صغيرين جداً BE وBF. إذا انطلق من B، فستقطع الكرة على طول مسارين مستقيمين BC وBE وهما يساويان هذين القوسين، لا تسقط النقطتان C وD على نصفي القطرين AE وEF، بل خلفهما بقليل جداً (Dugas, 1957).

فإذا تزامنت النقطتان C وD مع والنقاط هي على نصفي قطر AE و AF فستتحرك الكرة الرصاصية بعيداً عن الرجل على طول نصف القطر. تزداد المسافات و..... كأعداد مربعة 1،4،9،16..... وهو أكثر دقة في حين تصبح الأقواس EF،BF.... أصغر. الآن وحسب قانون غاليليو، فإن الجسم الذي يقطع مسافةً ويبدأ سقوطه من السكون يتزايد بأعداد مربعة بشكل متتالي 1- 4- 9- 16.... لهذا، فإن الميل المطلوب من هذه الفرضية سيكون نفسه لذلك الجسم الثقيل المعلّق بخيط. في الواقع، إن النقطتين D وC تقعان خلف . ولهذا وحسب نصف القطر الذي يتوضعان عليه، فإن الوزن يميل إلى تحديد المسلك الذي يكون مماسياً لنصف القطر. لكن وفي لحظة انفصال الكرة الرصاصية والعجلة، يمكن اعتبار المنحنيات ذات المماسات Fδ، .... وبالنتيجة يجب أن تؤخذ المسافات FD وEC.... بعين الاعتبار على أنها متزايدة كسلسلة 1- 4- 9- 16.... وها هي ذي نتيجة هايغنز: «إن ميول كرة مربوطة بعجلة تدور هي نفسها، وكأن الكرة جنحت للتقدم على طول نصف القطر بحركة متسارعة منتظمة. في الحقيقة،

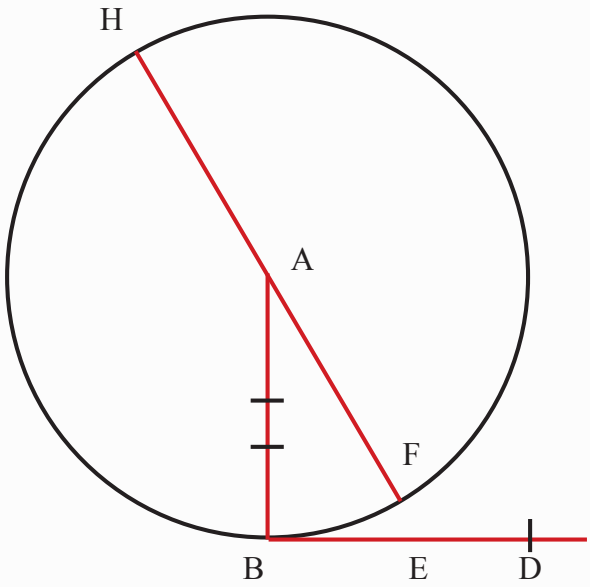
يكفي بأن نلاحظ هذه الحركة منذ البداية. بعد ذلك، بوسع الحركة أن تتبع أي قانون آخر. هذا لا يستطيع أن يؤثّر على الميول الموجود في بداية الحركة في أي حال، هذا الميول مشابه تماماً إلى ذاك الجسم المعلق بخيط. ومنه نستنتج أنّ القوى النابذة للجسيمات غير المتساوية والتي تتحرك بسرعات متساوية على دوائر متساوية لديها الدوران نفسه بالنسبة لبعضها بعضاً كجاذبيتها، أي كمقادير موادها الصلبة، وهذه لمحة عابرة عن مفهوم الكتلة. بالفعل، تميل الأجسام كافة للسقوط بالسرعة نفسها في الحركة المتسارعة المنتظمة نفسها، لكن ميولها لديها اللحظة التي تكون أكبر كلما كانت الأجسام بحد ذاتها أكبر. لابد أنه الشيء عينه بالنسبة للأجسام التي تبتعد عن المركز، حيث إنّ ميولها تشابه تلك التي تنشأ من جاذبيتها، وعندما يكون لدى الكرة الميل ذاته دائماً للسقوط، عندما تكون معلقة بخيط، فإن ميل الكرة المربوطة إلى عجلة تدور تعتمد على سرعة دوران العجلة. ويبقى علينا أن نوجد مقدار الميل لسرعات العجلة المختلفة» (Dugas, 1957).

لقد توسع كثيراً هايغنز في التقديم لمبدأ القوة النابذة، وسنذكر الآن الافتراضات التي طرحها باختصار شديد:

- **تتناسب القوة النابذة مع نصف القطر، لأنّ فترة الدوران محددة.**
- **لأنّ السرعة محدودةٌ على محيط الدائرة، فإنها تتناسب عكساً مع القطر.**
- **بما أنّ نصف القطر محدودٌ، فإنّه يتناسب مع مربع السرعة على المحيط.**
- **بما أنّ القوة النابذة محدودة، فإنّ فترة الدوران تتناسب مع الجذر التربيعي لنصف القطر.**



- «عندما يتحرك جسيم على محيط دائرة، فإنها قد يكتسب أثناء السقوط من ارتفاع يساوي مربع القطر، وستكون قوته النابذة تساوي جاذبيته. بمعنى آخر، إنه سيشد الحبل المربوط بالقوة نفسها كما لو أنه معلّق».



وقد برهن **هايغنز** على الفرضية الأخيرة كما يأتي: يحدد الجسم المعلق محيط دائرة بحركةٍ منتظمةٍ وبسرعةٍ قدرها $\sqrt{Rg}$ والتي سوف يكتسبها لدى سقوطه من ارتفاع $CB = \frac{R}{2}$. فإذا ابتعد إلى B، فإنه ينتقل على طول المماس بشكلٍ منتظم قاطعاً المسافة BD= R في زمن $\sqrt{\frac{R}{g}}$ سيقضيه في السقوط على طول CB. سنفترض أن احتكاكاً BD صغيراً جداً، أي BE، ويرسم خطاً مستقيماً EFAH. سنفترض أيضاً أنّ $\frac{CG}{CB}=\left(\frac{BE}{BD}\right)^2$. من ثم BE أو $(\sqrt{b^2-4ac}$ يتناسب طرداً مع زمن السقوط الحر على طول CG والذي يساوي $\sqrt{\frac{2CG}{g}}$:

يقطع الجسم المنفصل عند B مسافة قدرها BE بشكل منتظم في زمن سيكون قد قضاه في سقوط حرٍ من ارتفاع CG. حالياً يمكن للقوس BF أن تقرب BE. إذا تبين أنّ CG= FE، فسيكون جرى إثبات أن ميول القوة النابذة تساوي ميول الجاذبية، لأننا أخذنا الجسيم بعين الاعتبار.

إذاً: $$FE = \frac{BE^2}{2R} = \frac{R}{2} = \left(\frac{BE}{BD}\right)^2$$

لابد من الإشارة إلى أنه بالنسبة لقوة هايغنز النابذة فهي ليست أبداً قوة افتراضية أو خيالية، بل على العكس، فقد أجرى عليها القياس والإجراء وامتيازاً خاصاً وذلك عندما طابقها مع الجاذبية في حالة خاصة كما بينا للتو (Dugas, 1957).

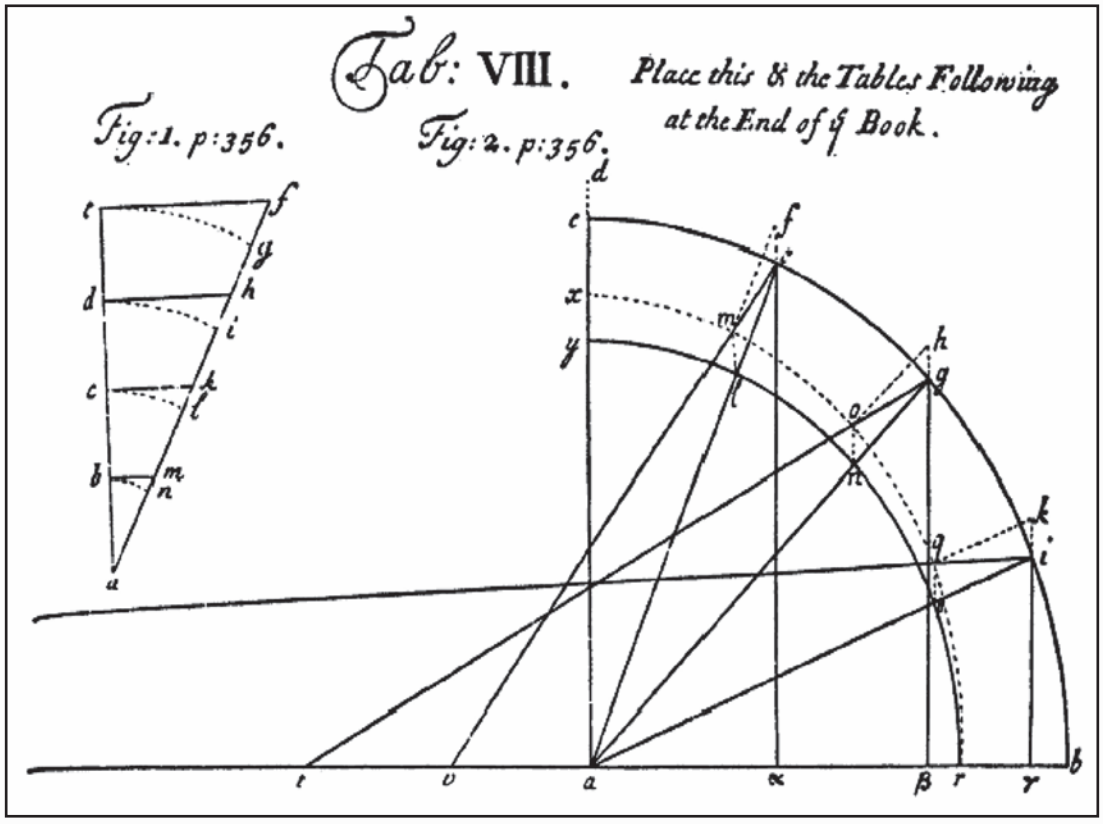
تقدم هايغنز في عام 1669م إلى الأكاديمية الملكية للعلوم بنظريةٍ معقدةٍ جداً تتعلق بالجاذبية الأرضية، بحيث إنّه تخلى فيها عن نظرية الدوامات الديكارتية ووضع بدلاً منها نظريةً جديدةً تفيد بوجود مجموعةٍ من الحركات الدائرية تجعل أبسط الجزيئات تدور حول الأرض في مساحات كرويةٍ وفي كل الاتجاهات الممكنة. لقد قدم هايغنز هذه النظرية قبل أن يصدر نيوتن كتابه (المبادئ) بنحو ثمانية عشر سنة، وبعد أن اطلع هايغنز على كتاب نيوتن عام 1688م عبر عن خيبة أمله قائلاً: «ها هي جميع الصعوبات المتعلقة بقوانين كبلر تجد من يذللها، في شخص العالم الشهير نيوتن الذي قضى على نظريات الدوامات الديكارتية مؤكداً أن الكواكب تبقى مشدودة إلى مداراتها بفعل الجاذبية وأن انحراف الكواكب عن مركزها خلال دوراتها، هو أساس شكل مداراتها الإهليلجية»، وهو بذلك يعبر ضمناً بأن نيوتن قد توصل لاكتشاف شيء لم يتوصل هو إليه، خصوصاً قانون الجاذبية العامة التي أوصلته للمدارات الإهليلجية، وهو

مـا عجـز عنـه هايغنـز بسـبب تمسـكه بفكـرة المـدارات الدائريـة ورفضـه القـول بالجاذبيـة وبسـبب وفـاءه للعقلانيـة الديكارتيـة (يفـوت، 1989م).

لقـد صـاغ روبـرت هـوك R. Hooke (تـوفي 1703م) عـام 1674م وبوضـوح تـامّ في تقريـر لـه بعنـوان (محاولـة لإثبـات الحركـة السـنوية لـلأرض An Attempt to Prove the Annual Motion of the Earth) مبـدأ الجاذبيـة الكوكبيـة قائـلاً: إن «كل الأجسـام وبـدون اسـتثناء تمـارس قوتهـا الشـعاعية أو ثقلهـا متوجهـة نحـو مراكزهـا، وهـي ذات ميـزة بأنهـا لا تحتفـظ بأجزائهـا فقـط مـن الانفـلات كمـا نراهـا في حالـة الأرض، بـل أيضـاً تجـذب الأجـرام السـماوية كافـة التـي تحـدث لتكـون ضمـن مجـال جاذبيتهـا، حيـث ليسـت الشـمس تقـوم بهـذا ولا يؤثـر القمـر علـى الاسـتمرار وحركـة الأرض فحسـب، بالطريقـة التـي تؤثـر الأرض عليهـا نفسـها، بـل أيضـاً عطـارد والزهـرة والمريـخ والمشـتري وزحـل وبسـبب جاذبيتهـم لديهـا تأثيـر كبيـر علـى حركـة هـذه الأجسـام». وقـد افتـرض هـوك أن الانجـذاب يتناقـص مـع المسـافة أو البعـد، أي قانـون التربيـع العكسـي، وبـلا شـك اسـتدل علـى ذلـك مـن موضـوع التناظـر البصـري (Dugas, 1957).

وقبـل ذلـك بعشـر سـنوات، أي في عـام 1664م، كان هـوك ينظـر إلـى المشـكلة المتعلقـة بالحركـة المداريـة بطريقـة تختلـف عـن نظـرة نيوتـن، فقـد عـارض فكـرة توازن القـوى التـي اقترحهـا نيوتـن مـن قبـل، والتـي تقتضـي وجـود قوتـين إحداهمـا دافعـة للداخـل والأخـرى للخـارج، وتعـادل هاتـين القوتـين هـو الـذي يبقـي الجـرم دائـراً حـول جـرم آخـر. كمـا أسـقط هـوك فكـرة الدوامـات التـي قـال بهـا ديـكارت التـي تعـد مسـؤولة عـن دفـع الأجسـام إلـى الـوراء في مداراتهـا، وقـدم فكـرة «التأثيـر عـن بعـد» للجاذبيـة بـدلاً منهـا (غريبين، 2012م). ظهـر ذلـك في كتابـه (الميكروغرافيا

Micrographia أو وصف الأشياء البالغة الصغر، ونشره بين عامي 1665-1664م) حيث عرض هوك من خلال رصده للقمر رفضه النظرية الدوامية واستنتج أنّ قوة جذب الثقل توجد في القمر والكواكب من أشكالها الكروية وأن حقيقة سلاسل المرتفعات Ridges على القمر تقوم على بنية ثابتة كما هو الحال على الأرض، كما ميز بين مركز ثقل القمر وبين مركزه الجغرافي، وفي رصده للقمر لم يشر هوك إلى ما سيكون قانون التجاذب عليه، إلا أنّه استعمل قانون التربيع العكسي لجذب الثقل، بدون أن يعرضه بشكلٍ واضح. وقد رصد في آخر منشور في الكتاب نفسه القوة المرنة للهواء، حيث درس القوة التي يضغط بها على الأرض عمود مخروطي من الهواء. لقد كان عملاً شهيراً على نحو وافٍ لينقل اقتراحات هوك إلى الحقل، ومهد بطريقةٍ ما الطريق للقبول العام للآراء التي ستظهر بعد اثنين وعشرين سنة في (مبادئ) نيوتن. كما مُنِح عمل هوك استعراضاً طويلاً وحافلاً بالإكبار في مجلة (قصر علماء أولدنبورغ) في الإجراءات الفلسفية، ومما يلفت الانتباه بصورةٍ خاصة هو عودة نيوتن عدة مرات إلى الميكروغرافيا؛ وتشير قائمة أوراق بورتسموث إلى المقتطفات التي أعدّها من ذاك العمل، واعترافه في نظام العالم باكتشاف قانون بويل بواسطة هوك والآخرين، كما يشير فيما يبدو إلى الجزء من الميكروغرافيا الذي يُعطى فيه قانون التربيع العكسي ضمنياً (Patterson, 1949).



يوضح هذا الرسم البياني كيفية اجتماع قوة جذب ثقل الأرض مع القوة النابذة لجسم عند خطوط عرض مختلفة، وهو نقلٌ عن محاضرة لهوك قدمها في 1687/2/9م، وقد قال هالي إنّها أثّرت في أعمال نيوتن. (نسخة من أعمال هوك المنشورة بعد وفاته، مكتبة جامعة كاليفورنيا) (Patterson, 1949).

انطلق ليبنتز (القرن 18م) في نقده لما جاء في كتاب المبادئ لنيوتن من القواعد التي وضعها كبلر في علم الفلك، وما أراده ليبنتز هو إثبات صلاحية انطباقها الممكن على عالم ممتلئ بالمادة، وهو العالم الذي تتعرض فيه الحركة لإعاقة، كما تتعرض حركة الأجرام السماوية لإعاقة، وهذا مالم يخطر ببال كبلر، ومع ذلك فإنّ ليبنتز يمتدح عمل كبلر ويعده أول من قال بنظرية الدوامات قبل ديكارت الذي نقله عنها، ويؤكد الباحث كويري Koyer أن كبلر قد تخلى في كتابه (خلاصة الفلك الكوبرنيكي) عن نظرية الدوامات ووضع مكانها نظرية التجاذب والتنافر المغناطيسي اللذين تمارسهما الشمس على الأجرام التي تدور حولها، وربما حدث ذلك دون علم من ليبنتز، لذلك استمر بتمجيد الفلك الكبلري كفلك يعتقد أن الكواكب تسبحً في دوامة أثيرية تجبره حركتها على أن يرسم المدار المخصص له، مع فارق ضئيل مع ما قال به ديكارت، وهو أن حركات الكواكب حركاتٌ منسجمةٌ، بمعنى أنها حركات دائرية تتحرك بها الكواكب حول الشمس، وهي حركات، اعتقد خطأً، أنها تتناسب عكسياً مع مربع المسافة الفاصلة بينها وبين الشمس. وبناءً عليه استنتج ليبنتز تعريفاً مجرّداً للدورة المنسجمة الذي اهتدى من خلاله، وبشكلٍ خاطئٍ، كذلك إلى قانون الحقول لكبلر (يفوت، 1989م).

ولنا أن نتلمس رفض ليبنتز لجاذبية نيوتن بقوله الذي نشره عام 1715م: إنّ «الجسم لا يتحرك طبيعياً إلا بجسم آخر يدفعه بالتصاقه به؛ ويستمر في الحركة بعد ذلك إلى أن يعيقه جسم آخَر يتصل به. أي حركة أخرى في الجسم إما عجائبية وإما خيالية. بهذا تنهار الجاذبيات بالمعنى الحصري والتأثيرات الأخرى التي لا تفسرها طبائع المخلوقات، والتي يجب اللجوء في تفسير حدوثها إلى المعجزة أو إلى المحالات، أي إلى الخاصيات الخفية التي تقول بها الفلسفة المدرسية والتي أخذ البعض يطلعون علينا بها تحت اسم القوة المموه، ولكنهم يعيدوننا بذلك إلى مملكة الظلمات» (كروزيه، 1986م).

لقد كانت جهود ليبنتز ترمي إلى التوفيق بين نظرية الدوامات الديكارتية والجاذبية النيوتونية، لكنها محاولة باءت بالفشل، لأنّ تحريك الدوامات الديكارتية بحركةٍ دائريةٍ منسجمةٍ أمر لا يخطر ببال. مع ذلك كان ليبنتز مثل ديكارت، صاحب ميكانيك سابق على الميكانيك النيوتوني (يفوت، 1989م).

يرى الفيلسوف الألماني رودولف كارناب أنه ربما تمكن الإنسان أن يقدم لأوّل مرةٍ في تاريخ العلم، نظريةً منهجيةً شاملةً تتعرض لظاهرات لا تخضع للملاحظة على يد نيوتن، وذلك من خلال صياغتها على شكل مفاهيم نظرية وهي: قوة الجاذبية العامة، مفهوم الكتلة العام، الخصائص النظرية لأشعة الضوء...إلخ. ونراه يسأل مستهجناً عن عدم وجود أيّ شخص قبل نيوتن فكر بطرح التساؤل: ما هي العلاقة بين القوى التي تجعل الأجسام السماوية ترتبط مع بعضها، وما هي القوى الأرضية التي تسبب سقوط الأجسام على الأرض؟ وتجلت عبقرية نيوتن أنّه أفلت من التقسيم الأرسطي لما هو (أرضي) وما هو (سماوي)، وتقريره أنّ الطبيعة واحدة، واستطاعت نظريته تفسير سقوط التفاحة وقوانين كبلر في حركات الكواكب، كما استطاعت التنبؤ بوجود تجاذبٍ بين الأجسام المجاورة لبعضها على منضدةٍ (كارناب، 1993م).

للأسف فإنّ طرح كارناب السابق مثله مثل غيره، قائمٌ على الجهل بتاريخ العلوم العربية والعلوم التي سبقتها، فهو يبدأ من عصر العلم الحديث (عصر غاليليو وما بعده)، وقد وجدنا سابقاً أنّ ما جاء به العلماء العرب والمسلمين كافٍ – مع قلّته- ليدل على إسهامهم في نظرية الجاذبية، ومعالجتها وفق ما توفر لديهم من معلومات سواء على المستوى الرياضياتي أو المستوى التجريبي.

حتى يؤسس نظريته؛ اعتمد نيوتن على قانون السقوط الحر لغاليليو وعلى قوانين كبلر الثلاثة التي تصف حركة الكواكب حول الشمس، إضافةً لما عُرِفَ عن حركات المدّ والجزر والمذنبات، إضافة للظروف التي ساعدته من تشجيعٍ للعلم أيام الملك شارل الثاني مؤسس الجمعية الملكية (راسل، 2008م).

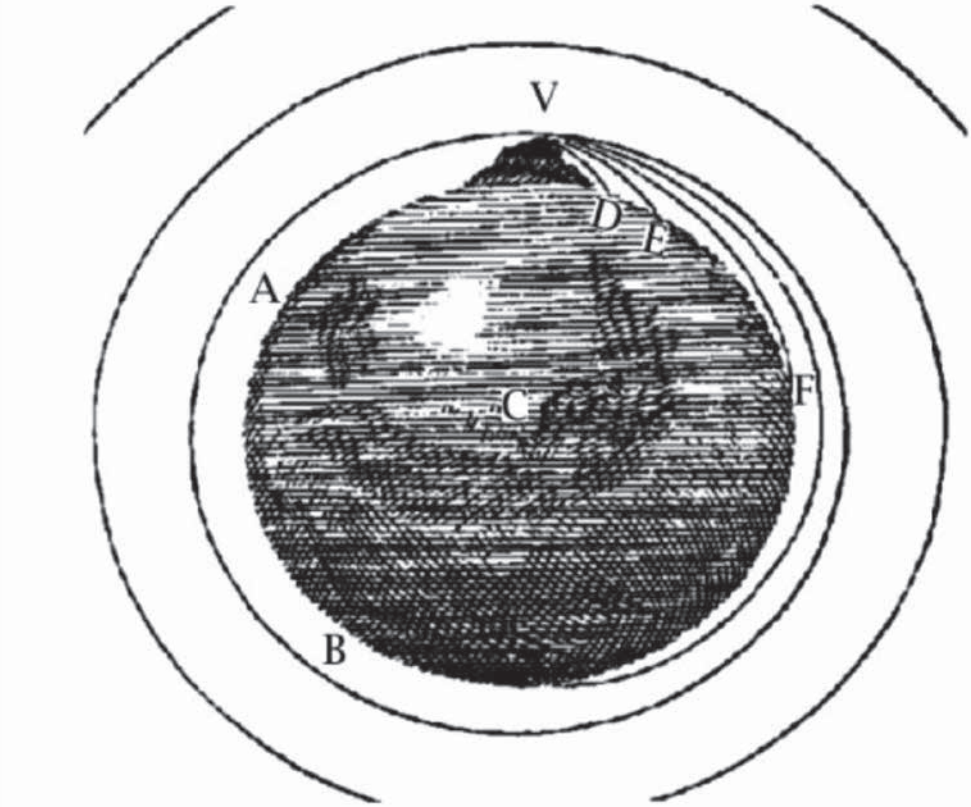
بالتأكيد لم تكن أسطورة سقوط التفاحة على رأس نيوتن هي التي أوصلته إلى قانون الجاذبية، فقد بدأ نيوتن التفكير في نظرية الجاذبية منذ عام 1666م، وكان يقيم وقتها في الريف بعيداً عن الطاعون الكبير الذي انتشر في ذلك الوقت في المدينة، لكنه لم ينشر كتابه (المبادئ) إلا بعد 21 سنة أي عام 1687م، حيث أحكم نظريته في الجاذبية بالتدريج (Fishbane, 2005) ، وتحديداً حتى تسنى له القيام بإجراء حساباتٍ فلكيةٍ كبيرةٍ بوساطة حساب التفاضل والتكامل (غنيمة، (د.ت)).

لـم يجعـل نيوتـن مـن قانـون الجاذبيـة إحـدى المقدمـات المسـلم بهـا في كتابـه، وإنمـا انطلـق مـن ملاحظـاتٍ فرديـةٍ، ووصـل بالاسـتقراء إلـى قانـونٍ عـام، وتنبـأ وعلـل مـن القانـون العـام حقائـق فرديـة أخـرى. ويـرى برتراند راسـل أنـه بينمـا بقـي قانـون الجاذبيـة لنيوتـن أكثـر مـن مائتـي عـام يفسـر تقريبـاً كل الحقائـق المعروفـة المتعلقـة بحـركات الأجـرام السـماوية، فقـد بقـي هـذا القانـون في عزلـةٍ وغمـوضٍ بـين قوانـين الطبيعـة، حتـى جـاءت نظريـة أينشـتاين النسـبية العامـة عـام 1915م، لتضعـه في مكانـه المناسـب في الإطـار العـام للفيزيـاء، وتُجـري عليـه بعـض التصحيحـات الدقيقـة، ووجـد عندهـا أنّ قانـون نيوتـن في الجاذبيـة أقـرب للهندسـة منـه للطبيعـة بالمعنـى القـديم (راسـل، 2008م). وقـد كان أينشـتاين علـى حـق عندمـا افتـرض بـأنّ سـرعة الجاذبيـة تفـوق سـرعة الضـوء، وقـد تأكـد علمـاء الفلـك مـن ذلـك باسـتغلال الاصطفـاف النـادر للكواكـب الـذي حـدث عـام 2004م، وقيـاس كميـة الضـوء الصـادرة عـن نجـم بعيـد لوتـه جاذبيـة كوكـب المشـتري عندمـا مـرّ الكوكـب أمـام النجـم (مجلـة علـوم وتكنولوجيـا، 2004م).

كان نيوتـن يعتبـر قانونـه عـن الجاذبيـة تفسـيراً مقبـولاً للظاهـرات الطبيعيـة، ولكنـه لا يتعـرض لأسـبابها، واعتـرف أكثـر مـن مـرة بعـدم معرفتـه لمصـدر هـذه القـوة الهائلـة، إلا أنّـه اقتـرح رأيـين (غنيمـة، (د.ت)):

- **الأول: أنّ سبب الجاذبية هو إرادة الخالق.**
- **الثاني: أنّـه يوجـد مـادةٌ أثيريـةٌ موزعـةً توزيعـاً غيـر منتظـم في الفضـاء، إذ تكون أكثف في بعض الجهات من الجهات الأخرى، وبذلك ينشأ عن تضاغط هذه المادة اقتراب الأجسام أو تجاذبها، وهي فكرة ديكارت عن وجود الأثير لتفسير حركة الأجرام السماوية.**

لقد أسس نيوتن نظريته في الجاذبية على مبدأ دراسة العلاقة بين القوة والكتل والمسافات والتي استطاع أن يجمعها بقانونٍ واحدٍ. يقول نيوتن في كتابه (المبادئ): «لقد فرغنا من تفسير ظاهرات السماء والبحار بقوة الجاذبية، ولكنا لم نحدد بعد علة تلك القوة، من المؤكد أنّها تصدر عن علة كائنة في أعماق مراكز الشمس والكواكب دون أن يعتري تلك الجاذبية نقص في قوتها لا طبقاً لكمية سطوح الجزيئات التي يؤثر عليها، كما تفعل العلل الميكانيكية عادةً، وإنما طبقاً لكمية المادة الصلبة التي تحويها، وإنها تنشر قوتها في كل جانب في مسافاتٍ هائلة، وتتناقصُ دائماً كلما تضاعفت المسافات.. لكني لم أكن قادراً على اكتشاف علة تلك الخصائص للجاذبية من الظاهرات، **وأنا لا أكوّن فروضاً، لأن ما لم يكن مستنبطاً من الظاهرات إنّما هو فرض، وليس للفروض مكان في الفلسفة التجريبية سواء كانت الفروض ميتافيزيقية أو فيزيائية**، سواء كانت فروضاً عن كيفيات خفية مجهولة أو عن صفات ميكانيكية. في تلك الفلسفة تستنبط القضايا الجزئية من الظاهرات، ثم نجعلها قضايا عامة بالاستقراء؛ وقد اكتشفت بهذه الطريقة خصائص مثل عدم قابلية الأجسام للنفاذ وحركاتها وقوتها الدافعة وقوانين الحركة والجاذبية. إننا قانعون بمعرفتنا أن الجاذبية موجودة في الواقع وأنّها تؤدي دورها حسب قوانين شرحناها، وأنّها تفسّر كل حركات الأجرام السماوية والبحار» (زيدان، 1977م).



توضيح لنيوتن يحاول من خلاله أن يفسّر توقعاتنا لمسارات أجسامٍ مقذوفةٍ سريعةٍ جداً من أعلى قمة جبل بالقرب من جسمٍ جاذبي كبير (مثل كوكب الأرض) (كوهين، 2014م).

لقد كان نيوتن يتردد في منهجه العلمي بين إنكار مبدأ السببية من جهة أولى، ورؤيته للسببية كمبدأ كلي يسود عالم الظاهرات وأن القوانين في طبيعتها سببية، وبين اعتقاده بهذا المبدأ في وقتٍ لم يقم بإثباتٍ لهذا المبدأ بالملاحظة والتجربة. ويقول في ذلك: «ما أسميه جاذبية يمكن أن يجري بالدفع أو أيّ طريقة أخرى مجهولةٍ لي؛ استخدم كلمة (جاذبية) هنا لتدل بوجه عام على أي قوةٍ عن طريقها تميل الأجسام الواحد نحو الآخر كيفما كانت العلة. يجب أن نتعلم من ظاهرات الطبيعة ما الأجسام التي تجذب أجساماً أخرى وما قوانين الجاذبية وخصائصها قبل أن نبحث في العلة التي بفضلها تتم الجاذبية». ويظهر من نصّه السابق القلق من التعرض لسؤال مثل: لِمَ يجذب جسم ما جسماً آخر؟ وسبب هذا القلق هو تمسكه بالمنهج التجريبي الذي يتضمن القيام بملاحظات وتجارب مصاغة بطريقةٍ رياضياتيةٍ، كما أنّه وريث للتصور العلّي من أفكار السابقين (زيدان، 1977م).

إنّ النتيجة التي توصل إليها نيوتن والتي تعكس بدورها البعد المعرفي الذي يشكل خطاب هذا العصر هي أنّ قوة الجاذبية قوةٌ كونيةٌ تخضع لها حركة الأفلاك، ومن ثم يتحول الكون بالنسبة لهذه القوة إلى بناء آلي ضخم تعمل فيه الجاذبية وفقاً لقانونٍ عام. وعليه فإنّه لم يعد العالم مجرد هيكل تحرّكه قوى غير منظورة (قاسم، 2001م).

كانت مشكلة نيوتن أكبر بكثير من مشكلة غاليليو. فهو يريد من جملة ما يريد إثبات أنّ قانون الجاذبية الذي توصل إليه يثبت صحة قوانين كبلر الثلاثة. لنتصور أنفسنا أمام سؤال كهذا، وليس لدينا معلومات ولا حتى فكرة عن حساب التفاضل والتكامل ولا معادلةٍ تفاضليةٍ. فكيف ندرس حركة جسم

متحرك يسير في اتجاه وتؤثر فيه قوة في اتجاه آخر؟ لنفرض أنه يعرف تفريق الحركة إلى اتجاهين، ولكن السرعة هنا لا تتغير متناسبة مع الزمن كمسألة غاليليو، لأنّ القوة تتغير عندما يتحرك الجسم. هنا طلع نيوتن على العالم بمفهوم جديد، هو الدفق، إذ شبه السرعة بتدفق سائل في واحدة الزمن؛ ولكنه يريد السرعة الآنية التي هي جوهر المشكلة. لقد اعتبر الزمن مجزأ إلى آنات صغيرةٍ وحسب السرعة في كل آنٍ معتبراً أنّها منتظمةٌ وهذا اعتبارٌ مقبولٌ لأنّ المتحرك لن تتغير سرعته كثيراً خلال جزءٍ صغيرٍ من الثانية (الأتاسي، 2010م).

وحتى يسوّغ مساواة الفعل وردة الفعل في حالة الجاذبية، جادل نيوتن على النحو التالي: «افترض أنّ عائقاً تم وضعه ليعترض ويعيق مجموعة أي جسمين A، B وينجذبان تبادلياً كل واحد نحو الآخر، ثم إذا كان الجسمين ومثلاً A أكثر جذباً نحو الجسم الآخر B مما يكون الجسم B نحو الجسم الأول A، فسيكون العائق مثاراً بقوة بفعل ضغط الجسم A أكثر مما يضغط عليه الجسم B، ولهذا لن يبقى في حالة واحدة متوازنة، لأن الضغط الأقوى هو الذي سيسيطر عليه وسيجعل نظام الجسمين ومع العائق يتحركون مباشرةً نحو الأجزاء الموجودة على B وفي مساحات حرة ويتقدمون بشكل متواصل بحركةٍ متسارعةٍ دائمةٍ والتي تكون ضئيلةً، وعلى عكس القانون الأول. وبالنسبة للقانونٍ الأول، ينبغي على النظام أن يبقي حالته في السكون أو بحركة موحدة للأمام في خط مستقيم، ولهذا لابد للجسمين أن يضغطا وبالتساوي العائق، وأن ينجذبا بالتساوي كل منهما للآخر»، لقد «أجريت هذه التجربة على حامل حجري وحديد. إذا وضعنا هذين الشيئين كل على حدة في وعاء مناسب، وهما يقومان بالطفو أحدهما بالآخر في ماء راكد، ولا أي منهما سيدفع الآخر. لكن

سيكونان منجذبان لبعضهما بالتساوي وسيساندان بعضهما بالضغط وأخيراً يسكنان في حالةٍ متوازنةٍ» (Dugas, 1957).

من جهةٍ أخرى، ناقش نيوتن قوانين الحركة الدائرية المنتظمة في عام 1666م، وذلك بتحليلٍ مماثلٍ للذي قام به هالي، وانطلاقاً من قانون كبلر الثالث، صاغ قانون الانجذاب الذي يتناسب عكساً مع مربع المسافة (Dugas, 1957). وبدقةٍ أكثر مما فعله أسلافه، حاول التحقق من هذا بأسلوب تجريبي لهذا القانون؛ حيث حاول أن يكتشف فيما إذا كانت الأرض تمارس ذلك فعلاً على القمر وفقاً لهذا القانون وفيما إذا كان بالإمكان تعريف هذه الجاذبية بالثقل الأرضي. بما أنّ نصف قطر مدار الأرض هو في الترتيب الستيني لأنصاف الأقطار الأرضية، فالقوة التي تبقي القمر في مداره هي أضعف 3600 مرة من الثقل في مركز الأرض. حالياً يسقط الجسم سقوطاً حرّاً بجوار الأرض مسافةً قدرها 15 قدم باريسية في الثانية الأولى، لهذا سيسقط القمر بمسافة بوصة باريسية في الثانية الأولى، علماً أن البوصة الباريسية وحدة قياس أطوال قديمة، وهي أطول من البوصة الإنكليزية، حيث إنّ كل 1 بوصة باريسية = 2.70 سم. وكل 12 بوصة باريسية = قدم باريسية. ومن السهل حساب سقوط القمر وذلك بمعرفة فترة حركة القمر ونصف قطر مداره. ومن بيانات نصف قطر الأرض التي كانت سائدة في انكلترا، حصل نيوتن فقط على بوصة. وعندما تمت مواجهته بهذا الاختلاف، تخلّى عن فكرته، وبعد 16 عاماً فقط وفي عام 1682م تعلم حساب خط الطول الأرضي الذي أنجزه بيكارد Picard، وقد حدث هذا في اجتماع الجمعية الملكية، وبافتراض القيمة بوصة. بعد ذلك، استطاع أن يعلن: أن «القمر ينجذب إلى الأرض، وفي الواقع فإن الحركة هي دوماً مستقيمة

يحتفظ بها في مداره «unam gravitare in Terram et vitatis retrahi semper a motu rectilince et in orbe suo retineri» مركز الأرض. الأرضي. مقترحاً التي ت» بتطبيق الاستقراء على مبادئ فلسفته لتأكيد الجاذبية الكونية. لقد أتاحت نظرية حقول الجاذبية له التركيز على مركز كتلة النجوم التي من المفترض أن تكون متشكلةً من طبقاتٍ مركزية متجانسة، وذلك لتحويلها إلى نقاط مادية يمكن دراسة تسارعاتها التبادلية، ثم قيّم نيوتن كتل وكثافات الشمس والكواكب المحاطة بالأقمار التابعة لها. أيضاً حسب الثقل في نقطة على سطوحها، وبين أنّ المذنبات محددةٌ بامتداد مسارٍ إهليليجي جداً واستبدل هذه المسارات بالقطع المكافئ وحسب عناصرها. بهذه الطريقة، استطاع أن يربط أجزاء مسار المذنب التي ظهرت على كل جانب من الشمس عام 1680م، بعد ذلك حصل هالي على هذا الظهور في 1531م و1607م و1682م وكانت تلك الأعوام للمذنب نفسه (Dugas, 1957)، والذي سمي فيما بعد باسم (مذنب هالي).

لكن ثمة دليلٌ عُثر عليه في أوراق نيوتن الخاصة يفيد بأنّ أعماله التي أنجزها عن الجاذبية خلال سنوات الطاعون لم يكن فيها أي إشارة إلى القمر، وأنّ ما دفعه للبحث في هذا الموضوع كان الفكرة القديمة التي تقول: لو أنّ الأرض تدور حول محورها فإنها سوف تتصدع وتتناثر بسبب قوة الطرد المركزية. فكان أن قام نيوتن وحسب هذه القوة الطاردة على سطح الأرض وقارنها بالقوة المقدرة قياساً للجاذبية وأوضح أنّ قيمة الجاذبية على سطح الأرض أكبر بمئاتٍ المرات من قيمة القوة الطاردة إلى الخارج، وهو ما جعل حجة المدعين بتصدع الأرض واهية (غريبين، 2012م).

لقد بين نيوتن أنّ دوران الأرض يستلزم تسطيح القطبين وبحسب تفاوت الجاذبية على طول خط الطول ربط نظرية المدّ والجذب المشترك للقمر والشمس، وهو ما سوغ رؤية منجمي القرن السادس عشر. أخيراً، استطاع حساب تأثيرات القمر والشمس على الانتفاخ الاستوائي وتوصل إلى نظرية تعاقب الاعتدالين (Dugas, 1957).

وجّه فولتيير نقده لنظرية نيوتن قائلاً: «كل الفرنسيين تقريباً، علماء وغيرهم، يرددون ذلك الانتقاد قائلين: لماذا لم يستخدم نيوتن لفظ الاندفاع الذي هو أيسر في الفهم، بدلاً من لفظ الجاذبية الذي هو أعسر؟» وكان جواب نيوتن على هذا الانتقاد قوله:» إنكم لا تفهمون لفظ الاندفاع حق الفهم، كما لا تدركون المدلول الصحيح للفظ الجاذبية.. ثانياً: يتعذر عليَّ القولُ بالاندفاع، لأنّ القول به يتطلب الاعتقاد بأنّ في السماء مادةً تقوم بدفع الكوكب وتحريكها، والحال أنني لا أرفض وجود هاته المادة فحسب، بل أثبتُّ عدم وجودها. ثالثاً: لا أستخدم لفظ الجاذبية إلا للتعبير عن أثر أو ظاهرة في الطبيعة، وهي ظاهرة الوجود ولا نزاع فيها، سببها علة نجهلها، وهي صفةٌ لصيقةٌ بالمادة، سيتمكن بعض ذوي العقول الراجحة يوماً من كشف الغطاء عنها. ولعل الأصح هو أن الدوامات هي التي تعد تفسيراً سحرياً ما أنزل العلم به من سلطان، والتي لم يثبت وجودها يوماً ما، بينما الجاذبية أمرٌ حقيقيٌ ما دمنا نرى أثرها ونحسب بدقة نسبها» (يفوت، 1989م).

ومع أننا نلاحظ محاولة نيوتن تفسيره لسبب الجاذبية إلا أنّه يعود ليقترح أن سببها هو حركة الأثير المتدفق نحو الأرض أو الشمس أو أي كوكب آخر، وهي الفرضية الوحيدة الكفيلة بالتحقق من صحة قانون التربيع العكسي أو

عدم صحته، ويبدو أنه تخلى عنها فيما بعد لإحساسه بالعيوب التي تعتريها، وهو ما لاحظه الباحث كويري عندما أجرى مقارنة بين ثلاثة أعمال لنيوتن تتناول هذه الفرضية (يفوت، 1989م).

عُرف أليكسيس كلود كليرو A. C. de Clairaut (توفي 1765م) أساساً بنظريته عن شكل الأرض، حيث أنها تربط بين قوة الجاذبية عند النقط السطحية لمجسم قطع ناقص دوار وبين الضغط والقوة الطاردة المركزية عند خط الاستواء (فوربس، 1992م). وقد نشر دراسته بعنوان (نظرية شكل الأرض Théorie de la figure de la terre) عام 1743م. وفي هذا العمل تأسس هذا النموذج الهيدروليكي لشكل الأرض على ورقة بواسطة كولين ماكلورين C. Maclaurin الذي أظهر أنّ كتلةً من السوائل المتجانسة تبدأ في الدوران حول الخط من خلال مركز كتلتها وتأخذ، تحت تأثير الجذب المتبادل بين جسيماتها، شكل السطح الناقص. وبافتراض أنّ الأرض تكونت من قشور إهليجية مركزية بكثافة موحدة، فيمكن تطبيق نظرية كليرو عليها، ويمكن حساب إهليجية الأرض من قياسات السطح للجاذبية. وفي عام 1849م أظهر ستوكس Stokes أنّ نتيجة كليرو كانت صحيحة أياً كانت بنية الجسم الداخلية أو كثافة الأرض، شريطة أن يكون السطح كروياً متوازناً لشكلٍ إهليجي صغيرٍ.

الفصل الخامس

المـــــــد والجـــــــزر

مُقَدِّمَة

المد والجزر ظاهرتان طبيعيّتان متناوبتان مختلفتان عن بعضهما البعض. تندرج ظاهرتا المد والجزر Tides في البحار تحت راية علم المحيطات الفيزيائي Physical Oceanography. وتعبّر هاتان الظاهرتان الطبيعيتان عن التفاعل بين جاذبية الأرض والقمر والشمس. وهما من الظواهر التي رصدها الإنسان وسجّل تغيراتها منذ أن سكن بجوار شواطئ البحار، وقد اهتم بتفسير هذه الظاهرة الكثير من الحضارات القديمة، كما كانت محط أنظار وأفكار العلماء العرب والمسلمين؛ إلا أن ما يميّز دراسة العلماء العرب والمسلمين للظاهرة بأنهم أول من توصلوا إليه حيث كانت تمتد في إطار الحقل الهيدروغرافي، شاملة الأنهار والبحار. وكذلك استغل العرب ظاهرة المد والجزر قبل اوروبا بثلاثة قرون او اكثر في ادارة السواقي وطواحين الغلال.

إنّ العاملان الرئيسيان المتحكّمان في طبيعة المدّ والجزر هما قوّة جاذبية القمر وقوّة دوران الأرض، بينما تلعب جاذبيّة الشمس دورًا بسيطًا في تأثيرها على هذه الظاهرة، وكذلك صفات الساحل الماديّة حيث تعتمد شدّة تأثيرها على ظاهرة المدّ والجزر على طبيعة الساحل بشكل رئيسيّ. على وجه العموم فإنّ معظم السواحل حول العالم تتكّرر فيها ظاهرة المدّ والجزر مرتين خلال 24 ساعة، ولكن في بعض المناطق قد يحدث المدّ والجزر مرّة واحدة في اليوم الواحد، حيث تُولّد جاذبيّة القمر قوّة تُسمى قوّة المدّ والجزر. تسبب قوّة المدّ والجزر انتفاخات على سطح الأرض والأسطح المائيّة. تتحّرك المياه بفعل هذه

القـوّة ومـا أحدثتـه مـن انتفاخـات صعـودًا باتجـاه الشـاطئ (مـدّ) وانحسـارًا عـن الشـاطئ (جـزر). أنّ القمـر ليـس العامـل الوحيـد وراء الظاهـرة، بـل هنـاك قـوة الطـرد المركـزي نتيجـة دوران الأرض حـول نفسـها وتعاقـب الليـل والنهـار، وهـذا يعنـي أن ظاهـرة المد والجـزر تحـدث مرتـين كلّ 12 سـاعة، فعندمـا تمـر الأرض أمـام القمـر يحـدث المـد في الأماكـن القريبـة وعندمـا تبتعـد عنـه يحـدث الجـزر.

يتمثـل أحـد أسـرار الفيزيـاء في أنّ أيّ كتلـة تـدور حـول نفسـها مثـل القمـر أو الأرض أو الشـمس تولّـد جاذبيتهـا الخاصـة بهـا، وكلمـا كانـت الكتلـة أكبـر كانـت الجاذبيـة أقـوى، ومـا اكتشـفه إسـحق نيوتـن أنـه في حـين تجـذب قـوة الجاذبيـة الكتـل الأخـرى، فـإن هـذه القـوة تضمحـل بسـرعة مـع اتسـاع المسـافة؛ وهكـذا كلمـا كانـت الكتـل أقـرب مـن بعضهـا كان تأثيرهـا أقـوى، وبنـاء عليـه، يوجـد تأثيـر ثلاثـي متبـادل بـين القمـر والأرض والشـمس.

إذْ منـذ أقـدم الحضـارات حـاول الكثيـر مـن النـاس معرفـة سـبب هـذه الظاهـرة، فمنهـم مـن ربطهـا بالقمـر وحـده، ومِـن مَـنْ ربطهـا بالريـاح، ومنهـم مـن ربطهـا بالشـمس، ومنهـم مـن ربطهـا بأفعـال الآلهـة المصطنعـة، ومنهـم مـن كان يعتقـد بوجـود مخلوقـات هائلـة الحجـم والضخامـة كالحيتـان تتسـبب بهـذه الظاهـرة. ونظـراً لكـون قـوة الجاذبيـة تضعـف بالبعـد، فـإنّ حركـة المـد والجـزر تكـون أقـوى في المحيـط الهـادئ عندمـا يكـون القمـر فـوق هـاواي مباشـرة عنهـا عندمـا ينعطـف القمـر بعيـداً ليصبـح فـوق المحيـط الأطلسـي (كلـوز، 1994م). كمـا أنّ احتـكاك المـد والجـزر يـؤدي إلـى زيـادة طـول اليـوم بنسـبة 0.001 ثانيـة في كل قـرن مـن الزمـن (دبس، 1993م). لحـركات المـد والجـزر اهميـة بالغـة فهيـا تعمـل علـى تطهيـر البحـار والمحيطـات مـن كل الشـوائب وكذلـك تطهيـر مصبـات الأنهـار والموانـئ مـن الرواسـب كمـا انهـا تسـاعد السـفن علـى دخـول الموانـئ التـي تقـع في المناطـق الضحلـة . ولكـن المـد الشـديد قـد يشـكل خطـر علـى الملاحـة وخاصـة في المضايـق.

المـــــد والجـــــزر والقمـــــر

المد والجزر هي الارتفاع الدوري والانخفاض في مستوى سطح البحر الناتج عن تفاعل الجاذبية وحركات الشمس والقمر والأرض. ترتبط تيارات المد والجزر بحركات مائية أفقية. على الرغم من أن تأثير المد والجزر على مستويات المياه المحلية والتيارات يمكن التنبؤ به، إلا أن مجموعة العوامل التي تؤثر على المد والجزر المحلية معقدة. بمجرد تشكيلها بواسطة عوامل فلكية، يتم تعديل المد والجزر من خلال العديد من العوامل الأخرى بما في ذلك قاع المحيط والسواحل والطقس. من العوامل الفلكية تأثير القمر أكبر من تأثير الشمس لأنه أقرب إلى الأرض. تساهم جاذبية القمر وقصور الماء في تكوين انتفاخين يميلان إلى جعل سطح المحيط على شكل بيضة. أحد الانتفاخات باتجاه القمر، والآخر بعيدًا عن القمر. يتعرض مكان على الأرض يدور يوميًا عبر هذين الانتفاخين إلى مد وجزر مرتفعين ومديين منخفضين.

نظرًا لأن القمر يدور حول كوكبنا شهريًا في مدار بيضاوي يميل إلى المستوى الاستوائي للأرض، هناك مجموعة واسعة من متغيرات المد والجزر الفلكية الممكنة. يستغرق الأمر حوالي 18.6 عامًا لتجربة معظم تأثيرات التكوينات المختلفة لنظام الأرض والقمر الذي يولد المد والجزر. وأبرز هذه التأثيرات هو أن النهار الذي يرتكز على القمر ويوم المد والجزر كلاهما أطول بمقدار 50 دقيقة من النهار القائم على الشمس. مع تأثير حوالي 45 % من القمر، يميل انتفاخان أصغر مرتبطان بالشمس إلى تعديل انتفاخات المد والجزر القمرية السائدة. نظرًا لأن الأرض تدور حول الشمس سنويًا في مدار بيضاوي يميل إلى مستوى دوران الأرض، فهناك مجموعة واسعة من المتغيرات الفلكية الممكنة.

يستغرق الأمر أكثر من ألف عام لتجربة معظم تأثيرات تكوينات نظام الأرض والقمر والشمس التي تولد المد والجزر. وأبرز هذه التأثيرات هو المد والجزر الشديد الذي يحدث مرتين شهريًا عندما تتم محاذاة الأرض والقمر والشمس وانتفاخات المد والجزر المرتبطة بها خلال مرحلتي القمر الجديد والقمر الكامل. بمجرد تشكيلها بواسطة عوامل فلكية، يمكن اعتبار المد والجزر على أنه يتحرك عبر المحيط مثل أمواج المحيط على نطاق عالمي.

يمكن حل هذه الموجات إلى مكونات دورية مختلفة، تسمى المد والجزر الجزئي والتي يتم توقعها لتاريخ مستقبلي ثم يتم جمعها معًا للتنبؤ بالمد المحلي الناتج. من أجل التنبؤ بالمد والجزر بدقة، يجب على كل محطة من محطات المد والجزر أولاً جمع البيانات لمدة لا تقل عن 18.6 سنة تغطي معظم التكوينات الرئيسية لتوليد المد والجزر لنظام الأرض والقمر.

في الماضي، تم التحقيق في المد والجزر بسبب تأثيرها المحلي على الملاحة والهندسة والحدود القانونية والتجارة والترفيه بالإضافة إلى إمكاناتها كمصدر للطاقة المتجددة. البحث الحالي أكثر ارتباطًا بالطبيعة العالمية للمد والجزر، بما في ذلك تأثيرها على العمليات الفيزيائية الأخرى مثل الدوران، والاختلاط، وتوليد الأمواج.

عموما يتبع المد والجزر القمر في حركته الظاهرية حول الأرض. ترتفع مياه المسطحات المائية وتنخفض مرتين خلال الفترة الزمنية الواقعة بين طلوعين متتاليين للقمر، وهي تعادل 24 ساعة و 50 دقيقة تقريبًا. وتتحدد الفترة بين طلوعين للقمر بوساطة حركتين هما:

- حركة الأرض حول محورها.
- دوران القمـــر حول الأرض.

نتيجة لدوران الأرض حول محورها، يقطع القمر السماء مرة كل يوم. أما بالنسبة للشمس، فإن القمر يدور حول الأرض مرة واحدة كل 29,5 يوم، لذلك فإن القمر يتحرك 12° حول الأرض كل يوم. وفي الوقت الواقع ما بين طلوعين للقمر، تكون الأرض قد أكملت دورتها حول نفسها، وهنا ترجع الاثنتا عشرة درجة التي أُضيفت، وتستغرق هذه الاثنتا عشرة درجة نحو 50 دقيقة.

تساوي كتلة الشمس 27 مليون مرة كتلة القمر. فإذا كانت المسافة بين الأرض والقمر تساوي المسافة بين الشمس والأرض، فإن المد الذي يحدث بفعل جاذبية الشمس، سوف يعادل 27 مليون ضعف ارتفاع المد الناتج بفعل جاذبية القمر. لكن المسافة بين الشمس والأرض أبعد 390 مرة من مسافة القمر عن الأرض. لهذا فإن المد الناتج عن جاذبية الشمس يعادل فقط 46 % من المد الناتج عن جاذبية القمر. ويتحد المدَّان الناتجان عن الشمس والقمر في مد وجزر واحد يبدو واضحًا على شواطئ البحار.

يبعد القمر عن كوكب الأرض مسافة أقل من بُعْد الشمس عن كوكب الأرض، وتكون قوّة تأثير جاذبيّته على المسطحات المائيّة بأنواعها أكبر مع أنّه صغير الحجم، ولهذا فإنّه السبب الرئيس لظاهرة المدّ والجزر، وعند حدوث الكسوف مثلاً فهذا يسبِّب ظاهرة الجزر بالوصول إلى أقصى حدّ فيها، وأثناء الليل يُلاحظ انخفاض منسوب المياه بشكل واضح، ولكن القمر لا يكون وحده السبب في حدوث هذه الظاهرة، ولكن قوّة الطرد المركزي التي تكون السبب في دوران كوكب الأرض حول نفسه وتتابع الليل والنهار.

تحدث ظاهرة المدّ والجزر بدايةً بانتفاخات Bulges في مياه البحر أو المحيط الذي يكون مواجهاً لجانبي القمر، ويقوم القمر بسحب المياه باتجاهه، ويكون دوران القمر حول كوكب الأرض، بالإضافة إلى دوران كوكب الأرض حول نفسه سبباً في حدوث المدّ في الجهة المقابلة لكوكب القمر، ويحتاج كوكب الأرض للدوران حول نفسه بمقدار مائة وثمانين درجة ولمدّة تصل إلى اثنتا عشرة ساعة، ويحتاج القمر أيضاً اثنتا عشرة ساعة حتى يستطيع الدوران حول كوكب الأرض بمقدار ست درجات، ويعني هذا أنّ المواقع الساحليّة تتعرّض لظاهرة المدّ والجزر فيما يُقارب 12 ساعة و25 دقيقة.

قوة المد والجزر هي الفرق بين قوة الجاذبية في المركز وقوة المد والجزر في مكان آخر. تظهر قوى المد والجزر على سطح المحيط. ستقل هذه القوى إلى الصفر عندما تقترب من مركز الأرض

خصائـــص المـــــد والجـــــزر

- المد والجزر هو الارتفاع والانخفاض المنتظمان لسطح المحيط الذي يحدث على مدى عدة ساعات أو أكثر كل يوم.
- يتم قياس المد والجزر في المواقع الساحلية كتغيرات محلية في مستوى سطح البحر. يُطلق على الفرق في الارتفاع بين مستويات المياه عند المد المرتفع والمنخفض نطاق المد والجزر ويسمى الوقت بين المد والجزر المتتالي بفترة المد والجزر.
- على الرغم من أن تأثيرات المد والجزر تُلاحظ على طول الشاطئ كتغيرات محلية في مستوى سطح البحر وتيارات المياه، فإن المد والجزر تتطور من تفاعل الجاذبية وحركات الشمس والقمر والأرض التي تعمل على مياه المحيط.
- بمجرد تشكيلها بواسطة عوامل فلكية، يتم تعديل المد والجزر من خلال العديد من التأثيرات غير الفلكية بما في ذلك عمق المياه، وتضاريس القاع، وتكوين السواحل والطقس، لإنتاج المد المحلي المرصود.
- يمكن التنبؤ بالمد والجزر المحلي، على الرغم من أنه ناتج عن تفاعل معقد بين العوامل الفلكية وغير الفلكية، بدرجة عالية من الدقة من التحليل التفصيلي لسجل المد المحلي طويل الأجل.

العوامـــــل الفلكيـــــة

- من العوامل الأساسية لتكوين المد والجزر قوى التجاذب بين الأرض والقمر والشمس، حيث يتم تحديد هذا التجاذب من خلال كل من كتل هذه الأجسام والمسافة بينها. فكلما زادت الكتل، زادت قوة الجذب، بينما كلما زادت المسافة، كان التجاذب أصغر.

- لن يكون حجم جاذبية الشمس أو القمر هو نفسه في جميع الأماكن على سطح الأرض لأن ليست كل هذه الأماكن بعيدة عن الجسم الجاذب. ستشهد الأماكن الأقرب إلى الجسم على الأرض جاذبية أكبر تجاه الشمس أو القمر مقارنة بالأماكن الموجودة على الجانب الآخر من الأرض.

- بسبب جاذبية الأرض، فإن محيط الأرض المواجه (والأقرب) للقمر يتم سحبه بقوة أكبر من القمر مقارنة بالمحيط الموجود على الجانب المقابل الأبعد من الأرض. تنتج الشمس تأثيرًا مشابهًا على مياه المحيط.

- تدور الأرض والقمر حول مركز كتلة مشترك مرة كل شهر قمري. تؤدي حركة الدوران هذه، جنبًا إلى جنب مع جاذبية القمر، إلى انتفاخ سطح المحيط على شكل بيضة. أحد الانتفاخات المحيطية باتجاه القمر والآخر على الجانب الآخر من الأرض. ينتج عن تفاعل مماثل بين الأرض والشمس انتفاخات محيطية على الأرض تصطف باتجاه الشمس وبعيدًا عنها.

- على الأرض النظرية بدون احتكاك، ستبقى انتفاخات المحيط متماشية مع الجسم السماوي مما يساهم في تكوينها. إن أي مكان على الساحل يتحرك

فيه دوران الأرض عبر الانتفاخات قد يتعرض لارتفاع وانخفاض مستوى سطح البحر. هذه التغيرات في مستوى سطح البحر هي المد والجزر التي تنتج في ظل الظروف النظرية عن طريق العوامل الفلكية التي تعمل بمفردها.

- يهيمن على المجموعة الكبيرة من المتغيرات الفلكية التي ينطوي عليها إنتاج المد والجزر النظرية المواءمة المتغيرة للقمر والشمس والأرض، بما في ذلك المواضع المتغيرة للقمر والشمس بالنسبة إلى خط استواء الأرض والمسافات المتغيرة للقمر. قمر من الأرض والأرض من الشمس بسبب مداراتها الإهليجية.

أســـباب ظاهـــرة المـــد والجـــزر

إن سـبب ظاهـرة المـد والجـزر هو **قـوة جـذب القمـر والشـمس لـلأرض**، **وقـوة الطـرد المركـزي الناتجـة عـن دوران الأرض حـول محورهـا**:

قوة جاذبية القمر والشمس

تنشـأ حركة المد والجـزر بفعل جاذبيـة الشـمس والقمـر لمياه البحـار والمحيطات ولأن القمـر أقـرب إلـى الأرض فتأثيـر جاذبيتـه تكـون أكبـر رغـم صغـر حجمـه؛ فنسـتنتج أن جاذبيـة القمـر هـي أهـم عامـل في حـدوث المـد والجـزر. يحـدث المـد والجـزر مرتـين كل يـوم (مـرة كل 12 سـاعة)، لأن أجـزاء سـطح الأرض تمـر أثنـاء دورتهـا أمـام القمـر فيحـدث المـد في الأماكـن المواجهـة للقمـر، ثـم لا يلبـث أن يحـدث الجـزر عندمـا تبتعـد هـذه الأماكـن عنـه. ويختلـف ارتفـاع المـد باختـلاف موقـع القمـر في مـداره بالنسـبة لـكل مـن الأرض والشـمس، في المحـاق والبـدر يعلـو المـد إلـى أقصـى دورتـه نظـرا لوقـوع الشـمس والقمـر في جهـة واحـدة، وتبلـغ قـوة جاذبيـة القمـر أقصاهـا عنـد ظاهـرة الكسـوف عندمـا يكـون القمـر بـين الشـمس والأرض فيكـون تأثيرهمـا المشـترك علـى الأرض شـديدا، وفي الأسـبوعين الأول والثالـث مـن الأشـهر القمريـة يحـدث مـا يسـمى بالمـد الخائـر، حيـث يكـون المـد أضعـف مـن المعتـاد بسـبب وقـوع كل مـن الشـمس والقمـر علـى ضلعـي زاويـة قائمـة رأسـها مركـز الأرض وبذلـك تقلـل جاذبيـة الشـمس مـن تأثيـر جاذبيـة القمـر.

قوة الطرد المركزية

تعتبر قوة الطرد المركزية من الأمور التي تؤثر على محيطات الأرض، فعندما يدور القمر حول الأرض تتحرك الأرض حركة دائرية صغيرة جدًا، وينتج عن هذه الحركة حدوث قوة طرد مركزية في المحيطات، وتؤدي قوة الطرد المركزية إلى تمدد المحيطات في الجهة المقابلة للقمر، ويعتبر سحب الجاذبية للقمر أحد الأمور الكفيلة لجذب المحيطات إلى التمدد على جانب الأرض التي تواجه القمر، ولكنه ليس قويًا لدرجة التغلب على كافة الجمود الموجود على الأرض، ونتيجة لذلك يحدث المد والجزر في محيطات العالم مرتين، حيث تحدث المرة الأولى عندما يكون جانب الأرض هو الأقرب إلى القمر، والمرة الأخرى يكون حدوثها عندما تكون الأرض على الجانب الأبعد من القمر.

دور القمـــــــر

- على الرغم من أن كتلته أصغر بكثير من كتلة الشمس، إلا أن القمر له تأثير أكبر على المد والجزر لأنه أقرب بكثير إلى الأرض من الشمس.
- لأن الثورة الشهرية للقمر حول الأرض في نفس اتجاه دوران الأرض اليومي، يجب أن تقوم نقطة على الأرض بدوران كامل وأكثر (مع انقضاء حوالي 24 ساعة و 50 دقيقة) للحاق بالقمر المتقدم. هذا اليوم الذي يرتكز على القمر يسمى أيضًا يوم المد والجزر.
- تظل انتفاخات المد والجزر التي ينتجها القمر في نفس المحاذاة بالنسبة للقمر، ولكنها تغير مواقع خطوط العرض على الأرض من يوم لآخر أثناء تتبعها للقمر خلال ثورته الشهرية حول الأرض. يحدث هذا بسبب ميل مدار القمر إلى المستوى الاستوائي للأرض.
- خلال شهر قمري واحد، يتحرك موقع خط العرض للقمر من كونه فوق خط الاستواء مباشرة إلى مسافة خمس درجات من مدار السرطان (23.5 درجة شمالًا)، والعودة إلى خط الاستواء، ثم في حدود خمس درجات من مدار الجدي (23.5 درجة جنوب)، ثم العودة إلى خط الاستواء حيث تبدأ دورة أخرى.
- عندما يكون القمر فوق خط الاستواء مباشرة، فإن انتفاخات المد والجزر المصاحبة له تتركز على خط الاستواء. من الناحية النظرية، ستدور جميع المواقع الساحلية تقريبًا من خلال انتفاخات المد والجزر وستواجه مدّين مرتفعين متساويين ومديين منخفضين متساويين في يوم المد والجزر. يُعرف هذا بالمد

والجـزر شـبه النهـاري.

- توجد أنماط مختلفة للمد والجزر عندما يكون القمر ونقاط المنتصف لانتفاخات المد والجزر المصاحبة له إما شمال أو جنوب خط الاستواء. في حين يتم ملاحظة المد والجزر شبه النهارية عند خط الاستواء في جميع الأوقات، فإن معظم المواقع بين خط الاستواء وخطوط العرض المرتفعة تعاني من مد وجزر مرتفعين غير متكافئين ومديين منخفضين غير متساويين لكل يوم مد. يُعرف هذا بالمد والجزر المختلط وهذا الاختلاف في الارتفاعات بين المد والجزر المتتالية (أو المنخفضة) يسمى عدم المساواة النهارية.

- عندما يكون القمر فوق مدار السرطان أو الجدي أو فوقه تقريبًا، يكون التفاوت النهاري هو الحد الأقصى، ويطلق على المد والجزر اسم المد المداري. عندما يكون القمر فوق خط الاستواء أو فوقه تقريبًا، يكون التفاوت النهاري عند الحد الأدنى ويُعرف المد والجزر باسم المد الاستوائي.

- عندما يكون القمر وانتفاخات المد والجزر المصاحبة له إما شمال أو جنوب خط الاستواء، فإن معظم النقاط عند خطوط العرض المرتفعة ستشهد نظريًا مدًا مرتفعًا ومدًا واحدًا منخفضًا في يوم المد والجزر. يُعرف هذا بالمد والجزر النهاري.

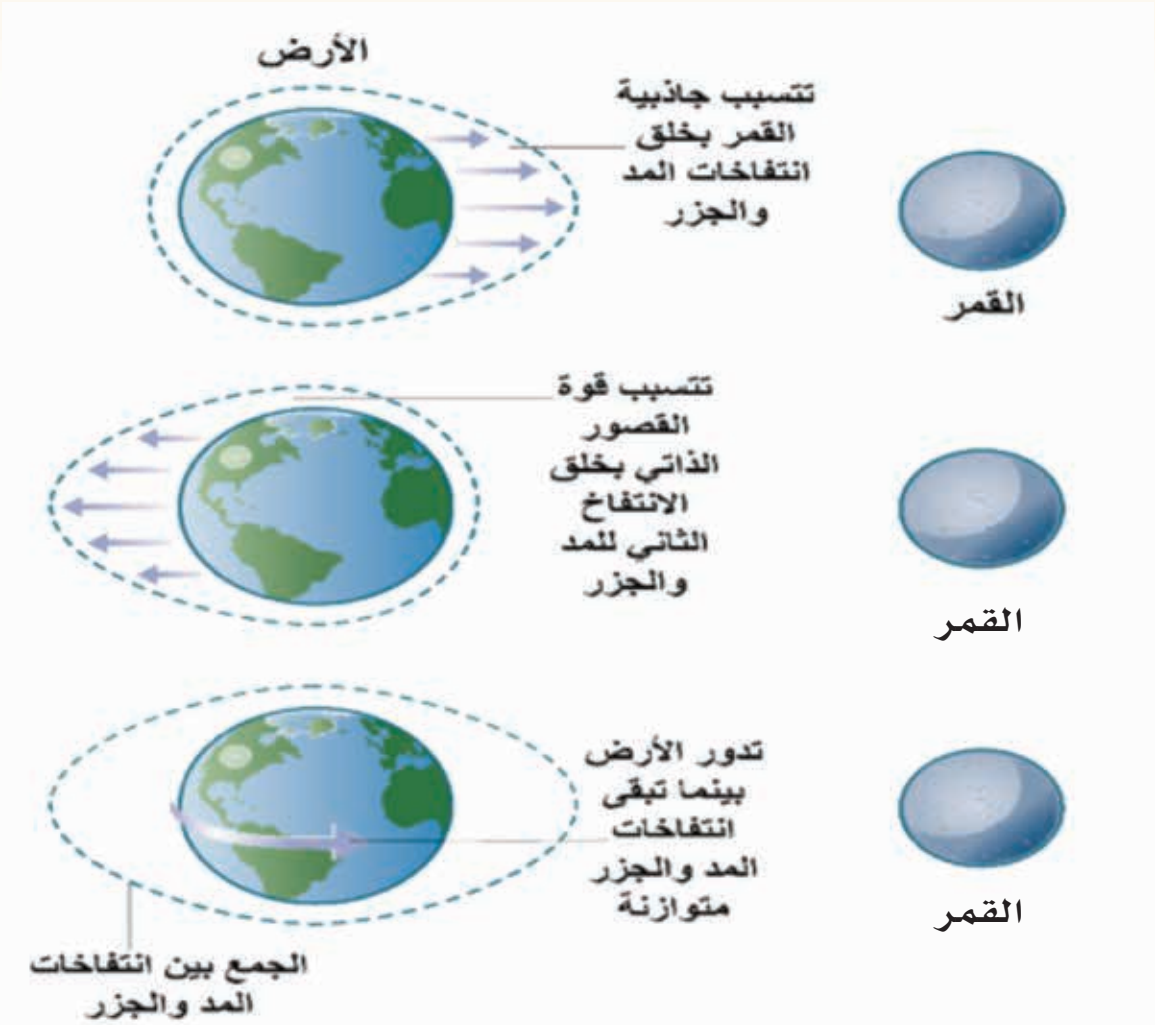
دور الشمـــــس

- تنتج الشمس تأثيرات المد والجزر في المحيطات والتي تبلغ حوالي 45 % من تلك المتعلقة بالقمر، وذلك بسبب المسافة الأكبر بكثير بين الشمس والأرض.
- تنتج انتفاخات المد والجزر المرتبطة بالشمس بنفس الطريقة التي تنتج عن التفاعلات بين الأرض والقمر. ينتج عن الجاذبية بين الأرض والشمس والثورة السنوية للأرض حول المركز المشترك لكتلة الشمس والأرض مجموعة ثانية من انتفاخات المد والجزر المتشابهة ولكنها أصغر حجماً والتي تتماشى مع الشمس.
- النقاط الوسطى لانتفاخات المد والجزر المرتبطة بالشمس تتبع الشمس تمامًا كما تتبع الانتفاخات المرتبطة بالقمر القمر. تمر مواقعهم في خطوط العرض بدورة سنوية.
- تعمل المجموعات المنفصلة من انتفاخات المحيط المتعلقة بالقمر والشمس في بعض الأحيان معًا وفي أوقات متعارضة لأنها تنتج المكون الفلكي للمد والجزر. تهيمن الانتفاخات المرتبطة بالقمر على هذه المد والجزر بينما تلعب الانتفاخات المرتبطة بالشمس دورًا في التعديل.
- تكون مواضع الشمس والقمر والأرض مرتين شهريًا على طول خط مستقيم. في هذه الأوقات من المراحل الجديدة ومراحل اكتمال القمر، كما تُرى من الأرض، تصطف الانتفاخات المحيطية المرتبطة بالقمر والشمس أيضًا لإنتاج المد والجزر التي لها أكبر نطاق شهري. وتسمى هذه المد والجزر الربيعي.
- مرتين شهريًا، في مرحلتي الربع الأول والثالث من القمر، تسحب الشمس الأرض على طول خط يقع بزوايا قائمة على سحب القمر. في هذا الوقت، يكون للمد والجزر أقل نطاق شهري. وتسمى هذه المد والجزر المحاقي.

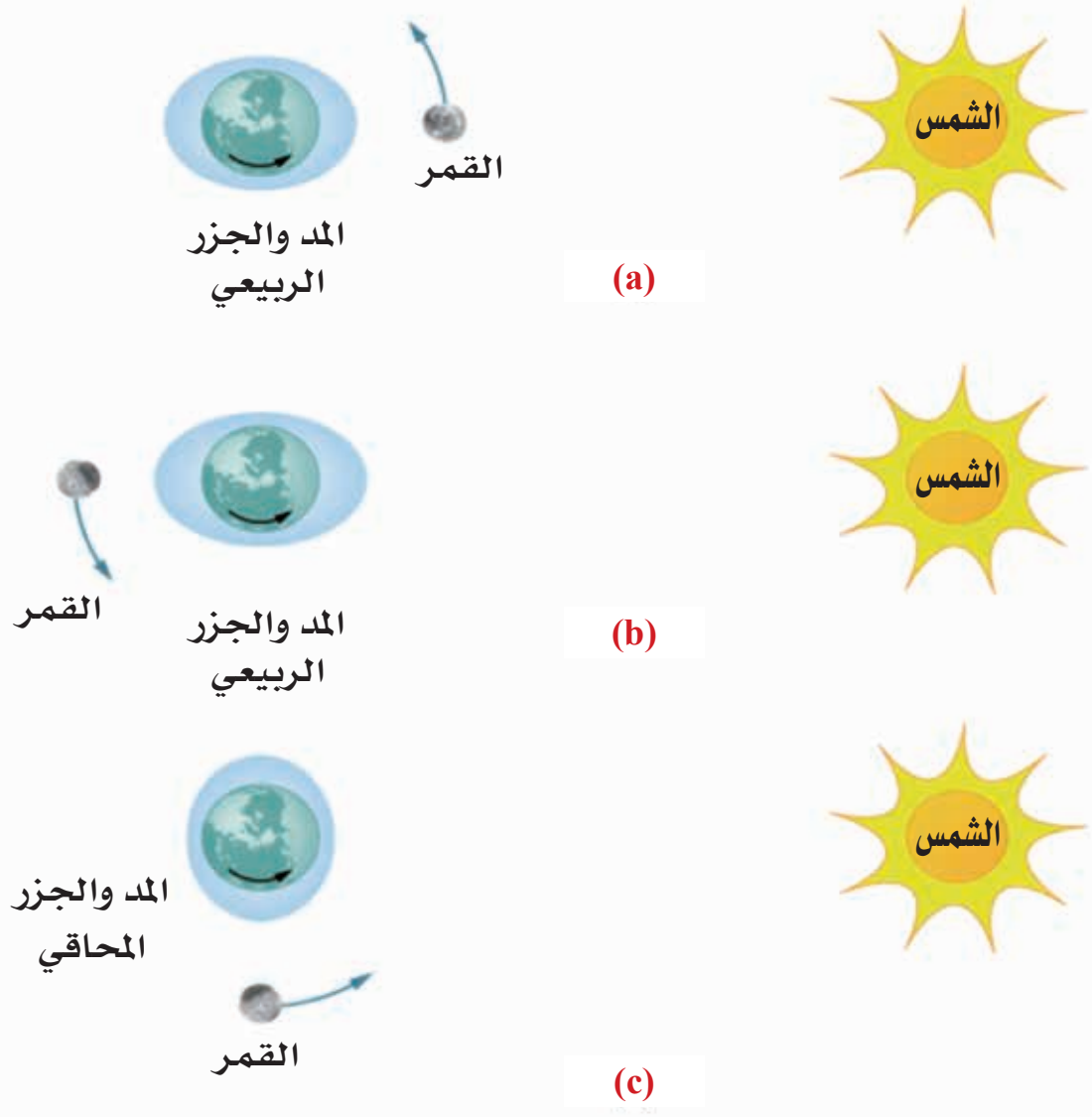
ميكانيكيـــــة المـــــد والجـــــزر

بدايةً، وفي حين تدور الأرض في أثناء اليوم، تجعلها جاذبية القمر، مع ضعفها نوعاً ما، تنتفخ منجذبةً نحوه بنحو 2 – 3 سنتمترات. وليس لهذا أي تأثير ملحوظ على اليابسة، وإنما له تأثير كبير على المحيطات، وهو ما ينشأ عنه ظاهرة المد والجزر. وعندما تمر الأرض بحيث تكون تحت تأثير قوة شد القمر الجاذبة، يسحب القمر باتجاهه أي كتلة كبيرة من الماء؛ يظهر هذا الانتفاخ على الجانب المواجه للقمر والجانب البعيد المقابل له على الأرض. وبينما تدور الأرض يستمر هذا الانتفاخ تحت القمر، ويولد مدّاً عالياً، في المقابل فإنّ كتلة الماء المتعامدة مع الجذب القمري المباشر تنخفض وبالتالي بعد الانتفاخ، تعود مستويات البحر إلى الانخفاض فيحدث الجزر؛ وهكذا يتغير مستوى البحر كل اثنتي عشرة ساعة أو نحو ذلك، ومع انتقال الانتفاخين حول الكرة الأرضية يحدث مدٌّ تامٌّ كل 12 ساعة و25 دقيقة، ويقدِّم المدار المتغير للقمر توقيت حدوث كل مدٍّ عالٍ بنحو 50 دقيقة كل يوم. ولحقل جاذبية الشمس أيضاً دور، ولكن نظراً لبعدها الكبير عنّا فإن تأثيرها أضعف من تأثير القمر. مع ذلك، عندما يكون القمر والشمس مصطفين على خط مستقيم، وهو ما يحدث مرتين شهرياً (في طوري الهلال والبدر) تُولّد قوة جذبهما المشتركة مدّاً عالياً جداً يطلق عليه اسم **المد الربيعي** Spring Tide، وعندما يحدث العكس أي عندما يكون القمر والشمس على طول ضلعي زاوية قائمة نحصل على جزر منخفض جداً، أو **جزر محاقي** Neap Tide، خلال تربيع القمر. وقد تمحورت العديد من الأحداث التاريخية بالغة الأهمية حول مواقيت المد والجزر، خصوصاً في فترات ازدهار السفن الشراعية. كما أنّ المدّ الربيعي يكون في أعلى مستوىً له في الحضيض القمري،

ويقال إنه ساهم في غرق سفينة تايتانيك الشهيرة في سنة 1912م. فقبل بضعة شهور من اصطدام تايتانيك بجبل جليدي، أدى مد ربيعي عال بصورة استثنائية إلى انفصال جبال جليدية هائلة عن جزيرة غرينلاند، وفي الأحوال العادية، لا يشكل مثل هذا الجبل الجليدي الهائل خطراً على السفن العابرة لأنه يكون قد ذاب قبل أن يطفو منجرفاً نحو الجنوب ويصل إلى خط العرض الذي حصل فيه الاصطدام الشهير (Williams, 2014).



بينما يـــــدور القمـــــر حـول الأرض، تشـــدّ جاذبيتـه ميـاه المحيـط فينشـأ «انتفـاخ» Bulge. لكـن حركـة القمـر تجعـل الأرض تتحـرك في الفضـاء أيضاً، فتنطلق الميـاه بعيـداً عـن القمـر لتنتـج انتفاخـاً آخـر مـن المـد والجـزر. وعندمـا تـدور الأرض، تتحـرك سـواحلها مـن وإلـى خـارج المـد والجـزر، ممـا يتسـبب في ارتفـاع المـد والجـزر (Woodward, 2008).

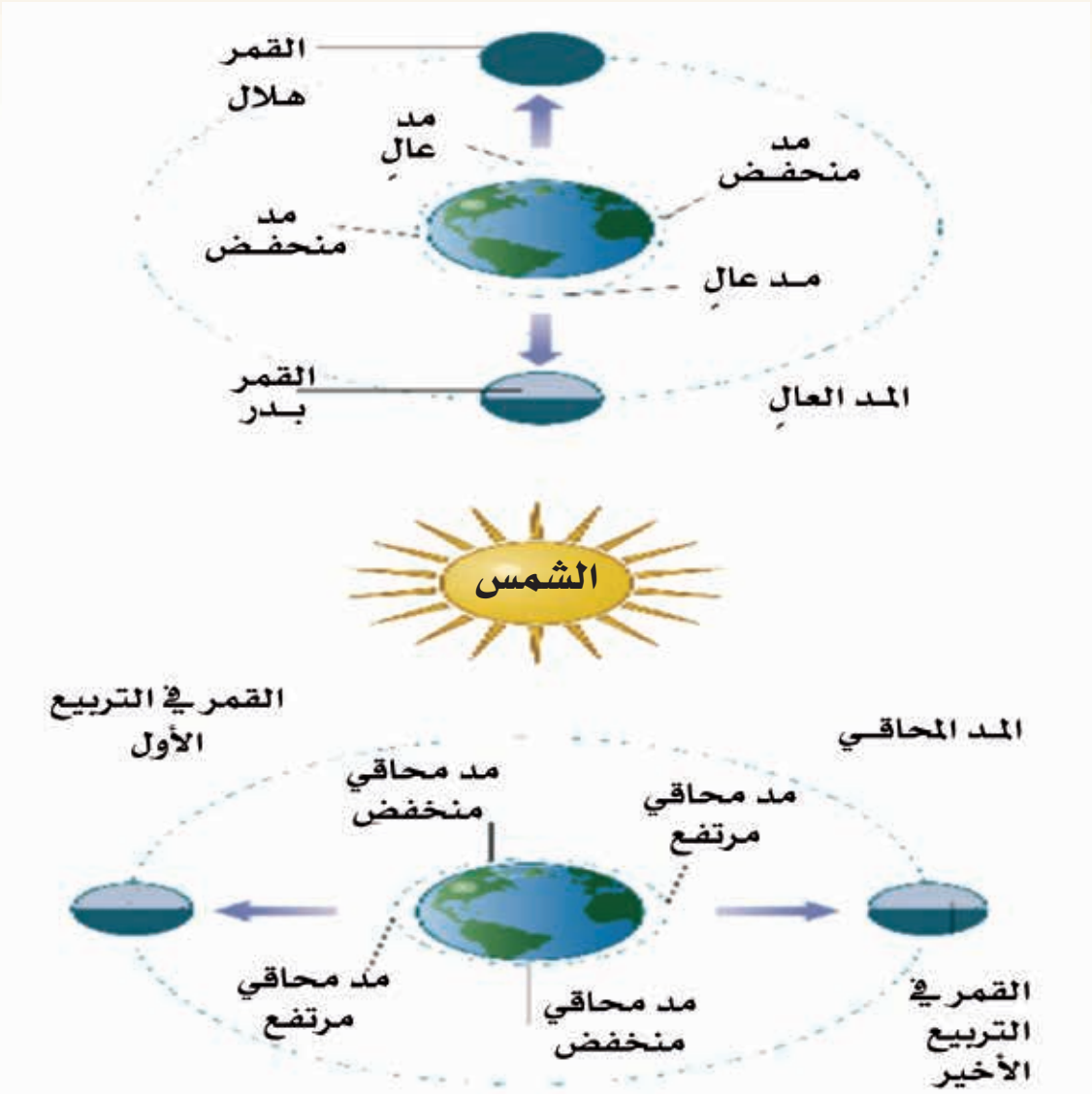


يحدث المدّ والجزر التام (الربيعي) Spring tide (a and b) عندما يتم محاذاة الشمس والقمر، بينما يحدث المدّ والجزر الناقص (المحاقي) Neap Tides (c) عندما تشكل الشمس والقمر مثلثًا قائمًا مع الأرض

أنـــواع المـــــد والجـــــزر

هنـــاك 12 نـــوع من المـــد والجـــــزر أهمهـــا

- **المدّ والجزر التام (Spring Tides)** ويُعرف بالمدّ الربيعي، ولكن لا علاقة لاسم هذا النوع بفصل الربيع وإنّما هو مصطلح تاريخي شائع يصف المدّ والجزر التام والذي يحدث مرّتين في كلّ شهر قمري على مدار العام وليس خلال فصل الربيع حصرًا ويُطلق عليه أيضًا «المدّ الملك»، وأكثر الأماكن شهرةً بهذا النوع هي أنكوراج وألاسكا، ويحدث عندما يكون القمر والأرض والشمس على خط واحد؛ بحيث يتزامن حدوث المد والجزر بسبب الشمس والقمر معاً، الأمر الذي يجعل المد والجزر أعلى من المتوسط أو أدنى منه، وهو يحدث في أثناء الهلال أو البدر (هويت، 2014م).
- **المدّ والجزر الناقص (Neap Tides)** وهو المدّ المحاقي أو يُسمى المعتدل، وسبب تسميته بذلك تعود لطبيعته الأقلّ شدّة من المتوسط المعتاد، وعادةً من يحدث المدّ والجزر الناقص بعد أسبوع من المدّ والجزر التام عندما يظهر القمر نصف مكتمل، وعادةً ما يحدث مناطق أمريكا الجنوبية وجنوب أستراليا وأفريقيا، ويحدث هذا النوع من المدّ والجزر عند حدوث انتظام الشمس والقمر بزاوية قائمة على بعضهما البعض. تولّد قوّة جاذبية من الشمس والقمر بمسارين مختلفين. الانتفاخ الناجم من قوّة جذب الشمس يُلغي جزئيًا الانتفاخ الناجم من قوّة جذب القمر. حدوث المدّ بمستوى أقلّ بقليل من المتوسط وحدوث الجزر بمستوى أعلى قليلًا من المتوسط. يحدث المدّ والجزر الناقص عندما تكون الشمس بزاوية قائمة مع القمر، وبهذا النوع تؤثّر القوّة الناتجة من جاذبية الشمس سلبًا على القوّة الناتجة من القمر بعكس ما يحدث في المدّ والجزر التام عند اتحاد قوّة الجذب الناجمة عن الشمس والقمر معًا. أي انه يحدث عندما يكون القمر في منتصف الطريق بين الهلال والبدر في كلا الاتجاهين، ويكون جذب القمر والشمس متعامدين، لذلك لا يتداخل المد والجزر الشمسي والقمري.



عندما يدور القمر حول الأرض، يتحرك تماشياً مع الشمس مرتين في الشهر عندما يكون بدراً وهلالاً، وعندما يتم محاذاة الشمس والقمر على هذا النحو، فإنّ جاذبيتهما مجتمعة تسبب المد والجزر العالي كل أسبوعين. في الأسابيع الممتدة بين البدر والهلال، تعوض جاذبية الشمس بجاذبية القمر، وتقلل من تأثير انتفاخ المد والجزر وتسبب في حدوث مدٍ وجزرٍ أقل (Woodward, 2008).

وهذا لا يجعل المد مرتفعاً ولا الجزر منخفضاً (هويت، 2014م).

تتأثر أنماط المدّ والجزر باختلاف المكان، هناك ثلاثة أنماط للمدّ والجزر على طول الشواطئ الرئيسيّة على سطح الأرض والمبنية على التكرارية. إن الارتفاع والانخفاض ومقدار كل منهما في ظاهرة المدّ والجزر يعتمد على عوامل المختلفة؛ إذ إن شكل وهندسة الخط الساحلي إضافةً لمواقع الشمس والقمر كلها عوامل تؤثر على ظاهرة المد والجزر، كما أن أنظمة العواصف في البحر وعلى اليابسة تلعب دورها بتحويل كميات كبيرة من المياه حولها لتؤثر على ارتفاع وانخفاض المدّ والجزر.

- **المـــــد والجـــــزر شـــــبه النهـــــاري Semi-Diurnal Tides**

دورة المد والجزر شبه اليومية هي تلك التي تحتوي على مد وجزر مرتفعين متساويين تقريبًا ومديين منخفضين كل يوم. الفترة الفاصلة بين المد والجزر هي حوالي 12 ساعة و 25 دقيقة. ينتشر المد والجزر شبه النهاري في المحيط الهندي والسواحل الأخرى السائدة كما في ساحل شرق إفريقيا و خليج البنغال.

- **المد والجـــــزر النهـــــاري Diurnal Tides**

إنه يعني أربعة مد وجزر في اليوم. اثنين من المد والجزر من الشمس واثنان بالقمر. مد الربيع هو مد مرتفع بشكل استثنائي ناتج عن العامل التكميلي الذي تلعبه الشمس فيما يتعلق بالقمر. تجدر الإشارة إلى أنه عندما تكون الشمس والقمر والأرض في نفس الخط، يُعرف الموضع باسم Syzygy. يمكن أن يكون هذا التناغم من نوعين:

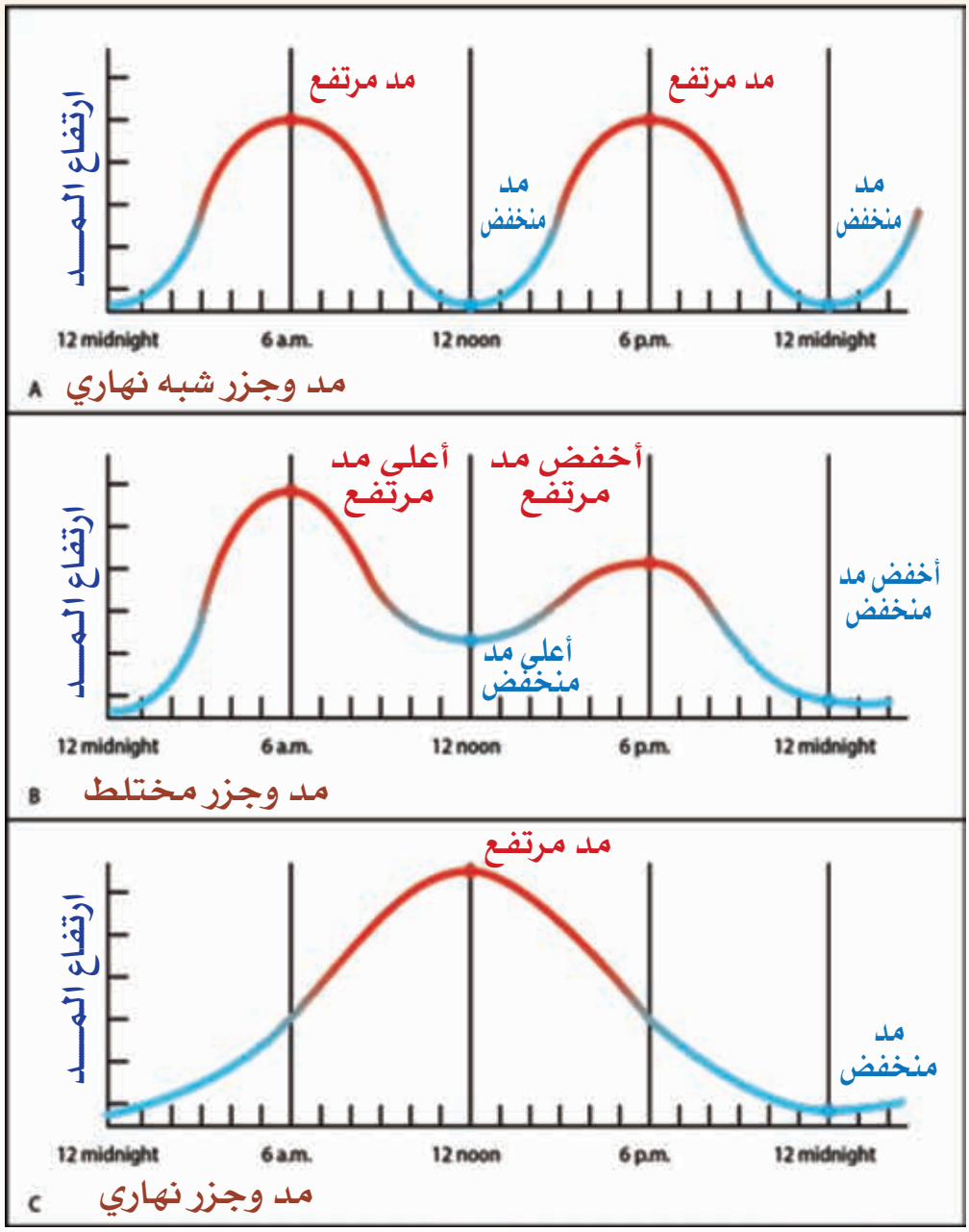
- **الاقتـــران:** عنـــدما يكـون القمر والشمس في نفس الجانب.
- **المقاومـــة:** عندمـا يكون القمر والشمس على الجانب الآخر .

في كلتا الحالتين، سيكون مقدار المد والجزر مرتفعًا بشكل متساوٍ.

- **المـــد والجـــزر المختلـــط Mixed**

تؤدي دورة المد والجزر ذات المد والجزر غير المتكافئين إلى تكوين دورة المد والجزر المختلطة، أو ببساطة تسمى المد المختلط. دورة المد والجزر هذه لها تذبذبات شبه نهارية ونهارية. لوحظ على نطاق واسع في خليج المكسيك والبحر الكاريبي. يشهد الساحل الجنوبي الشرقي للبرازيل أيضًا مدًا مختلطًا.

عموما تنحصر أنماط المدّ والجزر بشكل رئيسي كالتالي؛ المدّ شبه النهاري العالي والمدّ شبه النهاري المنخفض والمدّ المختلط.. يُعتبر أعلى مدّ وجزر في العالم هو مدّ وجزر خليج فوندي (Fundy) في كندا ويصل إلى 16 مترًا، ويشترك كذلك مدّ وجزر خليج يونجافا (Ungava) في كندا بنفس الارتفاع، يليهما المدّ والجزر في قناة بريستول (Bristol Channel) في المملكة المتحدة ويصل ارتفاعه إلى 15 مترًا، ويسجّل المدّ والجزر في الولايات المتحدة الأمريكيّة بالقرب من أنكوراج (Anchorage) ألاسكا ارتفاعًا يصل إلى 12 مترًا.



أنماط المد والجزر: (A) شبه النهاري، (B) مختلط، (C) النهاري

مـد التجويـــــف Bore Tide في ذراع تجويـف المـد والجـزر (أو التجويـف ببسـاطة aegir، أو eagre، أو eygre) هـو ظاهـرة المـد والجـزر التـي تشـكل فيهـا الحافـة الأماميـة للمـد والجـزر القـادم موجـة (أو موجـات) مـن المـاء تنتقـل عبـر النهـر أو خليـج ضيـق عكـس اتجـاه النهـر أو تيـار الخليـج.

إن مد تجويف Bore Tide ذراع Turnagain هو في الأساس موجة تتشكل عندما يصطدم المد شديد الانخفاض والمد والجزر ببعضهما البعض في ذراع Turnagain الضيق والضحل

إن تيار التمزق **Rip Tide**، الذي يشار إليه عادةً ببساطة باسم التمزق، أو عن طريق التسمية الخاطئة للمد والجزر، هو قناة قوية للمياه تتدفق باتجاه البحر من بالقرب من الشاطئ، عادةً عبر خط الأمواج. يبلغ التدفق النموذجي 0.5 متر في الثانية، ويمكن أن يكون بسرعة 2.5 متر في الثانية، وهو أسرع من أي سباح بشري. يمكن أن تحدث على أي شاطئ به أمواج متكسرة، بما في ذلك المحيطات والبحار وحتى البحيرات الكبيرة.

يُعرف المد المتمزق Rip Tide باسم تيار التمزق، وأفضل تفسير له هو توجيه المياه من الشاطئ مثل النهر

المد البني **Brown Tide**، هو ازدهار (نمو مفرط) من الطحالب البحرية الصغيرة). على الرغم من وجود العديد من أنواع الطحالب في جميع النظم البيئية الطبيعية للمياه العذبة والبحرية، إلا أن أزهار كائن المد والجزر البني تحول المياه إلى اللون البني الغامق، مما يجعلها غير جذابة للسباحين والصيادين على حدٍ سواء. على الرغم من أن المد البني لا يضر بالبشر، إلا أن وجود المد البني يمثل مشكلة للأسقلوب في الخليج والأنقليس، وبدرجة أقل الأسماك الزعنفية والمحار الأخرى. يختلف المد البني عن معظم تكاثر الطحالب الأخرى بسبب تركيزاته العالية بشكل غير عادي، ومدى المساحة التي يغطيها وطول الفترة الزمنية التي يستمر فيها.

المد البني هو نوع من تكاثر الطحالب

تكاثر الطحالب الضارة Red Tide ، (HAB) يحدث عندما تنمو مستعمرات الطحالب خارج نطاق السيطرة وتنتج آثارًا سامة أو ضارة على الناس والأسماك والمحار والثدييات البحرية والطيور. الأمراض البشرية التي يسببها تكاثر الطحالب الضارة، على الرغم من ندرتها، يمكن أن تكون منهكة أو حتى قاتلة. كثير من الناس يسمون تكاثر الطحالب «المد الأحمر»، ويفضل العلماء مصطلح تكاثر الطحالب الضارة. أحد أشهر أنواع تكاثر الطحالب الضارة يحدث تقريبًا كل صيف على طول ساحل خليج فلوريدا .

يحدث المد الأحمر بسبب الطحالب المجهرية (الكائنات الحية الدقيقة الشبيهة بالنبات)

العوامل التي تتحكم في تعديل حركة المياه في حالات المد الحقيقي

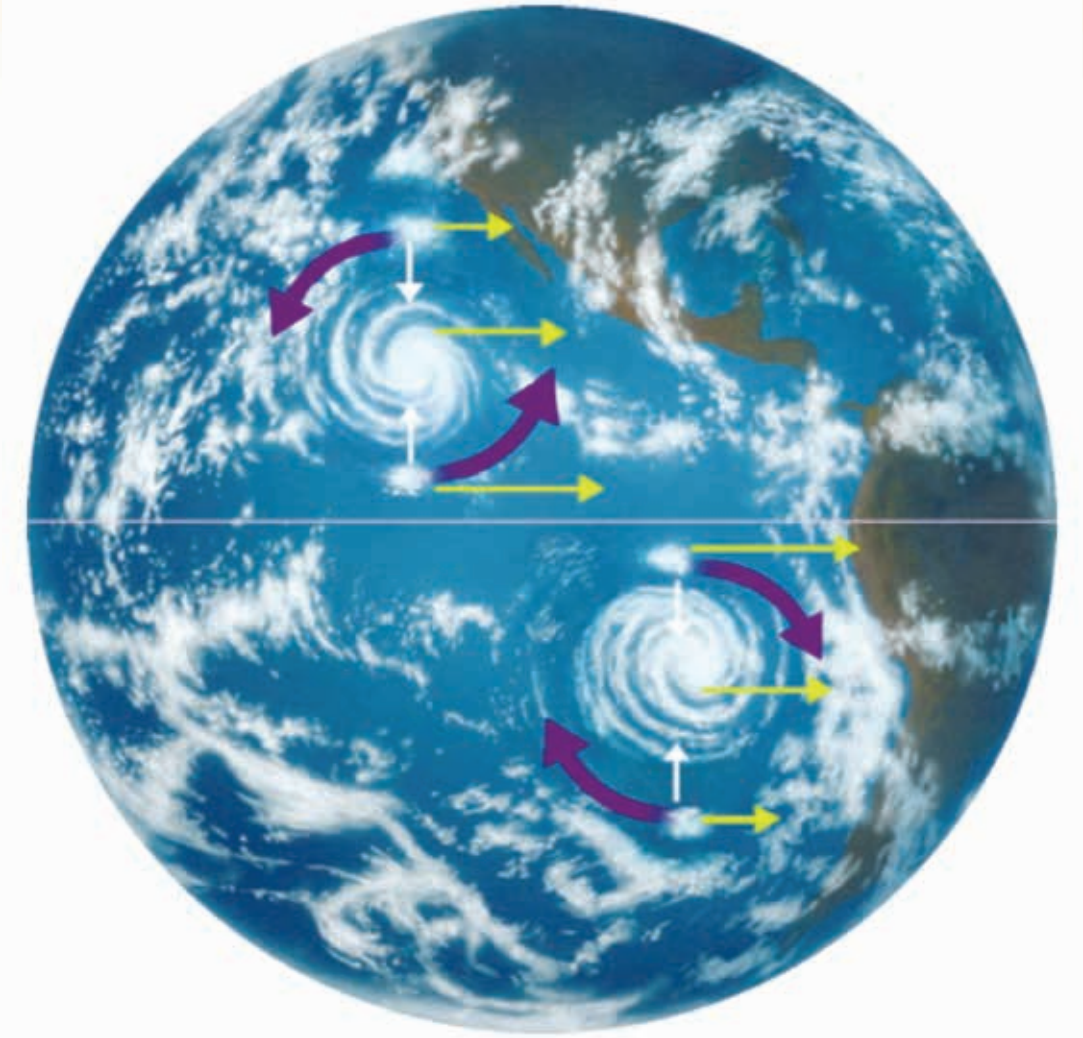
- **الشمس / القمر:** يكون تأثير جاذبية القمر أكبر من تأثير الشمس نظرًا لقربه من الأرض، ولكن في بعض الأحيان بالتزامن مع الشمس وأحيانًا في معاكسة تأثيره يختلف اتساع وتوقيت المد والجزر.
- **الجغرافيا:** من الواضح أن كتل اليابسة تعرقل وتحرف حركة الماء على سطح الأرض.
- **الاحتكاك:** الاحتكاك يؤخر حركة جسيمات الماء عبر سطح الأرض - (حركة المد والجزر عبره تؤدي تدريجياً إلى إبطاء سرعة دوران الأرض).
- **تذبذب الحوض:** جميع المسطحات المائية لها فترات اهتزاز طبيعية تحدد حسب حجمها وشكلها. تتكون جميع المحيطات من عدد من الأحواض المتذبذبة. تؤثر التذبذبات الناتجة في أي مكان على حركة المد والجزر أو شكل الموجة اعتمادًا على درجة الرنين مع منحنى المد الفلكي.
- **المدارات القمرية والأرضية:** شكل ومستوى كل من مدار الأرض حول الشمس ومدار القمر حول الأرض بحيث تختلف المسافة بين هذه الأجسام، وتأثيرها الجاذبي، بشكل مستمر في دورات من الأشهر والسنوات وحتى أطول فترات.
- **مدار الأرض:** على شكل قطع ناقص غريب الأطوار (على سبيل المثال أو على شكل كمثرى). عند الحضيض الشمسي، تبعد الأرض 91.3 مليون ميل، وفي الأوج هي 94.5 مليون ميل من الشمس على التوالي.
- **انحدار / ميل الأرض:** 23 ° 27 ' عن العمودي، ومن هنا جاء ميل الموقع النسبي للشمس والقمر عندما يبدو أنهما يدوران حول الأرض.
- **مدار القمر:** أيضًا شكل بيضاوي غريب الأطوار ذو أوج ونقطة متفاوتة.

تصف نظرية التوازن الموضحة أعلاه انتفاخين تتحرك حول الأرض من الشرق إلى الغرب بمعدل ثابت. سيكون مداها 0.5 متر عند خط الاستواء. هذا ليس بالضبط ما يحدث مع المد والجزر المرصودة. التفسير النظري للمد والجزر النهاري لا يتفق مع الملاحظات أيضًا. إذا لما لا؟ .

السبب الرئيسي لهذه الاستجابة المعقدة لتأثيرات المد والجزر هو حقيقة أن الأرض تقسم مياه العالم إلى محيطات وبحار وخلجان وما إلى ذلك من أحجام وأشكال وأعماق مختلفة. خطوط العرض الوحيدة للحركة القطبية غير المعوقة هي حول القارة القطبية الجنوبية وفي القطب الشمالي. بالإضافة إلى ذلك، تتأثر حركات المياه بدوران الأرض. يتسبب **تأثير كوريوليس** Coriolis Effect في أن يأخذ الماء مسارًا منحنيًا بدلاً من مسار مستقيم، وتنتج **موجات كلفن** Kelvin Waves نطاقات مد مختلفة عبر القنوات.

قوة كوريوليس. هي قوة تؤثر في حركة التيارات البحرية حيث تؤدي إلى انحراف حركة الرياح إلى اليمين في نصف الكرة الأرضية الشمالي وإلى اليسار في نصفها الجنوبي بسبب دوران الأرض حول نفسها . وأثر كوريوليس نسبة الى العالم الفرنسي كاسپار- كوستاف كوريوليس الذى أثبت رياضيا سنة 1835م تأثير دوران الكرة الأرضية على الأجسام المتحركة فوق سطحها، مع أن الرياضيات التي ظهرت في المعادلات المدية Tidal Tquations من قبل پيير- سيمون لاپلاس منذ عام 1778. يحدث تأثير كوريوليس نتيجة ما يدعى بقوة كوريوليس، التي تظهر في معادلة الحركة لجسم ما ضمن إطار مرجعي دوراني.

وتسهم هذه القوة في حركة التيارات البحرية السطحية الناتجة بفعل الرياح في تسهيل حركة السفن، واختصار المدة الزمنية التي تستغرقها في رحلاتها البحرية عندما يكون اتجاه حركة السفن في اتجاه حرجة التيارات البحرية نفسه.



نظرًا لأن الأرض تدور بشكل أسرع بالقرب من خط الاستواء عنها بالقرب من القطبين (يشار إليها بالأطوال المتغيرة للأسهم الفوسفورية)، فإن الهواء المتحرك المرسوم إلى مناطق الضغط المنخفض عند خطوط العرض الوسطى ينتقل شرقًا إما أسرع أو أبطأ من المنخفض نفسه. نظرًا لأن الانخفاض يسحب الهواء للداخل (الأسهم البيضاء)، فإن الاختلاف في السرعات يتسبب في انحناء الهواء - عكس اتجاه عقارب الساعة في نصف الكرة الشمالي وفي اتجاه عقارب الساعة في نصف الكرة الجنوبي (الأسهم الأرجواني).

القـــوى المؤثـــــرة على المـــد والجـــــزر

لمعرفة هذه القوى نحتاج إلى إلقاء نظرة على قوانين نيوتن للحركة والجاذبية، لكن تسارع الجاذبية يلعب دورًا رئيسيًا في هذا القسم أيضًا. ينص قانون نيوتن للحركة على أن «عجلة الجسم تساوي القوة المؤثرة عليه لكل وحدة كتلة».

$$\text{التسارع } (a) = \frac{\text{القوة } (F)}{\text{الكتلة } (m)}$$

كما ينص قانون نيوتن للجاذبية على أن «جسم كتلته M يمارس الجاذبية على وحدة كتلة على مسافة r من

$$Fg = \frac{GM}{r^2}$$

حيث G هو ثابت الجاذبية العالمي.

تسارع الجاذبية المركزية (Ac) هو تسارع الجسم باتجاه مركز انحناء المسار الذي يتحرك على طوله ولجسم بسرعة على طول مسار بنصف قطر انحناء (r).

$$(A_c) = \frac{v^2}{r}$$

سنقارن الآن جاذبية الشمس على الأرض بجاذبية القمر على الأرض.

كتلة الشمس = 27 مليون مرة كتلة كتلة القمر.

مسافة الشمس إلى الأرض = 390 ضعف مسافة القمر عن الأرض هكذا

$$\frac{Fg \text{ الشمس}}{Fg \text{ القمر}} = \frac{27 \times 10^{s}}{(390)^2}$$

= 178 مرة من جاذبية القمر

لـذا فـإن جاذبيـة الشـمس أكبـر بـ 178 مـرة مـن جاذبيـة القمـر. ولكـن كيـف يمكن أن يكون هـذا؟ نعلم جميعًا أن القمـر أكثـر فاعليـة في إنتـاج المـد والجـزر مـن الشـمس. هنـاك تفسـير بسـيط لهـذا، وهـو:

إن نسـبة قـوة الجاذبيـة غيـر المتوازنـة مـع تسـارع الجاذبيـة (Ac) في الحركـة المداريـة لـلأرض هـي فقـط التـي تنتـج المـد والجـزر. يتناسـب هـذا الجـزء غيـر المتـوازن مـع المكعـب العكسـي للمسـافات بـدلاً مـن المربـع العكسـي للمسـافات مـن الأرض. ومـع ذلـك فهـي لا تـزال متناسـبة مـع الكتلـة كمـا في المعادلـة التاليـة:

$$Fg = \frac{GM}{r^2}$$

ومـن هنـــا يمكننـا أن نـــرى أن قـــوى المـــد والجـــزر للشـمس تقـارب 390/178 = 0.46 ضعـف قـوة القمـر. أو أن قـوى المـد والجـزر للشـمس تسـاوي نصـف قـوى المـد والجـزر للقمـر.

بشـكل عـام، نتحـدث عـن الأرض التـي تـدور حـول الشـمس، ولكـن في الواقـع تـدور الأرض والشـمس حـول مركـز مشـترك للكتلـة علـى بعـد أقـل مـن 500 كيلومتـر

من مركز الشمس. وبالمثل، يدور القمر والأرض حول مركز مشترك للكتلة داخل الأرض، على عمق 1700 كيلومتر تقريبًا تحت سطح الأرض. إن ثورة الأرض في هذا المدار الصغير هي الجزء المقابل للثورة حول الشمس. لقد رأينا بالفعل أن قوة المد والجزر للشمس تبلغ حوالي نصف قوة القمر. لكننا نحتاج أيضًا إلى النظر إلى قوى المد والجزر للقمر فيما يتعلق بقوى جاذبية سطح الأرض. لهذا يمكننا إهمال جميع قوى الطرد المركزي بسبب الدوران المحوري. عند المقارنة، نرى أن قوى المد والجزر للقمر تبلغ على الأكثر واحدًا من عشرة ملايين من جاذبية سطح الأرض. قد يُنظر إلى هذا على أنه إهمال وبالتالي غير مهم، إلا أن هذه القوى الصغيرة تعمل على كل جزيء من الماء في جميع أنحاء عمق المحيط، مما يسرعها نحو نقطة تحت القمر (أو تحت القطب) على الجانب القريب من الأرض ونحو المضاد. على الجانب البعيد.

المفهـــوم الرياضـــي للمـــــد والـجـــــزر

لقد حددت النظريات الفلكية للقمر والشمس ترددات وقوة المكونات المختلفة للقوة المولدة للمد والجزر. لكن التنبؤ الفعال في أي مكان معين يتطلب قياس عينة كافية من ملاحظات المد والجزر المحلية، لإظهار استجابة المد والجزر المحلية عند تلك الترددات المختلفة، في السعة والمرحلة. ثم كان لا بد من تحليل تلك الملاحظات، لاشتقاق المعاملات وزوايا الطور. بعد ذلك، لأغراض التنبؤ، كان لا بد من إعادة توحيد ثوابت المد والجزر المحلية، ولكل منها مكون مختلف من القوى المولدة للمد والجزر التي تطبق عليها، وفي كل تسلسل من التواريخ والأوقات المستقبلية، ثم العناصر المختلفة أخيرًا جمعت معًا للحصول على آثارها الإجمالية. في العصر الذي كانت تتم فيه العمليات الحسابية باليد والعقل يتم حساب توقعات المد والجزر من سلسلة من البيانات الزمنية التي تم الحصول عليها من الخرائط في السنوات السابقة. تم تعديل هذه السلسلة من البيانات بطريقة المربعات الصغرى باستخدام خوارزمية فورمان (فورمان، MGG 1977م. دليل لتحليل وتوقع مرتفعات المد والجزر).

معادلة المـــــد والجـــــــزر

$$\eta(\tau) = a_0 + \sum_{\eta=1}^{k} a_\eta \cos(\omega_\eta t + \alpha_\eta)$$

a_0 : متوسط المستوى المرجعي

a_η : السعة

α_η : المرحلة

k : مكونات متناسقة

ω_η : التردد الزاوي

كلما زادت سلسلة البيانات التي تم الحصول عليها زادت دقة التنبؤ، حيث سيكون لدينا عدد أكبر من الثوابت التوافقية. ومع ذلك، فإن تنفيذ وجمع البيانات باستخدام Mareographs هي عمليات معقدة، وبالنظر إلى أنه عادة ما يكون هناك اختلاف بسيط في المد والجزر للمواقع القريبة نسبيًا، فمن الممكن التنبؤ بالمد والجزر في المنافذ الثانوية (تلك التي لا تتوفر لها الثوابت التوافقية).

أوجه الشبه والاختلاف بين موجة المد والجزر وموجة التسونامي

الخاصية	موجـــة المـــد والجـــزر	موجـــة التسونامي
التعريف	موجات تنشأ عن قوى الجاذبية للشمس أو القمر، وتسبب تغيرات في مستوى المسطحات المائية.	تسونامي عبارة عن سلسلة من موجات المياه الناتجة عن إزاحة المسطحات المائية الكبيرة. لديهم عمومًا سعة منخفضة ولكن طول موجي مرتفع (يبلغ طوله بضع مئات من الكيلومترات). تمر تسونامي عمومًا دون أن يلاحظها أحد في البحر ولكنها تظهر في المياه الضحلة أو الأرض.
السبب	تحدث موجات المد والجزر بسبب قوة الجاذبية التي تمارسها الشمس والقمر.	تتولد موجات تسونامي عن الزلازل أو اندلاع البراكين الغواصة أو بسبب أي فقاعة غاز تندلع في البحر أو المحيط.
الشدة	يمكن ملاحظة شدة المد المتغير فقط في أجزاء معينة حيث يكون مرتفعًا بدرجة كافية (يصل ارتفاعه إلى 55 قدمًا في خليج فندي، كندا).	يمكن أن تصل أطوال موجات تسونامي إلى 200 كيلومتر ويمكن أن تسافر أكثر من 800 كيلومتر في الساعة. عندما يقترب تسونامي من المياه الضحلة بالقرب من الكتل الأرضية، تنخفض السرعة ويزداد الاتساع بسرعة كبيرة.
الموقع	تعتبر موجات المد والجزر من الظواهر الأكثر مشاهدة في المناطق الساحلية.	تحدث غالبية موجات تسونامي (80 %) في المحيط الهادئ ولكن يمكن أن تحدث في أي مسطح مائي كبير إذا كانت الأسباب الكامنة موجودة.
التردد	تحدث موجات المد والجزر يوميا في منطقة ساحلية.	تحدث تسونامي فقط عندما يكون هناك اضطراب زلزالي في المسطحات المائية الكبيرة.

الاختلافـــات الرئيســـية بين المـــد والجـــزر والأمـــواج

- المد والجزر هو صعود وهبوط المياه على سطح البحر المتأثرين بقوى الجاذبية للشمس والقمر والأرض. تتكون الموجات من حركة الرياح على سطح الموجة وانتقال الطاقة عن طريق الاحتكاك بين جزيئات الهواء والماء.
- يتأثر المد والجزر بالشمس والقمر والأرض بينما تتأثر الأمواج بفعل الرياح على سطح البحر.
- تعتمد شدة المد والجزر على قوة جاذبية الشمس والقمر عندما تدور الأرض حول محورها ولكن شدة الموجات تعتمد على سرعة الرياح ومدة الرياح والمنطقة التي تمر عبرها تهب الرياح.
- الطاقة المولدة في المد والجزر هي طاقة حركية وطاقة كامنة بينما الطاقة المولدة في الأمواج هي طاقة حركية.
- يمكن أن يتراوح ارتفاع المد والجزر من 0 إلى 52 قدمًا بينما يمكن أن يتراوح ارتفاع الأمواج من 1 إلى 30 قدمًا.
- تحدث الأمواج على مدار اليوم تقريبًا بسبب حركة الرياح بينما يحدث المد والجزر مرتين يوميًا لمدة 12 ساعة و 35 دقيقة.

طاقـــــة المـــــد والجـــــزر

تعتبـر طاقـة المـد والجـزر أحـد مصـادر الطاقـة التـي تصنـف ضمـن أفضـل المصـادر المتجـددة والمسـتدامة. ويتـم الحصـول عليهـا بسـبب تناوب مسـتويات سـطح البحـر، حيـث يتـم تسـخير الطاقـة الحركيـة مـن الارتفـاع الطبيعـي وانخفـاض المـد والجـزر وتحويلهـا إلـى كهربـاء، يحـدث المـد والجـزر بسـبب قـوى الجاذبيـة المشـتركة للقمـر والشـمس والأرض. يتـم تحويـل طاقـة المـد والجـزر إلـى كهربـاء باسـتخدام ثـلاث تقنيـات:

• توربينـــات المـــد والجـــزر

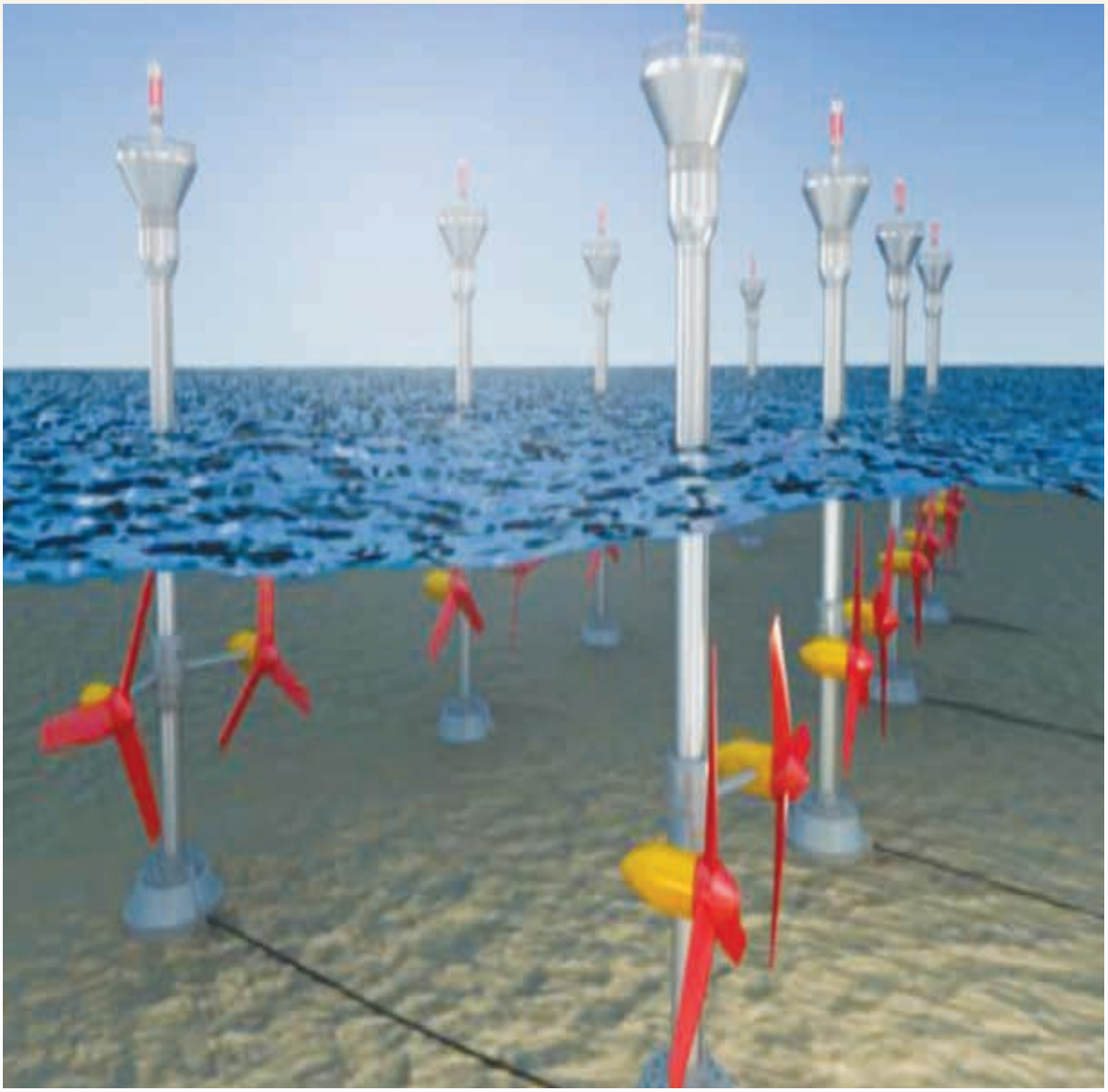
تسـتخدم توربينـات المـد والجـزر نفـس التكنولوجيـا لتوربينـات الريـاح، والفـرق الوحيـد هـو أن ريـش توربينـات المـد والجـزر أقـوى وأقصـر بكثيـر، لـذا فـإن أفضـل طريقـة لمقارنـة توربينـات المـد والجـزر هـي طواحـين الهـواء تحـت المـاء. مـن الناحيـة المثاليـة تديـر التيـارات المائيـة التوربيـن، حيـث أن التوربيـن متصـل بمولـد مـن خـلال عمـود، لذلـك عندمـا تـدور التوربيـن يـدور العمـود أيضًـا، يقـوم عمـود الـدوران بتنشـيط المولـد الـذي يولـد الكهربـاء، التكلفـة الأوليـة لإنشـاء نظـام تيـار المـد والجـزر هـذا علـى الجانـب الأعلـى، إلـى جانـب صعوبـة الصيانـة، ومـع ذلـك فإنـه يبقـى بديـلاً أرخـص ولا يتسـبب في تدهـور البيئـة مقارنـة بتقنيـات المـد والجـزر الأخـرى.

• قنـاطـــر المـــد والجـــــزر

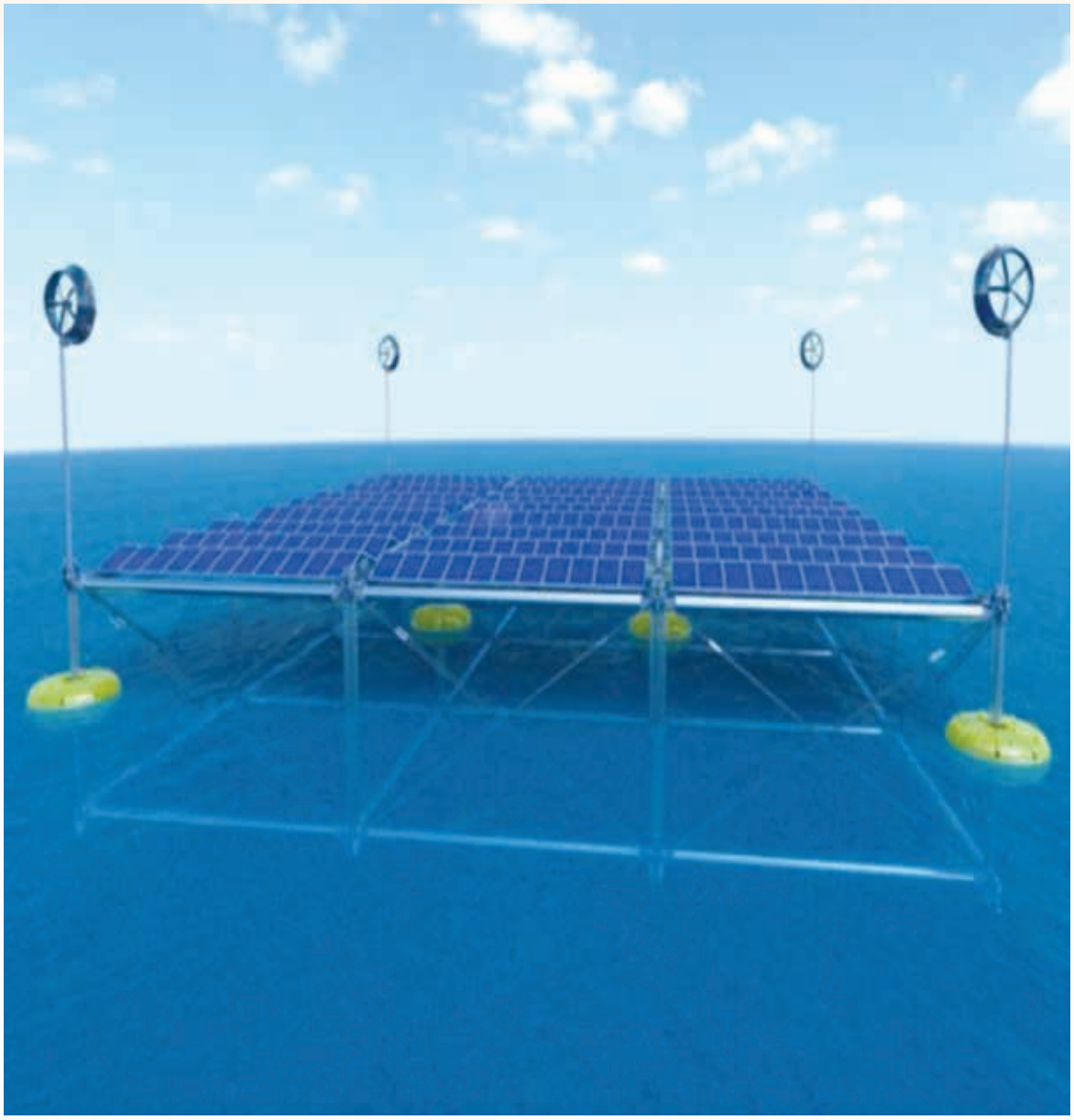
قناطر المد والجزر هي أكثر تقنيات طاقة المد والجزر كفاءة، حيث أنها تشبه السدود المستخدمة في محطات الطاقة الكهرومائية والفرق هو أنها أكبر بكثير؛ لأنها شيدت عبر خليج أو مصب. قناطر المد والجزر عبارة عن هياكل خرسانية طويلة يتم بناؤها عادة عبر مصبات الأنهار، حيث تحتوي القناطر على أنفاق تحتوي على توربينات والتي يتم تشغيلها عندما يتدفق الماء من جانب واحد عبر النفق إلى الجانب الآخر.

• بحيـــرات المـــد والجـــــزر

هذه التكنولوجيا لديها الكثير من القواسم المشتركة مع قناطر المد والجزر، حيث أنها فقط لا تنطوي على الكثير من النفقات الرأسمالية الأولية وهي صديقة للبيئة. تعتبر محطة (Tidal lagoon) محطة طاقة منفصلة عن بقية المحيط أو البحر وعندما يرتفع المد تمتلئ البحيرة بالكامل، وعندما ينحسر المد يُسمح للمياه بالخروج من خلال فتحة تتكون من توربينات، مما يؤدي التدفق الخارجي للمياه إلى تشغيل التوربين الذي يولد الطاقة.



طاقة المد والجزر إحدى الطرق البديلة والآمنة التي يسعى العالم إلى الاستفادة منها في توليد الكهرباء وغيرها من الأنواع الأخرى المختلفة من الطاقة المتجددة صديقة البيئة والإنسان، تخلو من العيوب التي تنتجها الطاقة غير المتجددة. https://www.ts3a.com/?p=64099



أول منصة محيطات هجينة في العالم تقوم بتحويل موجات المد والجزر إلى طاقة. يمكن استخدام الطاقة الملتَقطة من حركة المد والجزر، الأمواج، والتيارات لتوليد الكهرباء

مزايـــا طاقـــــة المـــــد والجـــزر

• تعتبر صديقـــة للبيئة

حقيقة أن تقنيات طاقة المد والجزر مثبتة على السواحل والبحر تجعلها جيدة للبيئة، حيث أن لم يتم التدخل في الأرض، أيضًا تعد طاقة المد والجزر مصدرًا نظيفًا للطاقة، مما يعني أنها لا تطلق أي غازات دفيئة في الغلاف الجوي.

• تعد مصدر طاقة متجددة

يتم تسخير المد والجزر لإنتاج طاقة المد والجزر من قوة الجاذبية المشتركة للشمس والقمر والأرض بالتزامن مع دوران الكوكب حول محوره، هذه عملية طبيعية تحدث كل يوم وهذا يعني أن المد والجزر سيستمر في الحدوث وسيستمر إنتاج طاقة المد والجزر حتى نهاية الوقت.

• تكلفـــة تنافســـية

تتمتع تقنيات طاقة المد والجزر التي تم إنشاؤها مرة واحدة بإمكانية توليد الكهرباء لسنوات عديدة مما يعني أنها تدوم طويلاً، على الرغم من أن التكاليف الأولية لإنشاء محطة لتوليد الطاقة من المد والجزر مرتفعة نسبيًا إلا أن العائد على الاستثمار سيتحقق على المدى الطويل .

• يقـــلل الاعتمـــاد المفـــــرط على الوقـــــود الأحفـــوري

مصـادر الطاقـة القائمـة علـى الأحافيـر مثـل النفـط والفحـم والغـاز الطبيعـي تنبعـث منهـا غـازات الدفيئـة التـي تـؤدي إلـى تغيـر المنـاخ والاحتبـاس الحـراري، توفـر طاقـة المـد والجـزر بديـلاً صديقًـا للبيئـة ومتجـددًا لخفـض انبعاثـات غـازات الاحتبـاس الحـراري.

• تُعـد فعالـــة جدًا حتى عند الســرعات المنخفضـة

تيـارات المحيطـات لديهـا القـدرة علـى إنتـاج طاقـة أكثـر مـن التيـارات الهوائيـة؛ لأن ميـاه المحيطـات أكثـف 832 مـرة مـن الهـواء، وهـذا يعنـي أن التيـارات البحريـة تطبـق قـوة أكبـر علـى التوربينـات لتوليـد المزيـد مـن الطاقـة.

• طـــول عمـــر المعـــدات

يمكـن أن تـدوم محطـات توليـد الطاقـة مـن المـد والجـزر لفتـرة أطـول بكثيـر مـن مـزارع الريـاح أو الطاقـة الشمسـية أي حوالـي أربعـة أضعـاف طـول العمـر.

عيـــــوب طاقـــــة المـــــد والجـــــزر

• ارتفـــاع تكاليـف رأس المـال مقدمـــا

تقنيـات طاقـة المـد والجـزر جديـدة إلـى حـد كبيـر، بمعنـى أن تكاليـف البنيـة التحتيـة مرتفعـة نسـبيًا في الوقـت الحالـي.

• ليســـت صديقـــة للبيئة تمامًا

يُعتقـد أن أنظمـة توليـد طاقـة المـد والجـزر لهـا بعـض التأثيـرات البيئيـة لكـن لـم يتـم تحديدهـا كمياً، بالإضافـة إلـى ذلـك تنتـج محطـات المـد والجـزر الكهربـاء باسـتخدام قناطـر المـد والجـزر التـي تعتمـد علـى التلاعـب بمسـتويات سـطح البحـر، هـذا يعنـي أن لهـا نفـس التأثيـرات البيئيـة مثـل السـدود الكهرومائيـة.

• مشـــــاكل الكفـــــاءة

يعتمـد توليـد كهربـاء المـد والجـزر كليًـا علـى موجـات المـد والجـزر والتـي تحـدث مرتـين في اليـوم، هـذا يعنـي أنـه عندمـا لا يحـدث المـد والجـزر لا يوجـد إنتـاج للطاقـة ولهـذا السـبب يجـب تكبـد تكاليـف إضافيـة لإنشـاء أنظمـة تخزيـن الطاقـة.

• طاقـــة المـــد والجـــزر تحتاج فـــترة حمل طويلـــة

تحتاج محطات توليد الطاقة من المد والجزر إلى الكثير من الوقت لتكون قادرة على إنتاج الكهرباء بكفاءة، يمكن أن يكون هذا الجانب جنبًا إلى جنب مع تكلفة التثبيت غير مستدام، مثال نموذجي لمحطة طاقة المد والجزر التي تم إغلاقها بسبب تجاوز الوقت والتكلفة هو جسر Severn في المملكة المتحدة.

• التأثيـــــر على الحيـــاة البحريـــة

الخوف الأكبر بين مطوري أنظمة طاقة المد والجزر هو تأثير النباتات والتوربينات على النظام البيئي البحري المحيط، حيث يمكن أن يؤدي دوران التوربينات والاهتزازات إلى تعطيل النظام البيئي البحري بشكل كبير ومنع الحركة الطبيعية للحياة البحرية.

الفـــــرق بين طاقـــة الرياح وقـــــوة المـــــد والجـــــزر

- لا تتطلب طاقة الرياح وطاقة المد والجزر حرق الوقود لتسخير طاقتهما.
- كلاهما لا يسبب أي انبعاث لغازات الاحتباس الحراري. الفرق الرئيسي بين مصدري الطاقة المتجددة هو قوة الشمس وقوة القمر.
- يعمل كلاهما على نفس المبادئ، ولكن في حين أن الرياح هي التي تحرك التوربينات في حالة طاقة الرياح، فإن المد الهائل يتسبب في دوران المراوح في حالة قوة المد والجزر.
- في حين أن الرياح لا يمكن التنبؤ بها وتتفاوت في قوتها طوال الوقت، فإن قوة المد والجزر يمكن التنبؤ بها بشكل أكبر وبالتالي يمكن تسخيرها بطريقة أفضل ومخطط لها.
- ومع ذلك، فإن الرياح تهب دائمًا، بينما ينتج المد والجزر بعد فترات منتظمة فقط.
- أحد الأشياء التي تميل بقوة لصالح كل من طاقة الرياح والمد والجزر هو حقيقة أنها لا تسبب ضررًا للبيئة وبالتالي فهي بدائل جذابة للطاقة المشتقة من الوقود الأحفوري.

توقـــــع المـــــد والجـــــزر

عادة ما توجد أكثر تنبؤات المد والجزر دقة للأماكن الواقعة على الساحل لأنها أقل تأثراً بالرياح وأحداث الأرصاد الجوية الأخرى. تتأثر المناطق ذات المياه الضحلة أو الموجودة في الخليج بشكل أكبر بالعوامل البديلة. نظرًا لأن المد الفلكي يستجيب للتأثير الدوري من خلال حركات الجاذبية للأرض والقمر والشمس (بما في ذلك دوران الأرض)، فإن المد والجزر هي ظاهرة دورية في أي مكان على الأرض ويمكن التنبؤ بها من خلال تحليل الملاحظات من الماضي. لذلك يجب تحديد سعة ومرحلة جميع مكونات المد والجزر ذات الصلة.

الطريقة الأكثر شيوعًا اليوم تعتمد على تقنية المربعات الصغرى. يتم تمثيل ارتفاع المد والجزر من خلال مجموع مكونات المد والجزر (الجيبية) التي من المتوقع أن تسفر عن مساهمة كبيرة. اتساع ومراحل مكونات المد والجزر هي معلمات حرة يتم تحديدها من خلال ملاءمة المربع الصغرى للتمثيل في سجل ارتفاع المد والجزر المرصود. يجب أن يكون سجل المد والجزر طويلاً بما يكفي للقضاء على تأثيرات الأرصاد الجوية. يجب أن يكون سجل الملاحظة أطول (عدة مرات على الأقل) من أكبر فترة تظهر في التمثيل. لحل مكونين بفترات قريبة T و T+ΔT، يجب أن يتجاوز طول سجل المراقبة بضع مرات T2/ΔT. بالنسبة للعديد من المحطات حول العالم، تتوفر تنبؤات المد والجزر.

- يتم التعامل مع المد المحلي كموجة، ويتم تقسيمه إلى مكونات مختلفة تسمى المد الجزئي. يتم توقعها بشكل فردي وإضافتها معًا للتنبؤ بالمد المحلي المستقبلي.
- على الرغم من أن أربعة مكونات من المد والجزر يمكن أن تمثل 70 % من إجمالي نطاق المد والجزر، إلا أن حوالي 60 مكونًا تستخدم بشكل شائع.
- يجب التفكير في أكثر من 100 للتنبؤ بالمد والجزر على طول السواحل المعقدة غير النظامية مثل سواحل ألاسكا.
- للتنبؤ بالمد والجزر المحلي، يجب أن تجمع محطات المد والجزر البيانات لمدة لا تقل عن 18.6 سنة لتجربة معظم التكوينات الفلكية لنظام الأرض والقمر والشمس التي تولد المد والجزر.

محاكـــــاة المـــــد والجـــــزر

مـن الصعـب التنبـؤ بالمـد والجـزر الداخلـي الـذي يحـدث حـول فتـرات راحـة الجـرف القـاري مقارنـة بموجـات المحيـط التـي يمكنـك رؤيتهـا . ومـع ذلـك، حقـق الباحثون في معهـد MIT اختراقًـا كبيـرًا : لقـد قامـوا بمحـاكاة تلـك الموجـات المخفيـة لأول مـرة بدقـة. لقـد قامـوا بدمـج نمـوذج هيدروديناميكـي مـع بيانـات مأخـوذة مـن دراسـة موجـات صوتيـة سـاحلية لتكـرار بيئـة المحيـط (في هـذه الحالـة، كسـر الـرف بالقـرب مـن السـاحل الشـرقي للولايـات المتحـدة) بمسـتوى غيـر مرئـي مـن التعقيـد، مكتمـل بعناصـر الخلفيـة مثـل التيـارات والـدوارات.

بـادئ ذي بـدء، معرفـة كيفيـة عمـل هـذه المـد والجـزر الداخليـة يمكـن أن تسـاعد في تطويـر أنظمـة السـونار الأكثـر تقدمـا التـي هـي أفضـل في اسـتيعاب الظـروف تحـت المـاء. كمـا يمكـن أن تـؤدي عمليـات المحـاكاة إلـى توفيـر حمايـة أفضـل للهيـاكل البحريـة مثـل منصـات النفـط ومـزارع الريـاح، حيـث يمكـن للبنائيـن بشـكل أفضـل تفسـير التهديـدات التـي لا يمكـن التنبـؤ بهـا . سـيتعين علـى معهـد ماساتشوسـتس للتكنولوجيـا إجـراء المزيـد مـن الاختبـارات للتأكـد مـن أن نموذجـه لا يـزال قائمـاً، ولكـن هنـاك احتماليـة أن يكـون لديـك فهـم أكثـر وضوحًـا لمـا يحـدث بشـكل جيـد تحـت خـط الميـاه.

Ethereum Tides إيثريوم المد والجزر. حلقة محاكاة المحيط

الفصل السادس

البحـار والمحيطـات

مُقَدِّمَة

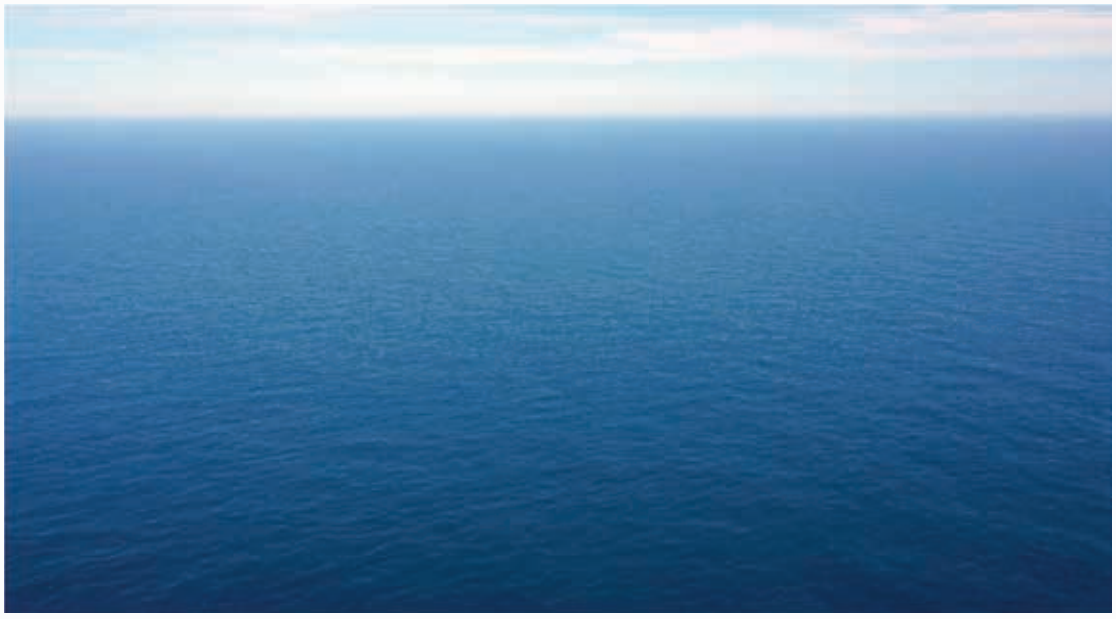
يشير مصطلح «المحيط» أو «البحر» المستخدم دون تحديد إلى كتلة المياه المالحة المترابطة التي تغطي غالبية سطح الأرض. ويشمل المحيط الأطلسي والمحيط الهادئ والهندي والقطب الجنوبي والمحيط المتجمد الشمالي. كمصطلح عام، غالبًا ما يكون «المحيط» و«البحر» قابلين للتبادل، مع أن المتحدثين باللغة الإنجليزية البريطانية يشيرون إلى «البحر» في جميع الحالات، حتى عندما يكون المسطح المائي أحد المحيطات.

بالمعنى الدقيق للكلمة فإن «البحر» هو جسم مائي (بشكل عام جزء من محيط العالم) محاط جزئيًا أو كليًا باليابسة. يمكن أيضًا استخدام كلمة «بحر» للإشارة إلى العديد من المسطحات المائية المحددة والأصغر بكثير، مثل بحر الشمال أو البحر الأحمر. لا يوجد تمييز واضح بين البحار والمحيطات، مع أن البحار عمومًا أصغر حجمًا، وغالبًا ما تحدها الأرض جزئيًا (مثل البحار الهامشية) أو كليًا (مثل البحار الداخلية).

أولًا: البحـــــــار

البحر عبارة عن جسم كبير من المياه المالحة. وقد يشير البحر عادةً إلى المحيط، وهو الجسم الأوسع لمياه البحر. ثمة بحار معينة هي إما بحار هامشية، أو أقسام من الدرجة الثانية من البحر المحيطي (مثل البحر الأبيض المتوسط)، أو بعض المسطحات المائية الكبيرة غير الساحلية تقريبًا.

تختلف ملوحة المسطحات المائية بشكل كبير، حيث تكون أقل بالقرب من السطح ومصب الأنهار الكبيرة وترتفع في أعماق المحيطات؛ ومع ذلك، فإن النسب النسبية للأملاح الذائبة تختلف قليلًا عبر المحيطات. المادة الصلبة الذائبة الأكثر وفرة في مياه البحر هي كلوريد الصوديوم. ويحوي الماء أيضًا على أملاح المغنيسيوم والكالسيوم والبوتاسيوم والزئبق، من بين العديد من العناصر الأخرى، بعضها بتركيزات دقيقة.



المحيط الأطلسي بالقرب من جزر فارو كما ينظر إليه من طائرة هليكوبتر.

يقوم المحيط بتعديل مناخ الأرض وله أدوار مهمة في دورات الماء والكربون والنيتروجين. يتفاعل سطح الماء مع الغلاف الجوي، ويتبادل خصائص مثل الجسيمات ودرجة الحرارة، وكذلك التيارات. التيارات السطحية هي التيارات المائية التي تنتجها تيارات الغلاف الجوي ورياحها التي تهب فوق سطح الماء، منتجة موجات رياح، تنشأ من خلال السحب دورانات بطيئة ولكن ثابتة للمياه، كما في حالة استدامة المحيط لأعماق البحار تيارات المحيط.

تحمل تيارات أعماق البحار، والمعروفة باسم الحزام الناقل العالمي، الماء البارد من المناطق القريبة من القطبين إلى كل المحيطات وتؤثر بشكل كبير على مناخ الأرض. يحدث المد والجزر، وهو ارتفاع وانخفاض مستوى سطح البحر بشكل عام مرتين يوميًا، بسبب دوران الأرض وتأثيرات جاذبية القمر، وبدرجة أقل، جاذبية الشمس. وقد يكون للمد والجزر نطاق مرتفع جدًا في الخلجان أو مصبات الأنهار. يمكن أن تؤدي الزلازل تحت سطح البحر الناشئة عن تحركات الصفائح التكتونية تحت المحيطات إلى حدوث موجات تسونامي مدمرة، كما يمكن أن تؤدي البراكين أو الانهيارات الأرضية الضخمة أو صدمات النيازك الكبيرة.

تعيش مجموعة واسعة من الكائنات الحية، بما في ذلك البكتيريا والطلائعيات والطحالب والنباتات والفطريات والحيوانات في البحار، مما يوفر مجموعة واسعة من الموائل والنظم البيئية البحرية، تنتشر عموديًا من السطح المضاء بنور الشمس والخط الساحلي إلى الأعماق والضغوط الكبيرة من المنطقة السحيقة الباردة المظلمة، وفي خطوط العرض من المياه الباردة تحت القمم الجليدية القطبية إلى المياه الدافئة للشعاب المرجانية في المناطق الاستوائية. تطورت العديد من المجموعات الرئيسية للكائنات الحية في البحر وربما بدأت الحياة هناك.

لقد كانت البحار عنصرًا أساسيًا للإنسان عبر التاريخ والثقافة. فقد سُجّل تسخير البشر للبحار ودراستها منذ العصور القديمة، وثبت ذلك جيدًا في عصور ما قبل التاريخ، بينما تسمى دراستها العلمية الحديثة علم المحيطات والفضاء البحري يحكمه قانون البحار، مع قانون الأميرالية الذي ينظم التفاعلات البشرية في البحر.

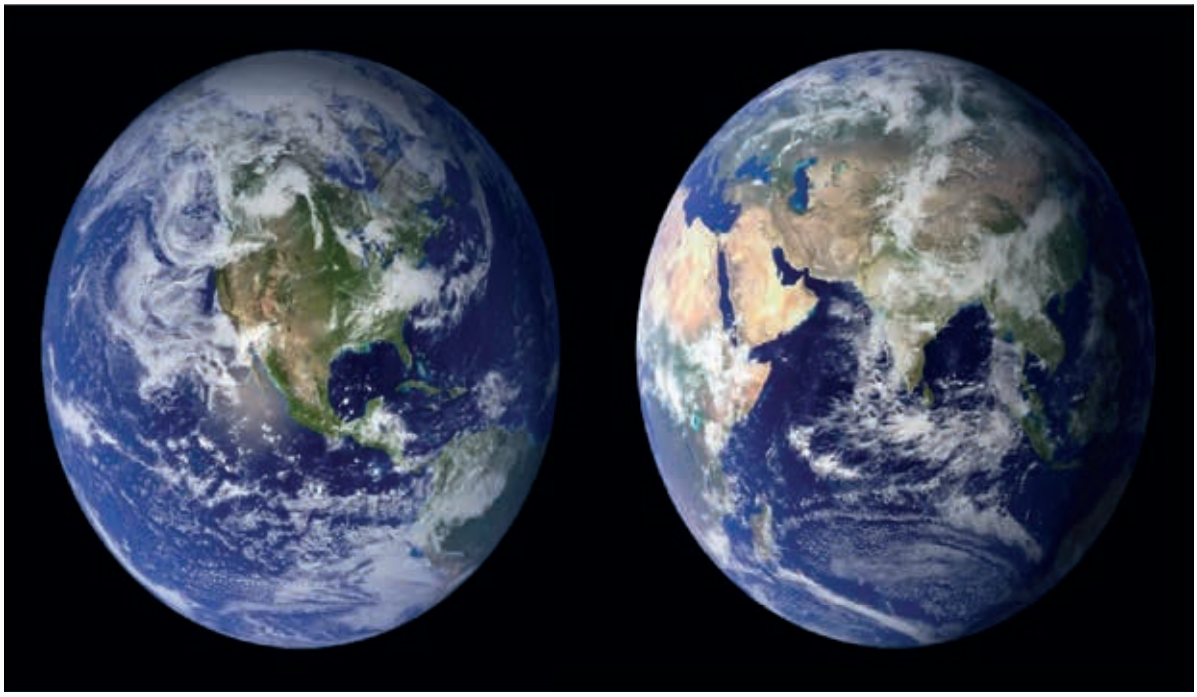
توفر البحار إمدادات كبيرة من الغذاء للبشر، وخاصة الأسماك، ولكن أيضًا المحار والثدييات والأعشاب البحرية، سواء تم صيدها بواسطة الصيادين أو استزراعها تحت الماء. تشمل الاستخدامات البشرية الأخرى للبحار التجارة والسفر واستخراج المعادن وتوليد الطاقة والحرب والأنشطة الترفيهية مثل السباحة والإبحار والغوص. العديد من هذه الأنشطة تسبب التلوث البحري.

1. الخصائـــص الطبيعيـــة للبحـــار

الأرض هي الكوكب الوحيد المعروف الذي يحوي على بحار من الماء السائل على سطحه، مع أن المريخ يمتلك قممًا جليدية والكواكب المماثلة في الأنظمة الشمسية الأخرى قد تحوي على محيطات. تحوي مياه البحار التي تبلغ مساحتها 1,335,000,000 كيلومتر مكعب على نحو 97.2 % من المياه المعروفة وتغطي نحو 71 % من سطحها.

هناك 2.15 % أخرى من مياه الأرض متجمدة، وتوجد في الجليد البحري الذي يغطي المحيط المتجمد الشمالي، والغطاء الجليدي الذي يغطي القارة القطبية الجنوبية والبحار المجاورة لها، والأنهار الجليدية المختلفة والرواسب السطحية حول العالم.

أما الباقي (نحو 0.65 % من المجموع) فيشكل خزانات تحت الأرض أو مراحل مختلفة من دورة المياه، تحوي على المياه العذبة التي تصادفها وتستخدمها معظم الحياة الأرضية: البخار الموجود في الهواء، والسحب التي تتشكل ببطء، والأمطار المتساقطة منها، وتتشكل البحيرات والأنهار تلقائيًا حيث تتدفق مياهها مرارًا وتكرارًا إلى البحر.



صور مركبة للأرض أنشأتها وكالة ناسا في عام 2001، ونلاحظ كيف أن كوكب الأرض يكتسب لونه الأزرق من مياه البحار والمحيطات وليس من غلافه الجوي كما هو حال كوكب نبتون.

الدراسة العلمية للمياه ودورة المياه على الأرض هي الهيدرولوجيا؛ تدرس الديناميكا المائية فيزياء الماء المتحرك. الدراسة الأحدث للبحر على وجه الخصوص هي علم المحيطات. حيث إن هذا العلم بدأ كدراسة لشكل تيارات المحيط ولكنه توسع منذ ذلك الحين إلى مجال كبير ومتعدد التخصصات حيث

يدرس خصائص مياه البحر. فهو يدرس الموجات والمد والجزر والتيارات ورسم الخطوط الساحلية وخرائط قاع البحار؛ ويدرس الحياة البحرية. يُعرف الحقل الفرعي الذي يتعامل مع حركة البحر والقوى المؤثرة عليه باسم علم المحيطات الفيزيائي.

يدرس علم الأحياء البحرية (علم المحيطات البيولوجي) النباتات والحيوانات والكائنات الحية الأخرى التي تعيش في النظم البيئية البحرية. وكلاهما يعتمد على علم المحيطات الكيميائي، الذي يدرس سلوك العناصر والجزيئات داخل المحيطات: وخاصة، في الوقت الحالي، دور المحيط في دورة الكربون ودور ثاني أكسيد الكربون في زيادة حموضة مياه البحر.

ترسم الجغرافيا البحرية شكل البحر وتشكيله، بينما قدمت الجيولوجيا البحرية (علم المحيطات الجيولوجي) دليلًا على الانجراف القاري وتكوين الأرض وبنيتها، وأوضحت عملية الترسيب، وساعدت في دراسة البراكين والزلازل.

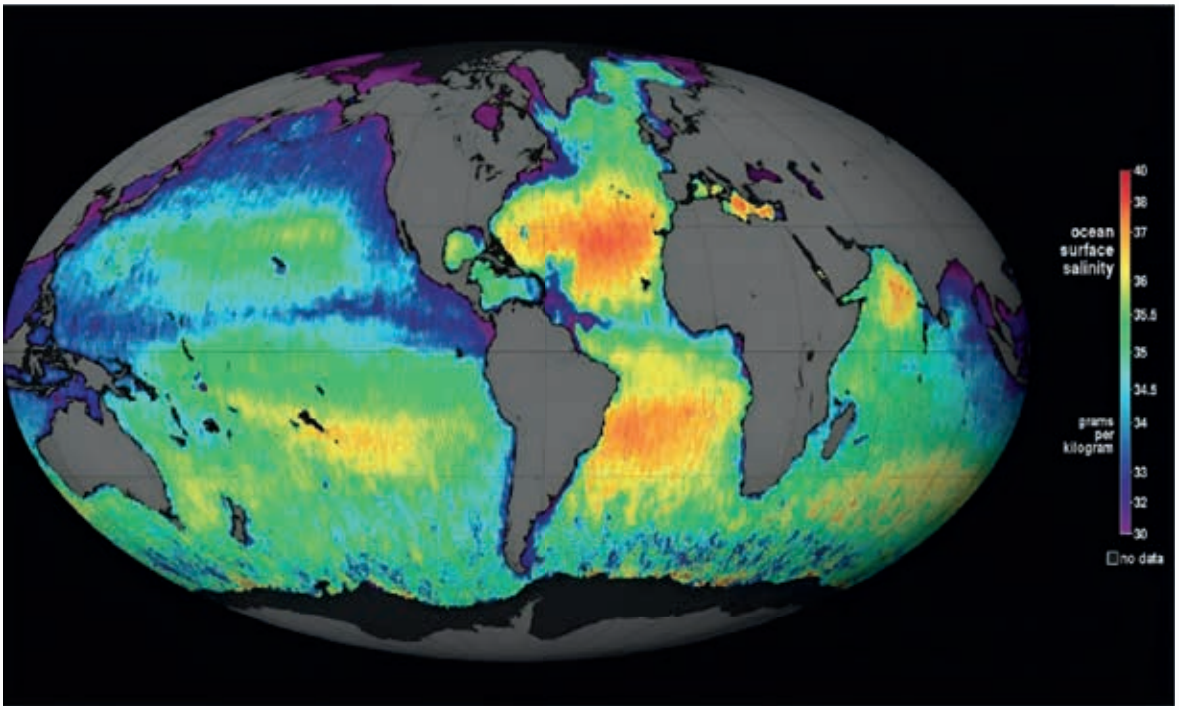
2. ميـــاه البحـــار

في المتوســـط، تبلغ نســـبة ملوحة ميـــاه البحر في محيطات العالم نحو 3.5 % (35 غرام/لتر). وهذا يعني أن كل كيلوغرام (نحو لتر واحد من حيث الحجـــم) من مياه البحـــر يحـــوي على نحـــو 35 غرامًا من الأملاح الذائبة (في الغالب أيونات الصوديوم (Na^+) والكلوريـــد (Cl^-)). متوسط الكثافة على السطح 1.025 كغ/لتر.

مياه البحر أكثر كثافة من المياه العذبة والمياه النقية (كثافة 1.0 كغ/لتر عند 4 درجات مئوية) لأن الأملاح الذائبة تزيد الكتلة بنسبة أكبر من الحجم. تنخفض درجة تجمد مياه البحر مع زيادة تركيز الملح.

في الملوحة النموذجية، يتجمد عند درجة حرارة - 2 درجة مئوية تقريبًا. عثر على أبرد مياه بحر لا تزال في حالة سائلة أمكن تسجيلها على الإطلاق في عام 2010، في تيار تحت نهر جليدي في القطب الجنوبي: كانت درجة الحرارة المقاسة - 2.6 درجة مئوية.

عادة ما يقتصر الأس الهيدروجيني PH لمياه البحر على نطاق يتراوح بين 7.5 و8.4. ومع ذلك، لا يوجد مقياس مرجعي مقبول عالميًا للأس الهيدروجيني لمياه البحر، وقد يصل الفرق بين القياسات المستندة إلى مقاييس مرجعية مختلفة إلى 0.14 وحدة.



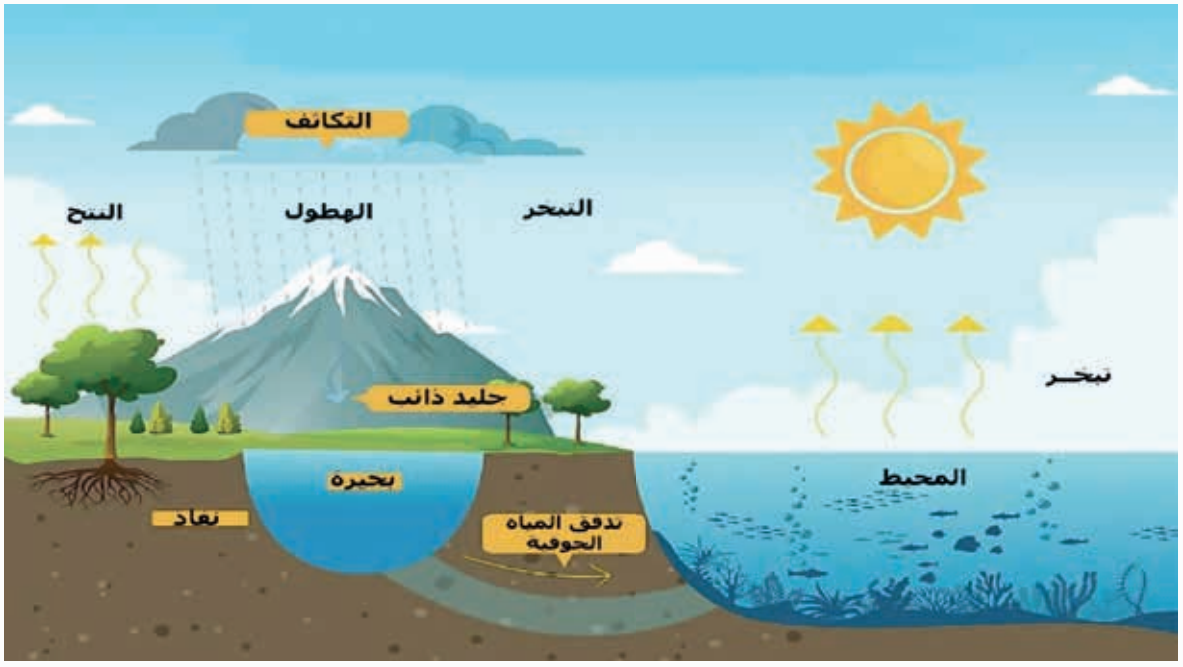
خريطة الملوحة مأخوذة من مركبة أكواريوس الفضائية. تمثل ألوان قوس قزح مستويات الملوحة: الأحمر = 40 %، الأرجواني = 30 %

3. دورة الميـــــاه

دورة المياه (المعروفة علميًا بالدورة الهيدرولوجية) هي التبادل المستمر للمياه داخل الغلاف المائي، بين الغلاف الجوي ومياه التربة والمياه السطحية والمياه الجوفية والنباتات.

يتحرك الماء بشكل دائم عبر كل منطقة من هذه المناطق في دورة المياه التي تتكون من عمليات النقل الآتية:

- التبخر من المحيطات والمسطحات المائية الأخرى إلى الهواء والنتح من النباتات والحيوانات البرية إلى الهواء.
- هطول الأمطار، نتيجة تكاثف بخار الماء من الهواء وسقوطه على الأرض أو المحيط.
- الجريان السطحي من الأرض يصل عادة إلى البحر.



دورة المياه في الطبيعة.

تعود إليه معظم أبخرة الماء الموجودة في الغالب في المحيط، لكن الرياح تحمل بخار الماء فوق الأرض بنفس معدل الجريان السطحي إلى البحر، نحو 47 تيرا طن سنويًا، بينما يساهم التبخر والنتح الذي يحدث في الكتل الأرضية أيضًا بـ 72 تيرا طن أخرى سنويًا. لهطول الأمطار، بمعدل 119 طن سنويًا على الأرض، عدة أشكال: المطر والثلج والبرد، مع بعض المساهمة من الضباب والندى.

الندى عبارة عن قطرات صغيرة من الماء تتكثف عندما تلتقي كثافة عالية من بخار الماء بسطح بارد. يتكون الندى عادة في الصباح عندما تكون درجة الحرارة في أدنى مستوياتها، قبل شروق الشمس مباشرة وعندما تبدأ درجة حرارة سطح الأرض في الارتفاع. قد يؤدي الماء المتكثف في الهواء أيضًا إلى انكسار ضوء الشمس لإنتاج قوس قزح.

غالبًا ما تتجمع المياه الجارية فوق مستجمعات المياه التي تصب في الأنهار. من خلال التآكل، يشكل الجريان السطحي البيئة مما يخلق وديان الأنهار والدلتا التي توفر تربة غنية وأرضًا مستوية لإنشاء المراكز السكانية.

يحدث الفيضان عندما تكون مساحة من الأرض، عادة ما تكون منخفضة، مغطاة بالمياه، ويحدث ذلك عندما يفيض نهر على ضفافه أو تحدث عاصفة. من ناحية أخرى، الجفاف هو فترة ممتدة من أشهر أو سنوات عندما تلاحظ المنطقة نقصًا في إمدادات المياه الخاصة بها. يحدث هذا عندما تتلقى منطقة ما باستمرار أقل من متوسط هطول الأمطار إما بسبب تضاريسها أو بسبب موقعها من حيث خط العرض.

4. مســـتوى ســـطح البحـــر

متوسط مستوى سطح البحر (MSL، غالبًا ما يتم اختصاره إلى مستوى سطح البحر) هو متوسط مستوى السطح لواحد أو أكثر من المسطحات المائية الساحلية على الأرض والتي يمكن قياس الارتفاعات منها مثل الارتفاع.

إن متوسط مستوى سطح البحر العالمي هو نوع من المسند الرأسي – مسند جيوديسي موحد – يستخدم، على سبيل المثال، كمسند رسم بياني في رسم الخرائط والملاحة البحرية، أو في الطيران، كمستوى سطح البحر القياسي الذي يجري عنده قياس الضغط الجوي لمعايرة الارتفاع ومن ثمّ مستويات طيران الطائرة.

معيار متوسط مستوى سطح البحر الشائع والمباشر نسبيًا هو بدلًا من ذلك نقطة المنتصف بين متوسط انخفاض ومتوسط ارتفاع المد في موقع معين.

يمكن أن تتأثر مستويات سطح البحر بالعديد من العوامل ومن المعروف أنها تباينت بشكل كبير على المقاييس الزمنية الجيولوجية. ويعود السبب الرئيسي لارتفاع مستوى سطح البحر الحالي إلى تغير المناخ الناجم عن أنشطة بشرية.

عندما ترتفع درجات الحرارة، تذوب الأنهار الجليدية الجبلية والقمم الجليدية القطبية، مما يزيد من كمية المياه في المسطحات المائية. نظرًا لأن معظم المستوطنات البشرية والبنية التحتية قد جرى بناؤها استجابة لمستوى سطح البحر الأكثر تطبيعًا مع تغير متوقع محدود، فإن السكان المتأثرين بتغير المناخ فيما يتعلق بارتفاع مستوى سطح البحر سيحتاجون إلى الاستثمار في التكيف مع المناخ للتخفيف من أسوأ الآثار أو عندما يكون السكان في حالة تأهب. المخاطرة الشديدة، وهي عملية تراجع مُدار.

يشير المصطلح فوق مستوى سطح البحر عمومًا إلى فوق مستوى سطح البحر (AMSL). يعني مصطلح (APSL) فوق مستوى سطح البحر الحالي، مقارنة مستويات سطح البحر في الماضي بمستوى اليوم.

يبلغ نصف قطر الأرض عند مستوى سطح البحر 6378.137 كيلومترا عند خط الاستواء. ويبلغ طولها عند القطبين 6356.752 كم، وفي المتوسط 6371.001 كم. هذا الاختلاف عن الكرة المثالية هو مجسم الأرض. وهو يسبب منخفضًا كبيرًا في المحيط الهندي، على بعد نحو 1200 كيلومتر جنوب غرب الهند، حيث يصل سطحه إلى عمق 106 أمتار تحت المتوسط العالمي لمستوى سطح البحر.

5. أمـــواج البحـــر

تشكل الرياح التي تهب على سطح الماء موجات متعامدة مع اتجاه الريح. يؤدي الاحتكاك بين الهواء والماء الناتج عن نسيم لطيف على البركة إلى تكوين تموجات. تتسبب ضربة قوية فوق المحيط في حدوث موجات أكبر حيث يندفع الهواء المتحرك عكس التلال المرتفعة من الماء.

تصل الأمواج إلى أقصى ارتفاع لها عندما يقترب معدل انتقالها من سرعة الرياح. في المياه المفتوحة، عندما تهب الرياح بشكل مستمر كما يحدث في نصف الكرة الجنوبي في الأربعينات الهادرة، تتدحرج كتل طويلة منظمة من الماء تسمى الانتفاخ عبر المحيط.

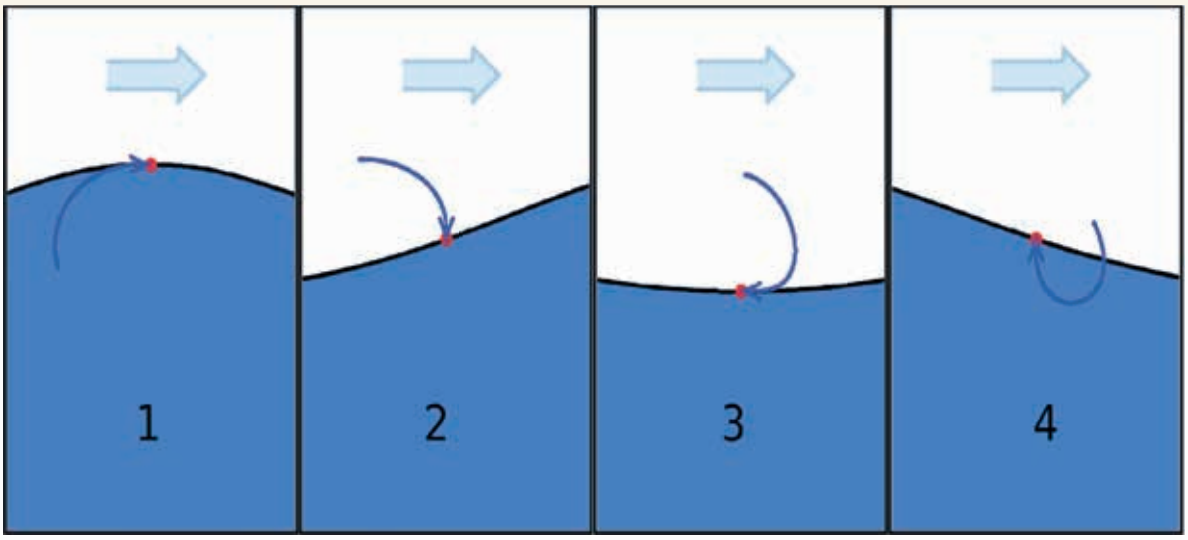
إذا هدأت الرياح، يقل تكوين الموجة، لكن الموجات المتكونة بالفعل تستمر في السفر في اتجاهها الأصلي حتى تلتقي باليابسة. ويعتمد حجم الأمواج على مجيء الرياح، والمسافة التي هبت بها الرياح فوق الماء، وقوة تلك الرياح ومدتها.

عندما تلتقي الأمواج بموجات أخرى قادمة من اتجاهات مختلفة، فإن التداخل بين الاثنين يمكن أن ينتج عنه بحار متكسرة وغير منتظمة. يمكن أن يتسبب التداخل البنَّاء في حدوث موجات مارقة فردية (غير متوقعة) أعلى بكثير من المعتاد.

يبلغ ارتفاع معظم الأمواج أقل من 3 أمتار، وليس من غير المعتاد أن تضاعف العواصف القوية هذا الارتفاع مرتين أو ثلاثة أضعاف؛ تستخدم الإنشاءات البحرية مثل مزارع الرياح ومنصات النفط إحصائيات الأرصاد الجوية من القياسات في حساب قوى الأمواج (مثل موجة المائة عام) التي تم تصميمها ضدها. ومع ذلك، فقد جرى توثيق موجات مارقة على ارتفاعات تزيد عن 25 مترًا.

تُعرف ذروة الموجة بالقمة، وأدنى نقطة بين الأمواج هي القاع، والمسافة بين القمم هي الطول الموجي. يجري دفع الموجة عبر سطح البحر بواسطة الرياح، لكن هذا يمثل نقلًا للطاقة وليس لحركة المياه الأفقية.

عندما تقترب الأمواج من الأرض وتنتقل إلى المياه الضحلة، فإنها تغير سلوكها. إذا اقتربت بزاوية، فقد تنحني الموجات (تنكسر) أو تلتف على الصخور والرؤوس (تنعرج). عندما تصل الموجة إلى نقطة تلامس أعمق اهتزازاتها في ماء قاع البحر، تبدأ في التباطؤ. يؤدي هذا إلى تقريب القمم من بعضها بعضًا وزيادة ارتفاع الأمواج، وهو ما يسمى الموجة الضحلة. وعندما تزيد نسبة ارتفاع الموجة إلى عمق الماء عن حد معين، فإنها «تنكسر» وتنقلب في كتلة من الماء الرغوي. ويندفع هذا في صفيحة أعلى الشاطئ قبل أن يتراجع إلى البحر تحت تأثير الجاذبية.



أطوار الموجة السطحية المائية: 1. قمة الموجة، حيث تتحرك الكتل المائية للطبقة السطحية أفقياً في نفس اتجاه انتشار واجهة الموجة. 2. موجة السقوط. 3. الحوض الصغير، حيث تتحرك الكتل المائية للطبقة السطحية أفقياً في اتجاه معاكس لاتجاه واجهة الموجة. 4. ارتفاع الموجة.

6. الســـــواحـل

تعرف المنطقة التي تلتقي فيها الأرض بالبحر بالساحل، والجزء الواقع بين أقل المد الربيعي والحد الأعلى الذي تصل إليه الأمواج المتطايرة هو الشاطئ. الشاطئ هو تراكم الرمال أو الألواح الخشبية على الشاطئ. الرأس هو نقطة من الأرض تبرز في البحر ويُعرف الرعن الأكبر باسم الرأس.

المسافة البادئة للخط الساحلي، خاصة بين رأسين، هي خليج، والخليج الصغير ذو المدخل الضيق هو الجون، ويمكن الإشارة إلى الخليج الكبير على أنه خليج. وتتأثر الخطوط الساحلية بعدة عوامل منها قوة الأمواج الواصلة إلى الشاطئ، وانحدار هامش الأرض، وتركيبة الصخور الساحلية وصلابتها، وميل المنحدر البعيد عن الشاطئ، والتغيرات في مستوى الأرض بسبب الارتفاع المحلي أو الغمر.

الخط الساحلي الوعر لمنطقة الساحل الغربي لنيوزيلندا.

عـادة، تتدحـرج الأمـواج نحـو الشـاطئ بمعـدل سـتة إلـى ثمانيـة موجـات في الدقيقـة، وتعـرف باسـم الموجـات البنّـاءة لأنهـا تميـل إلـى تحريـك المـواد إلـى أعلـى الشـاطئ ويكـون لهـا تأثيـر تـآكل بسـيط. تصـل موجـات العاصفـة إلـى الشـاطئ في تتابـع سـريع وتُعـرف باسـم الموجـات المدمـرة حيـث تحـرك الأمـواج مـواد الشـاطئ باتجـاه البحـر.

وتحـت تأثيرهـا، يتـم طحـن الرمـال والألـواح الخشـبية الموجـودة علـى الشـاطئ معًـا وتآكلهـا. عنـد ارتفـاع المـد، يكـون لقـوة موجـة العاصفـة التـي تؤثـر علـى سـفح الهاويـة تأثيـر محطـم حيـث يُضغـط الهـواء الموجـود في الشـقوق ثـم يتوسـع بسـرعة مـع تحريـر الضغـط.

وفي الوقت نفسه، يكون للرمل والحصى تأثير تآكل عند رميها على الصخور. يؤدي هذا إلى تقويض الجرف، وتتبع ذلك عمليات التجوية الطبيعية مثل الصقيع، مما يتسبب في مزيد من الدمار. تدريجيًا، تتطور منصة القطع الموجي عند سفح الجرف، وهذا له تأثير وقائي، مما يقلل من المزيد من تآكل الأمواج.

فالمواد التي يجري ارتدادها من أطراف الأرض تنتهي في النهاية في البحر. وهي هنا عرضة للاستنزاف حيث تتدفق التيارات الموازية للساحل لتنظف القنوات وتنقل الرمال والحصى بعيدًا عن مكانها الأصلي. تستقر الرواسب التي تنقلها الأنهار إلى البحر في قاع البحر مما يؤدي إلى تشكل دلتا في مصبات الأنهار.

وتتحرك جميع هذه المواد ذهابًا وإيابًا تحت تأثير الأمواج والمد والجزر والتيارات. يؤدي التجريف إلى إزالة المواد وتعميق القنوات ولكن قد يكون له تأثيرات غير متوقعة في أماكن أخرى على الساحل.

تبذل الحكومات جهودًا لمنع فيضانات الأرض من خلال بناء حواجز الأمواج والأسوار البحرية والسدود وغيرها من الدفاعات البحرية. على سبيل المثال، تم تصميم حاجز التايمز لحماية لندن من هبوب العواصف، في حين أدى فشل السدود حول نيو أورليانز أثناء إعصار كاترينا إلى خلق أزمة إنسانية كبيرة في الولايات المتحدة.

7. الموائـــــل البحريـــة

الموائل البحرية هي المواطن التي تدعم الحياة البحرية. تعتمد الحياة البحرية بشكل ما على المياه المالحة الموجودة في البحر. الموئل هو منطقة بيئية يسكنها نوع حي واحد أو أكثر. تدعم البيئة البحرية أنواعًا كثيرة من هذه الموائل.

يمكن تقسيم الموائل البحرية إلى موائل ساحلية وموائل محيطية مفتوحة. توجد الموائل الساحلية في المنطقة الممتدة من مسافة المد على الشاطئ إلى حافة الجرف القاري. وتوجد معظم الحياة البحرية في الموائل الساحلية، مع أن منطقة الجرف تشغل سبعة في المائة فقط من إجمالي مساحة المحيط. توجد موائل المحيطات المفتوحة في أعماق المحيطات خارج حافة الجرف القاري.

بدلًا من ذلك، يمكن تقسيم الموائل البحرية إلى مناطق سطحية وقاعية. توجد الموائل السطحية بالقرب من السطح أو في عمود الماء المفتوح، بعيدًا عن قاع المحيط. توجد الموائل القاعية بالقرب من قاع المحيط أو في قاعه.

ويقال إن الكائن الحي الذي يعيش في موطن أعالي البحار هو كائن أعالي البحار، كما هو الحال في الأسماك السطحية. وبالمثل، يقال إن الكائن الحي الذي يعيش في بيئة قاعية هو كائن قاعي، كما هو الحال في الأسماك القاعية. إن الموائل السطحية متغيرة بشكل جوهري وسريعة الزوال، اعتمادًا على ما تفعله تيارات المحيط.

يمكن تعديل الموائل البحرية من قبل سكانها. بعض الكائنات البحرية، مثل الشعاب المرجانية وعشب البحر وأشجار المانغروف والأعشاب البحرية، هي مهندسة النظام البيئي التي تعيد تشكيل البيئة البحرية إلى الحد الذي يخلقون فيه موطنًا إضافيًا للكائنات الحية الأخرى. من ناحية الحجم، يوفر المحيط معظم المساحة الصالحة للسكن على هذا الكوكب.

تشـــغل الشـعاب المرجانيـة، أو مـا يسـمى «الغابـات البحريـة المطيـرة»، أقـل مـن 0.1 في المائـة مـن سـطح محيطـات العالـم، ومـع ذلـك فـإن أنظمتهـا البيئيـة تضـم 25 في المائـة مـن جميـع الأنـواع البحريـة. أشـهرها هـي الشـعاب المرجانيـة الاسـتوائية مثل الحاجـز المرجاني العظيـم في أسـتراليا، لكـن شـعاب الميـاه البـاردة تـؤوي مجموعـة واسـعة مـن الأنـواع بمـا في ذلـك الشـعاب المرجانيـة (سـتة منهـا فقـط تسـاهم في تكويـن الشـعاب المرجانيـة).

توفر الشعاب المرجانية موائل بحرية للإسفنج الأنبوبي، والذي بدوره يصبح موائل بحرية للأسماك.

ثانيـًا: المحيطـــــات

المحيط (المعروف أيضًا باسم المحيط العالمي) عبارة عن مسطح من المياه المالحة يغطي نحو 70.8 % من الأرض ويحوي على 97 % من مياه الأرض. يشير مصطلح المحيط أيضًا إلى أي من المسطحات المائية الكبيرة التي ينقسم إليها محيط العالم تقليديًا.

تُستخدم أسماء مميزة لتحديد خمس مناطق مختلفة من المحيط: المحيط الهادئ (الأكبر)، والمحيط الأطلسي، والهندي، والقطب الجنوبي، والقطب الشمالي (الأصغر). تغطي مياه البحر نحو 361,000,000 كيلومتر مربع من الكوكب.

المحيط هو المكون الأساسي للغلاف المائي للأرض، ومن ثمّ فهو ضروري للحياة على الأرض. يؤثر المحيط على أنماط المناخ والطقس، ودورة الكربون، ودورة المياه من خلال العمل كخزان حراري ضخم.

قام علماء المحيطات بتقسيم المحيط إلى مناطق رأسية وأفقية بناءً على الظروف الفيزيائية والبيولوجية. منطقة السطح هي عمود الماء في المحيط المفتوح من السطح إلى قاع المحيط. وينقسم عمود الماء أيضًا إلى مناطق بناءً على العمق وكمية الضوء الموجود.

تبدأ المنطقة الضوئية عند السطح ويجري تعريفها على أنها «العمق الذي تكون فيه شدة الضوء 1 % فقط من القيمة السطحية» (نحو 200 متر في المحيط المفتوح). هذه هي المنطقة التي يمكن أن يحدث فيها التمثيل الضوئي. في هذه العملية تستخدم النباتات والطحالب المجهرية (العوالق النباتية العائمة) الضوء والماء وثاني أكسيد الكربون والمواد المغذية لإنتاج المواد العضوية.

ونتيجة لذلك، فإن المنطقة الضوئية هي الأكثر تنوعًا بيولوجيًا ومصدرًا للإمدادات الغذائية التي تدعم معظم النظام البيئي للمحيطات. وينتج التمثيل الضوئي للمحيطات أيضًا نصف الأكسجين الموجود في الغلاف الجوي للأرض.

لا يمكن للضوء أن يخترق سوى بضع مئات من الأمتار الإضافية؛ أما بقية المحيطات العميقة فهي باردة ومظلمة (وتسمى هذه المناطق مناطق البحار المتوسطة).

الجرف القاري هو المكان الذي يلتقي فيه المحيط باليابسة. وهي أكثر ضحالة، ويبلغ عمقها بضع مئات من الأمتار أو أقل. غالبًا ما يكون للنشاط البشري آثار سلبية على النظم البيئية داخل الجرف القاري.

تعتمد درجات حرارة المحيط على كمية الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح المحيط. وفي المناطق الاستوائية، يمكن أن ترتفع درجات حرارة السطح إلى أكثر من 30 درجة مئوية. بالقرب من القطبين حيث يتشكل الجليد البحري، تبلغ درجة الحرارة في حالة التوازن نحو - 2 درجة مئوية. تتراوح درجات حرارة أعماق المحيطات في جميع أنحاء المحيط بين - 2 درجة مئوية و5 درجات مئوية.

الدوران المستمر للمياه في المحيط يخلق تيارات المحيط. هذه التحركات الموجهة لمياه البحر ناتجة عن قوى تعمل على الماء، مثل التغيرات في درجات الحرارة، الدوران الجوي (الرياح)، وتأثير كوريوليس (أي الانحناء الظاهري للرياح العالمية، والتيارات البحرية وأي شيء يتحرك بحُرِّيّةٍ فوق سطح الأرض) وتغيرات الملوحة.

يخلق المد والجزر تيارات مد وجزر، بينما تسبب الرياح والأمواج تيارات سطحية. تيار الخليج، وتيار كوروشيو، وتيار أجولهاس والتيار القطبي الجنوبي، كلها تيارات محيطية رئيسية. تنقل التيارات كميات هائلة من الماء والحرارة حول العالم.

ومن خلال نقل هذه الملوثات من السطح إلى أعماق المحيطات، يؤثر هذا الدوران على المناخ العالمي وامتصاص وإعادة توزيع الملوثات مثل ثاني أكسيد الكربون.

تحوي مياه المحيط على تركيزات عالية من الغازات الذائبة، بما في ذلك الأكسجين وثاني أكسيد الكربون والنيتروجين. يحدث تبادل الغازات هذا على سطح المحيط وتعتمد قابلية ذوبانه على درجة حرارة الماء وملوحته.

ويرتفع تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بسبب احتراق الوقود الأحفوري، مما يسبب ارتفاع مستوياته في مياه المحيطات، مما يؤدي إلى تحمض المحيطات. توفر المحيطات خدمات بيئية بالغة الأهمية للبشرية، مثل تنظيم المناخ.

كما أنها توفر وسيلة للتجارة والنقل بالإضافة إلى إمكانية الحصول على الغذاء والموارد الأخرى. ومن المعروف أن المحيطات موطن لأكثر من 230 ألف نوع، ولكنها قد تحوي على أكثر من ذلك بكثير، ربما أكثر من مليوني نوع.

ومع ذلك، تواجه المحيطات العديد من التهديدات البيئية التي يسببها الإنسان، مثل التلوث البحري، والصيد الجائر، وتأثيرات تغير المناخ على المحيطات مثل ارتفاع درجة حرارة المحيطات، وتحمض المحيطات، وارتفاع مستوى سطح البحر. إن الجرف القاري والمياه الساحلية الأكثر تأثرًا بالنشاط البشري معرضة للخطر بشكل خاص.

1. تشكّل المحيط

أصل محيطات الأرض غير معروف. يُعتقد أن المحيطات قد تشكلت في عصر الهاديان. وتعمل تكتونيات الصفائح والانتعاش بعد العصر الجليدي وارتفاع مستوى سطح البحر على تغيير الخط الساحلي وبنية المحيط العالمي باستمرار. يوجد محيط عالمي بشكل أو بآخر على الأرض منذ دهور.

منذ تكوينه، اتخذ المحيط العديد من الظروف والأشكال مع العديد من تقسيمات المحيط السابقة ومن المحتمل في بعض الأحيان أن يغطي الكرة الأرضية بكاملها.

خلال الفترات المناخية الباردة، تتشكل المزيد من القمم الجليدية والأنهار الجليدية، ويتراكم ما يكفي من إمدادات المياه العالمية على شكل جليد لتقليل الكميات في أجزاء أخرى من دورة المياه. والعكس صحيح خلال الفترات الدافئة.

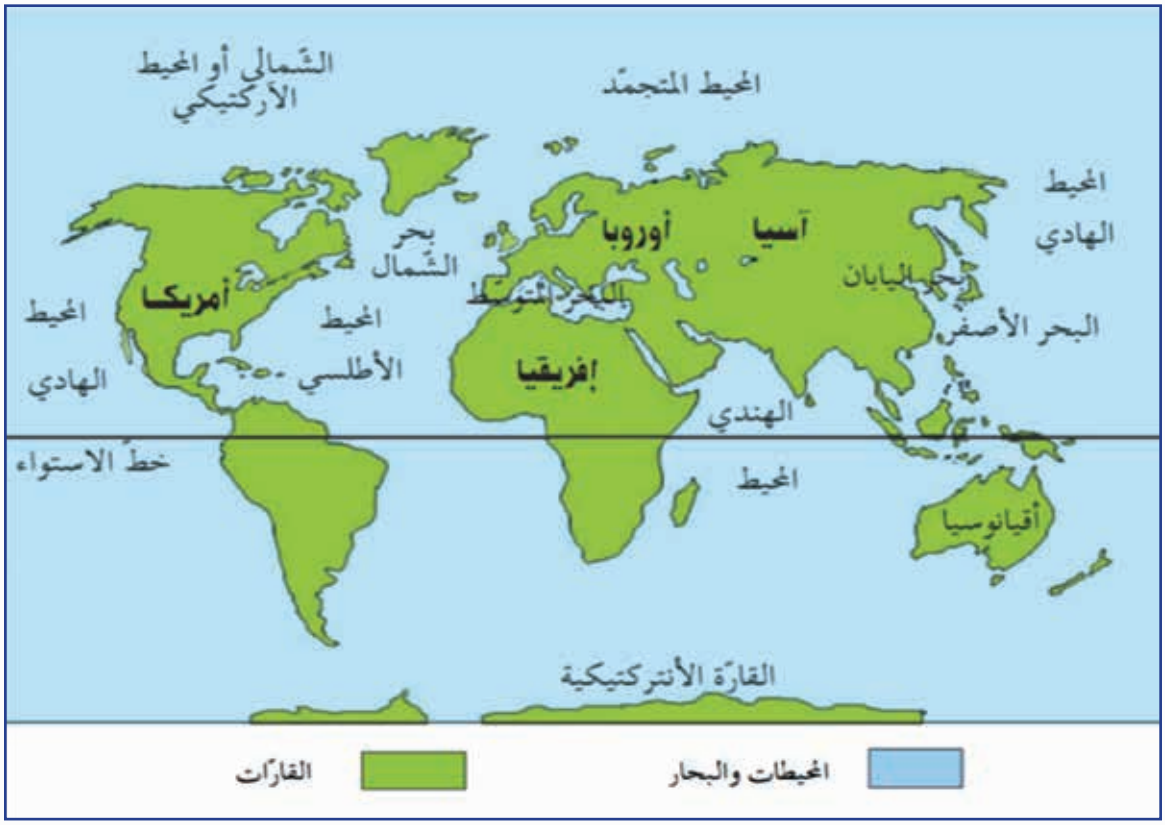
خلال العصر الجليدي الأخير، غطت الأنهار الجليدية ما يقرب من ثلث كتلة اليابسة على الأرض، وكانت النتيجة أن المحيطات كانت أقل بنحو 122 مترًا عما هي عليه اليوم.

خلال «موجة الدفء» العالمية الأخيرة، منذ نحو 125 ألف سنة، صارت مستويات سطح البحر أعلى بنحو 5.5 متر مما هي عليه حاليًا. منذ نحو ثلاثة ملايين سنة، كان من الممكن أن يصل ارتفاع المحيطات إلى 50 مترًا.

2. التـــــوزع الجغرافـــي للمحيطـــات

المحيـــط بكامله، الـــذي يحـــوي على 97 % مـن ميـــاه الأرض، يمتد على 70.8 % مـن سـطح الأرض، ممـا يجعلـه محيـط الأرض العالمـي أو محيـط العالـم. وهـذا يجعـل الأرض، إلـى جانـب غلافهـا المائـي النابـض بالحيـاة، «عالمًـا مائيًـا» أو «عالمًـا محيطيًـا»، خاصـة في تاريـخ الأرض المبكـر عندمـا كان يُعتقـد أن المحيـط قـد غطـى الأرض بالكامـل.

شـكل المحيـط غيـر منتظـم، ويسـيطر بشـكل غيـر متسـاوٍ علـى سـطح الأرض. ويـؤدي ذلـك إلـى تمايـز سـطح الأرض إلـى نصـف كـرة مائـي ويابسـي، كمـا يـؤدي إلـى تقسـيم المحيـط إلـى محيطـات مختلفـة.



خريطة العالم لنموذج البحـار والمحيطـات والقـارات.

تغطي مياه البحر نحو 361000000 كيلومتر مربع وأبعد قطب في المحيط لا يمكن الوصول إليه، والمعروف باسم «نقطة نيمو»، في منطقة تعرف باسم مقبرة المركبات الفضائية في جنوب المحيط الهادئ، عند 48 ° 52.6 ′ جنوبًا و 123 ° 23.6 ′ غربًا. وتبعد هذه النقطة عن أقرب أرض بنحو 2688 كيلومترًا.

هناك عادات مختلفة لتقسيم المحيط وتؤجلها مسطحات مائية أصغر مثل البحار والخلجان والجَونات (الخلجان الصغيرة) والمنعطفات الشاطئية والمضائق.

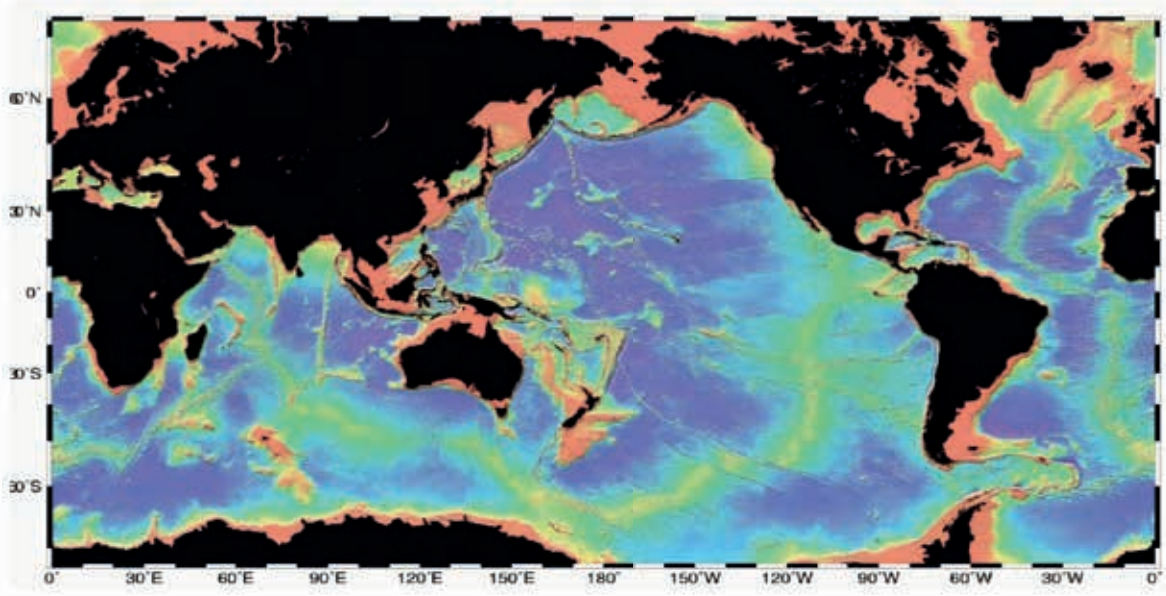
ينقسم المحيط عادة إلى خمسة محيطات رئيسية - مدرجة أدناه بترتيب تنازلي من ناحية المساحة والحجم:

1. **المحيط الهادئ**: بين آسيا وأستراليا والأمريكيتين.
2. **المحيط الأطلسي**: بين الأمريكيتين وأوروبا وأفريقيا.
3. **المحيط الهندي**: بين جنوب آسيا وأفريقيا وأستراليا.
4. **القارة القطبية الجنوبية/المحيط الجنوبي**: بين القارة القطبية الجنوبية والمحيط الهادئ والمحيط الأطلسي والهندي. تعتبر في بعض الأحيان امتدادا لتلك المحيطات الثلاثة.
5. **المحيط المتجمد الشمالي**: بين شمال أمريكا الشمالية وأوراسيا في القطب الشمالي. يعتبر في بعض الأحيان أحد البحار الهامشية للمحيط الأطلسي.

3. أحـــواض المحيطـــــات

يملأ المحيط الأحواض المحيطية للأرض. تغطي الأحواض المحيطية للأرض مقاطعات جيولوجية مختلفة من القشرة المحيطية للأرض وكذلك القشرة القارية. وعلى هذا النحو، فهو يغطي بشكل أساسي الأحواض الهيكلية للأرض، ولكنه يغطي أيضًا الجرف القاري.

يحوي كل حوض محيطي على سلسلة من التلال في منتصف المحيط، مما يخلق سلسلة جبال طويلة تحت المحيط. وتشكل معًا نظام التلال العالمي وسط المحيط الذي يضم أطول سلسلة جبال في العالم.



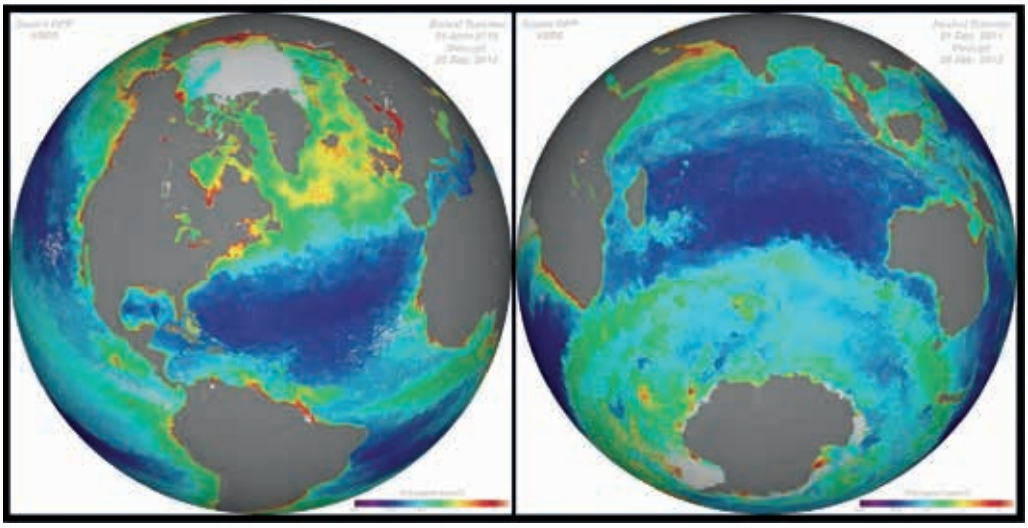
قياس الأعماق لقاع المحيط يُظهر الرفوف القارية والهضاب المحيطية (الحمراء)، وحواف وسط المحيط (الأصفر والأخضر) والسهول السحيقة (الأزرق إلى الأرجواني).

يبلغ طول أطول سلسلة جبال متواصلة 65000 كم. هذه السلسلة الجبلية تحت الماء أطول بعدة مرات من أطول سلسلة جبال قارية، أي جبال الأنديز. يقول علماء المحيطات أنه رُسم خرائط لأقل من 20 % من المحيطات.

4. لـــون المحيـــط

لون المحيط هو فرع من بصريات المحيطات الذي يدرس على وجه التحديد لون الماء والمعلومات التي يمكن الحصول عليها من النظر إلى الاختلافات في اللون.

لون المحيط، على الرغم من كونه أزرق بشكل أساسي، إلا أنه يختلف في الواقع من الأزرق إلى الأخضر أو حتى الأصفر أو البني أو الأحمر في بعض الحالات. تطور هذا المجال من الدراسة جنبًا إلى جنب مع استشعار المياه عن بعد، لذلك فهو يركز بشكل أساسي على كيفية قياس اللون بواسطة الأدوات (مثل أجهزة الاستشعار الموجودة على الأقمار الصناعية والطائرات).



يعد تركيز الكلوروفيل في المحيط بمثابة مؤشر عن الكتلة الحيوية للعوالق النباتية. في هذه الخريطة، تمثل الألوان الزرقاء نسبة الكلوروفيل الأقل ويمثل اللون الأحمر نسبة الكلوروفيل الأعلى. يجري تقدير الكلوروفيل الذي نقيسه عبر الأقمار الصناعية بناءً على لون المحيط من خلال مدى خضرة لون الماء الذي يظهر من الفضاء.

معظم المحيطات زرقاء اللون، ولكن في بعض الأماكن يكون لون المحيط أزرق مخضرًا، أو أخضر، أو حتى أصفر إلى بني. لون المحيط الأزرق هو نتيجة لعدة عوامل:

أولًا: يمتص الماء الضوء الأحمر بشكل تفضيلي، مما يعني أن الضوء الأزرق يبقى وينعكس مرة أخرى خارج الماء. يتم امتصاص الضوء الأحمر بسهولة ومن ثمّ لا يصل إلى أعماق كبيرة، عادة إلى أقل من 50 مترًا. وبالمقارنة، يمكن للضوء الأزرق أن يخترق مسافة تصل إلى 200 متر.

ثانيًا: تعمل جزيئات الماء والجزيئات الصغيرة جدًا في مياه المحيط على تشتيت الضوء الأزرق بشكل تفضيلي أكثر من ضوء الألوان الأخرى. يحدث تشتت الضوء الأزرق بواسطة الماء والجسيمات الصغيرة حتى في أنقى مياه المحيطات، وهو يشبه تشتت الضوء الأزرق في السماء.

تشمل المواد الرئيسية التي تؤثر على لون المحيط المواد العضوية الذائبة، والعوالق النباتية الحية مع أصباغ الكلوروفيل، والجزيئات غير الحية مثل الثلج البحري والرواسب المعدنية.

يمكن قياس الكلوروفيل من خلال عمليات الرصد عبر الأقمار الصناعية ويعمل كبديل لإنتاجية المحيطات (الإنتاجية البحرية الأولية) في المياه السطحية. في صور الأقمار الصناعية المركبة طويلة المدى، تظهر المناطق ذات الإنتاجية العالية للمحيطات باللونين الأصفر والأخضر لأنها تحوي على المزيد من العوالق النباتية (الخضراء)، في حين تظهر المناطق ذات الإنتاجية المنخفضة باللون الأزرق.

يعتمد لون المحيط على كيفية تفاعل الضوء مع المواد الموجودة في الماء. عندما يدخل الضوء إلى الماء، يمكن إما أن يجري امتصاصه (يستنفد الضوء،

ويصبح الماء «أغمق»)، أو ينتشر (يرتد الضوء في اتجاهات مختلفة، ويبقى الماء «ساطعًا»)، أو يكون مزيجًا من الاثنين معًا. إن مدى اختلاف الامتصاص والتشتت تحت الماء طيفي، أو عبر طيف الطاقة الضوئية المرئية إلى الأشعة تحت الحمراء (نحو 400 نانومتر إلى 2000 نانومتر) يحدد «اللون» الذي سيظهره الماء للمستشعر.

5. تيارات المحيط

تيار المحيط هو حركة مستمرة وموجهة لمياه البحر تتولد عن عدد من القوى المؤثرة على الماء، بما في ذلك الرياح، وتأثير كوريوليس، والأمواج المتكسرة، والكابلات، واختلافات درجات الحرارة والملوحة.

تؤثر خطوط العمق وتكوينات الخط الساحلي والتفاعلات مع التيارات الأخرى على اتجاه التيار وقوته.

التيارات البحرية الدافئة والباردة للمحيطات.

تيارات المحيط هي في المقام الأول حركات مائية أفقية. ويتدفق تيار المحيط لمسافات كبيرة ويشكلان معًا الحزام الناقل العالمي، الذي يؤدي دورًا مهيمنًا في تحديد مناخ العديد من مناطق الأرض.

وبشكل أكثر تحديدًا، تؤثر تيارات المحيط على درجة حرارة المناطق التي تنتقل عبرها. على سبيل المثال، تؤدي التيارات الدافئة التي تنتقل على طول السواحل الأكثر اعتدالًا إلى زيادة درجة حرارة المنطقة عن طريق تسخين نسائم البحر التي تهب فوقها.

ولعل المثال الأكثر وضوحًا هو تيار الخليج الذي، إلى جانب امتداده لأمريكا الشمالية، يجعل شمال غرب أوروبا أكثر اعتدالا بكثير بالنسبة لخطوط العرض العليا من المناطق الأخرى الواقعة على خط العرض نفسه.

مثال آخر هو تيار ليما، في البيرو، التي يتناقض مناخها شبه الاستوائي الأكثر برودة مع مناخ خطوط العرض الاستوائية المحيطة بها بسبب تيار هومبولت. التيارات المحيطية هي أنماط من حركة المياه التي تؤثر على المناطق المناخية وأنماط الطقس في جميع أنحاء العالم.

وهي مدفوعة في المقام الأول بالرياح وكثافة مياه البحر، مع أن العديد من العوامل الأخرى - بما في ذلك شكل وتكوين حوض المحيط الذي تتدفق عبره - تؤثر عليها. يساعد النوعان الأساسيان من التيارات – تيارات المياه السطحية والعميقة – في تحديد طبيعة وتدفق مياه المحيطات عبر الكوكب.

تعتبر التيارات المحيطية مهمة في دراسة الحطام البحري، والعكس صحيح. تؤثر هذه التيارات أيضًا على درجات الحرارة في جميع أنحاء العالم. على سبيل المثال، فإن تيار المحيط الذي يجلب المياه الدافئة من شمال المحيط الأطلسي إلى شمال غرب أوروبا يمنع أيضًا بشكل تراكمي وببطء تكوين الجليد

على طول شواطئ البحار، مما قد يمنع السفن أيضًا من الدخول والخروج من الممرات المائية الداخلية والموانئ البحرية، ومن ثمّ تلعب تيارات المحيط دورًا حاسمًا في التأثير على مناخ المناطق التي تتدفق من خلالها.

تجلب تيارات مياه المحيط الباردة المتدفقة من المناطق القطبية وشبه القطبية الكثير من العوالق التي تعتبر ضرورية لاستمرار بقاء العديد من أنواع الكائنات البحرية الرئيسية في النظم البيئية البحرية. وبما أن العوالق هي غذاء الأسماك، فغالبًا ما تعيش أعداد كبيرة من الأسماك حيث تسود هذه التيارات.

كما تعتبر معرفة التيارات المحيطية السطحية أمرًا ضروريًا لتقليل تكاليف الشحن، حيث أن السفر معها يقلل من تكاليف الوقود. وفي عصر السفن الشراعية التي تعمل بالرياح، كانت معرفة أنماط الرياح وتيارات المحيطات أكثر أهمية.

وخير مثال على ذلك هو تيار أجولهاس (على طول شرق أفريقيا)، والذي منع البحارة لفترة طويلة من الوصول إلى الهند. في الآونة الأخيرة، يستفيد المتنافسون في مجال الإبحار حول العالم من التيارات السطحية لبناء السرعة والحفاظ عليها. يمكن أيضًا استخدام تيارات المحيط لتوليد الطاقة البحرية، مع اعتبار مناطق اليابان وفلوريدا وهاواي بمثابة مشاريع اختبارية.

6. المناطـــق المحيطيـــة

يصنف علماء المحيطات المحيط إلى مناطق رأسية وأفقية بناءً على الظروف الفيزيائية والبيولوجية. تتكون منطقة السطح من عمود الماء في المحيط المفتوح، ويمكن تقسيمها إلى مناطق أخرى مصنفة حسب وفرة الضوء والعمق والمسافة.

أ. حسب اختراق الضوء

يمكن تجميع مناطق المحيطات عن طريق اختراق الضوء (من الأعلى إلى الأسفل): المنطقة الضوئية، ومنطقة البحار المتوسطة، ومنطقة المحيط العميق المظلمة:

- يتم تعريف المنطقة الضوئية بأنها «العمق الذي تكون فيه شدة الضوء 1 % فقط من قيمة السطح». ويصل هذا عادة إلى عمق نحو 200 متر في المحيط المفتوح. إنها المنطقة التي يمكن أن يحدث فيها التمثيل الضوئي، ومن ثمّ فهي الأكثر تنوعًا بيولوجيًا. يسمح التمثيل الضوئي الذي تقوم به النباتات والطحالب المجهرية (العوالق النباتية العائمة) بتكوين مواد عضوية من سلائف كيميائية بما في ذلك الماء وثاني أكسيد الكربون. يمكن بعد ذلك استهلاك هذه المادة العضوية بواسطة كائنات أخرى. يجري استهلاك الكثير من المواد العضوية التي تنشأ في المنطقة الضوئية هناك، لكن بعضها يغوص في المياه العميقة. يُعرف الجزء العلوي من المنطقة الضوئية باسم الجزء السطحي. إن البصريات الفعلية للضوء الذي ينعكس ويخترق سطح المحيط معقدة.
- أسفل المنطقة الضوئية توجد منطقة البحار المتوسطة أو منطقة الشفق حيث توجد كمية صغيرة جدًا من الضوء. المفهوم الأساسي هو أنه مع هذا الضوء القليل من التمثيل الضوئي من غير المرجح أن يحقق أي نمو صافٍ على التنفس.

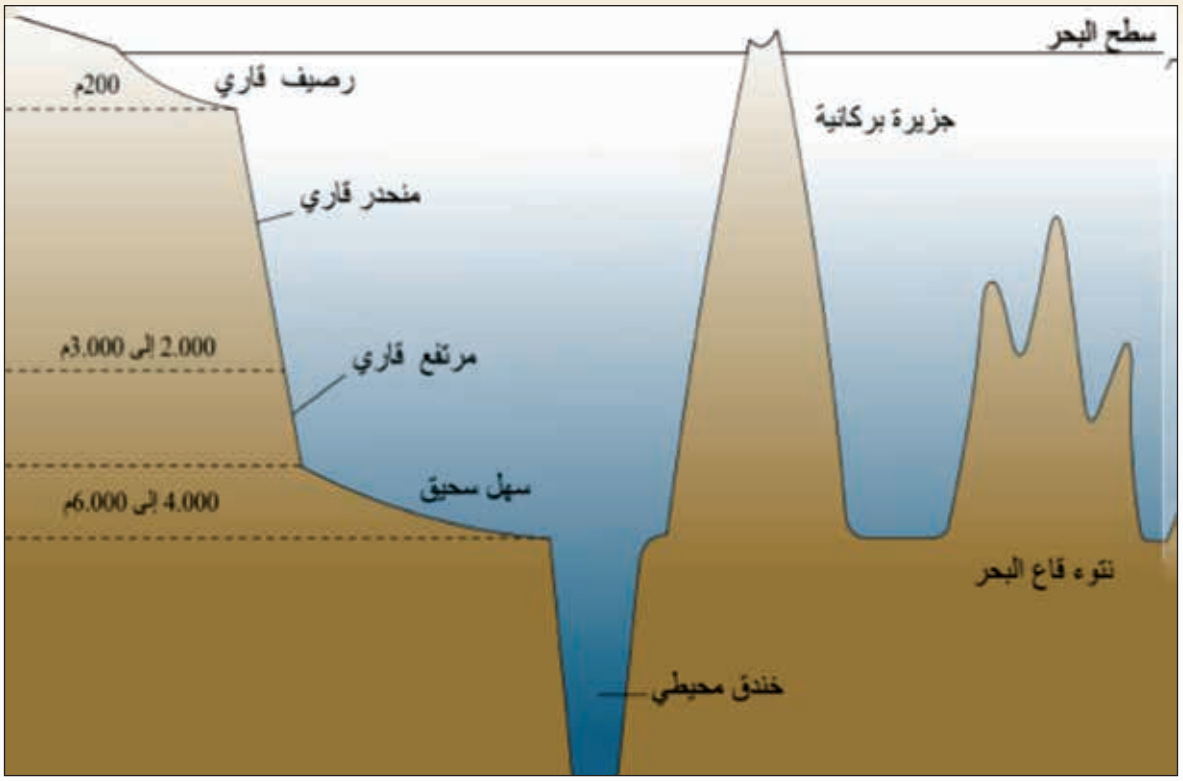
- يوجد أدناه المحيط العميق المظلم الذي لا يخترقه ضوء الشمس السطحي على الإطلاق. الحياة التي توجد على عمق أكبر من المنطقة الضوئية يجب أن تعتمد إما على المواد المغمورة من الأعلى أو العثور على مصدر آخر للطاقة. تعتبر الفتحات الحرارية المائية مصدرًا للطاقة فيما يعرف بالمنطقة الضوئية (أعماق تزيد عن 200 متر).

ب. حسب العمق ودرجة الحرارة

يمكن تقسيم الجزء السطحي من المنطقة اللاضوئية إلى مناطق رأسية وفقًا للعمق ودرجة الحرارة:

- منطقة البحار المتوسطة هي المنطقة العليا. تقع حدودها الدنيا عند خط حراري يبلغ 12 درجة مئوية والذي يقع عمومًا على ارتفاع 700–1000 متر في المناطق الاستوائية. التالي هو منطقة الأعماق التي تقع بين 10 و4 درجات مئوية، وعادةً ما بين 700–1000 متر و 2000–4000 متر. يقع على طول الجزء العلوي من السهل العميق السحيق، الذي تقع حدوده السفلية على ارتفاع نحو 6000 متر. المنطقة الأخيرة والأعمق هي منطقة هادالبيلاج والتي تشمل الخندق المحيطي وتقع على عمق 6000–11000 متر.

- المناطق القاعية غير الضوئية وتتوافق مع أعمق ثلاث مناطق في أعماق البحار. وتغطي منطقة الأعماق المنحدر القاري وصولًا إلى نحو 4000 متر. تغطي المنطقة السحيقة السهول السحيقة التي يتراوح ارتفاعها بين 4000 و6000 متر. وأخيرًا، منطقة الهدال التي تتوافق مع منطقة الهدال السطحية، والتي توجد في الخنادق المحيطية.



رسم تخطيطي يوضح تقسيم أعماق المحيطات.

يمكن رسم الحدود المميزة بين المياه السطحية للمحيطات والمياه العميقة بناءً على خصائص المياه. وتسمى هذه الحدود الخطوط الحرارية (درجة الحرارة)، والهالوكلينات (الملوحة)، والخطوط الكيميائية (الكيمياء)، والبيكنوكلينات (الكثافة). إذا تعرضت منطقة ما لتغيرات جذرية في درجة الحرارة مع العمق، فإنها تحوي على خط حراري، وهو حد مميز بين المياه السطحية الأكثر دفئًا والمياه العميقة الباردة.

في المناطق الاستوائية، يكون الخط الحراري عادة أعمق مقارنة بخطوط العرض الأعلى. على عكس المياه القطبية، حيث تكون مدخلات الطاقة الشمسية محدودة، يكون التقسيم الطبقي لدرجات الحرارة أقل وضوحًا، وغالبًا ما يكون

الخط الحراري المميز غائبًا. ويرجع ذلك إلى حقيقة أن المياه السطحية في خطوط العرض القطبية تكون باردة تقريبًا مثل المياه العميقة.

تحت الخط الحراري، تكون المياه في كل مكان في المحيط باردة جدًا، وتتراوح من – 1 درجة مئوية إلى 3 درجات مئوية. ولأن هذه الطبقة العميقة والباردة تحوي على الجزء الأكبر من مياه المحيط، فإن متوسط درجة حرارة محيطات العالم يبلغ 3.9 درجة مئوية. إذا تعرضت منطقة ما لتغيرات جذرية في الملوحة مع العمق، فإنها تحوي على خط الهالوكلين.

إذا كانت المنطقة تخضع لتدرج كيميائي عمودي قوي مع العمق، فإنها تحوي على خط كيميائي. تتحكم درجة الحرارة والملوحة في كثافة مياه المحيط. تعتبر المياه الباردة والمالحة أكثر كثافة، وتؤدي هذه الكثافة دورًا حاسمًا في تنظيم الدورة المائية العالمية داخل المحيط.

غالبًا ما يتزامن الهالوكلين مع الخط الحراري، وينتج عن هذا المزيج خط بيكنوكليني واضح، وهو الحد بين المياه السطحية الأقل كثافة والمياه العميقة الكثيفة.

ج. حسب المسافة من الأرض

يمكن تقسيم المنطقة السطحية إلى منطقتين فرعيتين بناءً على المسافة من الأرض: المنطقة النيريتية والمنطقة المحيطية. تغطي المنطقة النيريتية المياه مباشرة فوق الجرف القاري، بما في ذلك المياه الساحلية. ومن ناحية أخرى، تشمل المنطقة المحيطية جميع المياه المفتوحة بالكامل.

تغطي المنطقة الساحلية المنطقة الواقعة بين المد والجزر المنخفضة والمرتفعة وتمثل المنطقة الانتقالية بين الظروف البحرية والبرية. وتعرف أيضًا باسم منطقة المد والجزر لأنها المنطقة التي يؤثر فيها مستوى المد والجزر على ظروف المنطقة.

د. أحجـام المحيطـات

يبلغ إجمالي حجم المياه في جميع المحيطات نحو 1.335 بليون كيلومتر مكعب (1.335 سيكستيليون لتر، 320.3 مليون ميل مكعب). وتشير التقديرات إلى وجود 1.386 بليون كيلومتر مكعب من الماء على الأرض.

يشمل ذلك المياه في أشكالها الغازية والسائلة والمتجمدة مثل رطوبة التربة والمياه الجوفية والتربة الصقيعية في القشرة الأرضية (على عمق 2 كم)؛ المحيطات والبحار، والبحيرات، والأنهار والجداول، والأراضي الرطبة، والأنهار الجليدية، والغطاء الجليدي والثلجي على سطح الأرض؛ البخار والقطرات والبلورات في الهواء؛ وجزء من النباتات والحيوانات والكائنات وحيدة الخلية في المحيط الحيوي.

وتمثل المياه المالحة 97.5 % من هذه الكمية، في حين تمثل المياه العذبة 2.5 % فقط. ومن هذه المياه العذبة:

- 68.9 % على شكل جليد وغطاء ثلجي دائم في القطب الشمالي والقطب الجنوبي والأنهار الجليدية الجبلية.
- 30.8 % منها على شكل مياه جوفية عذبة.
- 0.3 % فقط من المياه العذبة على الأرض في بحيرات وخزانات وأنظمة أنهار يمكن الوصول إليها بسهولة.

تبلغ الكتلة الإجمالية للغلاف المائي للأرض نحو 1.4×10^{18} طنًا، أي نحو 0.023 % من إجمالي كتلة الأرض. وفي أي وقت من الأوقات، يوجد نحو 2×10^{13} طنًا من هذا على شكل بخار ماء في الغلاف الجوي للأرض (لأغراض عملية، يزن متر مكعب واحد من الماء طنًا واحدًا).

نحو 71 % من سطح الأرض، أي نحو 361 مليون كيلومتر مربع، تغطيه المحيطات. يبلغ متوسط ملوحة محيطات الأرض نحو 35 غرامًا من الملح لكل كيلوجرام من ماء البحر (3.5 %).

هـ. درجة حرارة المحيطات

تعتمد درجات حرارة المحيطات على كمية الإشعاع الشمسي الساقط على سطحه. في المناطق الاستوائية، عندما تكون الشمس في السماء تقريبًا، يمكن أن ترتفع درجة حرارة الطبقات السطحية إلى أكثر من 30 درجة مئوية، بينما تبلغ درجة الحرارة المتوازنة مع الجليد البحري بالقرب من القطبين نحو – 2 درجة مئوية.

هناك دوران مستمر للمياه في المحيطات. وتبرد التيارات السطحية الدافئة عندما تبتعد عن المناطق الاستوائية، ويصبح الماء أكثر كثافة ويغوص.

يتحرك الماء البارد نحو خط الاستواء كتيار بحري عميق، مدفوعًا بالتغيرات في درجة حرارة الماء وكثافته، قبل أن يتدفق في النهاية مرة أخرى نحو السطح. تتراوح درجة حرارة مياه المحيطات العميقة بين - 2 درجة مئوية و5 درجات مئوية في جميع أنحاء العالم.

يرتبط التدرج في درجة الحرارة فوق عمق الماء بالطريقة التي تمتزج بها المياه السطحية مع المياه العميقة أو لا تمتزج (يسمى نقص الخلط بطبقية المحيط). يعتمد ذلك على درجة الحرارة: في المناطق الاستوائية، تكون الطبقة السطحية الدافئة التي يبلغ ارتفاعها نحو 100 متر مستقرة تمامًا ولا تختلط كثيرًا بالمياه العميقة، بينما يجعل الشتاء والعواصف الباردة بالقرب من القطبين الطبقة السطحية أكثر كثافة وتختلط بعمق كبير ثم يطبق مرة أخرى في الصيف.

يبلـغ العمـق الضوئـي عـادةً نحـو 100 متـر (لكنـه يختلـف) ويرتبـط بهـذه الطبقـة السـطحية السـاخنة.

ومـن الواضـح أن ارتفـاع درجـة حـرارة المحيطـات نتيجـة لتغيـر المنـاخ، وأن معـدل الاحتـرار هـذا آخـذ في الازديـاد. كان المحيـط العالمـي هـو الأكثـر دفئًـا علـى الإطـلاق الـذي سـجله البشـر في عـام 2022. ويجـري تحديـد ذلك من خـلال المحتوى الحـراري للمحيطـات، والـذي تجـاوز في عـام 2022 الحـد الأقصـى السـابق لعـام 2021.

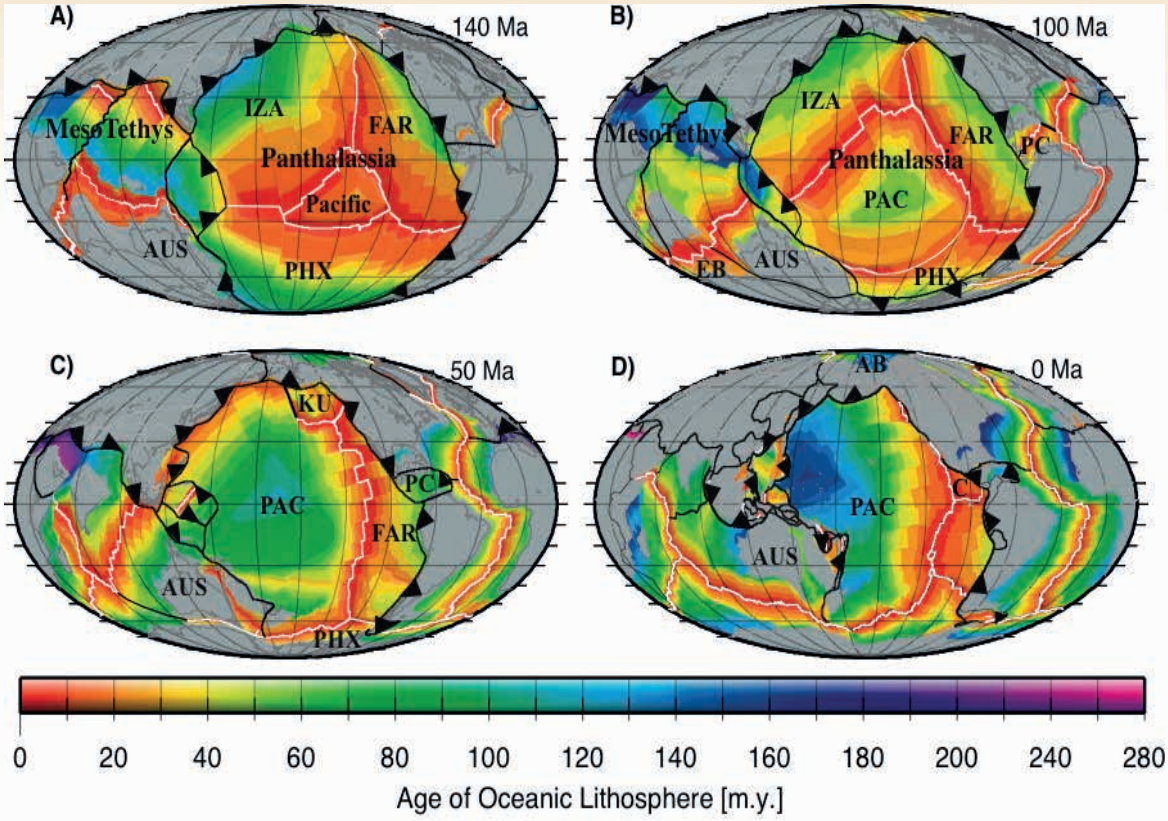
ويعـد الارتفـاع المطـرد في درجـات حـرارة المحيطـات نتيجـة حتميـة لاختـلال توازن الطاقـة علـى الأرض، والـذي يحـدث في المقـام الأول بسـبب ارتفـاع مسـتويات الغـازات الدفيئـة. بـين عصـور مـا قبـل الصناعـة والعقـد 2011-2020، ارتفعـت حـرارة سـطح المحيـط بـين 0.68 و1.01 درجـة مئويـة.

عمـــــر المحيطـات

عنـد الحديـث عـن عمـر الأرض، يمكـن التعـرف علـى ثلاثـة معـانٍ مختلفـة – تكويـن الكوكـب بالمعنـى الفلكـي، وعمـر أول قشـرة متكونـة بعـد التبريـد مـن كـرة سـاخنة (عمـر كلفـن المحسـوب)، وعمـر المحيطـات. يبـدو أن عالـم الفلـك إدمونـد هالـي E. Halley (تـوفي 1742) هـو أول مـن اقتـرح عـام 1715م إمكانيـة تقديـر عمـر المحيـط مـن ملوحتـه ومعـدل دخـول الملـح إلـى المحيـط عـن طريـق الأنهـار.

استخدمت حجـة هالـي تشـبيهاً علـى أسـاس البحيـرات التـي بهـا أنهـار تدخـل البحيـرة ولكنهـا لا تخـرج منهـا، مثـل البحيـرات ذات الصـرف الداخلـي، علـى سـبيل المثـال بحـر قزويـن والبحـر الميـت. يجـب أن تـزداد ملوحـة هـذه البحيـرات بمـرور الوقـت بسـبب المدخـلات مـن الملـح المـذاب للأنهـار وكذلـك بسـبب تبخـر الميـاه. إذا جـرى أخـذ عينـات مـن ميـاه البحيـرة علـى بُعْـد عـدة مئـات مـن السـنين، فيجـب ملاحظـة زيـادة الملوحـة وتقديـرات «قاعـدة التناسـب»، وإجمالـي الوقـت المطلـوب «للحصـول علـى درجـة الملوحـة الحاليـة».

صـرح هالـي أنـه يمكـن حسـاب عمـر المحيطـات بالمثـل: «كان مـن المفتـرض أن يكـون الإغريـق واللاتـين القُدامـى قـد أفادونـا بدرجـة ملوحـة البحـر كمـا كانـت قبـل 2000 عـام». أدرك هالـي أن اقتراحـه كان مجـرد افتـراض، وحثّ علـى جمـع البيانـات ذات الصلـة عـن المحيطـات وملوحـة البحيـرة. كمـا أدرك أيضـاً أنـه إذا كانـت المحيطـات مالحـة في البدايـة، فـإن تقديـر العمـر سـيكون قيمـة قصـوى وأن هـذا «مـن شـأنه أن يدحـض الفكـرة القديمـة التـي اعتبرهـا البعـض مؤخـراً، وهـي أبديـة كل الأشـياء». واختتـم بحثـه في عـام 1715 بمـا يأتـي: «قـد يكـون العالـم أقـدم بكثيـر ممـا كان يتخيلـه الكثيـرون حتـى الوقـت الحالـي» (O'Hara, 2018).



العمر وقياس الأعماق لقشرة المحيطات في العالم خلال الـ 140 مليون سنة الماضية

لكن طريقة هالي يكتنفها الكثير من الخلط وعدم الدقة إذا أردنا تقييمها حالياً، فمثلاً، نحن لا نعلم إن كان معدل الملح يبقى ثابتاً لفترة طويلة من الزمن، ناهيك عن أنّه لم يقدم أي دليلٍ علمي ملموس يقودنا إلى تقدير معقولٍ لعمر الأرض، وقد ميز هالـــي بين عمر الأرض وزمن ظهور الإنسان على الأرض (رونن، 1990م).

يبدو أن اقتراح هالي قد جرى نسيانه حتى عام 1876م، عندما استخدم توماس ميلرد ريد T.M. Reade (توفي 1909م) تركيزات الكلوريد والكبريتات من الكالسيوم والمغنيسيوم في المحيطات ومدخلات هذه المركبات من الأنهار. وصف طريقته بأنها «تعرية كيميائية». تراوحت نتائجه من 25 إلى 200 مليون

سنة. نظراً لأن الحجر الجيري والدولوميت والكبريتات تترسب من المحيطات (وبالتالي إعادة ضبط ساعة الملوحة)، لم يعتقد البعض أن هذه التقديرات صحيحة، بما في ذلك الجيولوجي الأيرلندي جون جولي J. Joly (توفي 1933م).

وقد أظهر جولي في كتابه (النشاط الإشعاعي والجيولوجيا) (1909م) أنه كان من رُوَّاد كل من الجيولوجيا وظاهرة النشاط الإشعاعي المكتشفة مؤخراً. اشتهر بتقدير عمره للمحيطات بناءً على محتواها من الصوديوم، الذي نُشر عام 1899م.

كانت طريقة جولي مشابهة لطريقة ريد، لكنه ركز بدلاً من ذلك على تقدير الكمية الإجمالية لعنصر الصوديوم في المحيطات مقسومة على كمية الصوديوم في المحلول التي تساهم سنوياً في المحيطات بواسطة أنهار العالم، باستخدام هذه الصيغة:

عمر المحيطات = إجمالي الصوديوم في المحيطات (بالأطنان) / تدفق الصوديوم من الأنهار (أطنان/ سنة)

لقد حدد العمر التقديري للمحيطات من 80 مليون إلى 90 مليون سنة، لكنه سمح بحد أقصى للعمر بهذه الطريقة 150 مليون سنة في ورقته اللاحقة عام 1923. وبحلول هذا الوقت كان يدرك أن الأعمار الكيميائية (Pb / U) تنتج أعماراً متشابهة وأكبر. تماشياً مع عقيدة الوتيرة الواحدة، افترض جولي معدل انحلال كيميائي موحد من الأنهار من سطح الأرض، وافترض أيضاً مساحة أرض ثابتة وهطول الأمطار «ضمن حدود واسعة»، ولكن بمتوسط ثابت طويل الأجل على مدار الزمن الجيولوجي. اختار عنصر الصوديوم باعتباره المتتبع الوحيد بسبب قابلية ذوبانه العالية على عكس الكبريتات وكربونات العناصر، مثل الكالسيوم والمغنيسيوم، والتي ترسبت من المحلول كترسبات رسوبية بحرية.

لإدخال القيم في المعادلة البسيطة أعلاه، كانت هناك حاجة إلى قدر كبير من المعلومات، واعتمد جولي بشكل كبير على التقارير الواردة من بعثة HMS Challenger Oceanic (1878-1872)، التي قدمت الملوحة والكيمياء لعينات المياه التي جرى جمعها. قدم السير جون موراي S. J. Murray (توفي 1914م)، الذي أبحر على متن السفينة تشالنجر ونظم لاحقاً نشر النتائج، معلومات عن أنهار العالم. تضمنت الكميات اللازمة لإكمال المعادلة حجم وكتلة المحيط، وملوحته، والكتلة الكلية للصوديوم في المحيط، وكتلة الصوديوم التي تساهم بها أنهار العالم، وكذلك التصريف السنوي للنهر. نتج عن النتائج الأولية عمر 90 مليون سنة للأرض باستخدام الأرقام التالية:

$$\frac{14,151\times10^{12}}{15,727\times10^{4}} = 90 \times 10^{6} \quad \text{سنة}$$

جرت مناقشة عدد كبير من المتغيرات التي يمكن أن تقدم أخطاء إيجابية وسلبية في هذا التقدير بإسهاب من قِبل جولي، بما في ذلك تقدير تخميني جداً للملوحة الأولية للمحيطات، وكمية الصوديوم المتضمنة في تبخّر مياه المحيطات، وتآكل السواحل. المساهمة، وتغيير الجغرافيا القديمة، وأنواع الصخور المختلفة المكشوفة، والمتبخرات الملحية المترسبة، والعديد من المتغيرات الأخرى. كان تقييم هذه المتغيرات مقيداً بشكل سيئ، لكن تقدير جولي النهائي لم يختلف اختلافاً جوهرياً عن ذلك أعلاه. اليوم، يدرك علماء المحيطات أن جولي كانت في الواقع تحسب وقت إقامة الصوديوم في المحيطات، التي تقدر بنحو 68 مليون سنة (O'Hara, 2018).

الفصل الثامن

سـطح الأرض

مُقَدِّمَة

الأرض عبارة عن كرة ضخمة يتكون سطحها من صخور وتربة وماء. تتكون الأرض من عدة عناصر منها الحديد حيث تشكل أعلى نسبة وهي 32.1 % من كتلة الأرض، و يعتبر الحديد المكون الأساسي للب الأرض بنسبة 88.8 %، وتتكون الأرض أيضاً من الأكسجين بنسبة 30.1 %، ومن الكبريت بنسبة 2.9 %، ومن الألومنيوم بنسبة 1.4 % ومن الكالسيوم بنسبة 1.5 %، ومن عنصر السيليكون حيث تشكل نسبته 15.1%، ومن المغنيسيوم بنسبة 13.9 %، وتكون العناصر الأثقل حجماً أقربها موقعاً لمركز الأرض، بينما تبعد العناصر الأقل حجماً عن مركز الأرض، ويشكل الأكسجين أكثر من 47 % من مكونات القشرة الأرضية.

الأرض أحد الكواكب السيارة التسعة التي تسير حول الشمس عبر الفضاء وعلى طول مسارات تسمى المدارات. وتقع في المدار الثالث من المجموعة الشمسية. أما الشمس فهي نجم واحد من ملايين النجوم التي تشكل مجرة تسمى «درب اللبانة». وللأرض ثلاث حركات دورانية: حركة سريعة حول محورها، حركة حول الشمس، وحركة عبر درب التبانة مع بقية النظام الشمسي كل 250 مليون سنة .

ليس من السهل أن تحكم على كروية الأرض أو تسطّحها وأنت تعيش على مساحاتٍ هائلةٍ مستويةٍ من التضاريس والأفق، دون مراقبة بعض الظواهر الطبيعية والاستدلال بها، أو دون أنْ تتوفر لديك وسيلةٌ للخروج بعيداً عن كوكب

الأرض، ومعرفة شكله الحقيقي كما حدث في عصر الفضاء في القرن العشرين. يصنف موضوع كروية الأرض اليوم تحت علم هيئة الأرض ومساحتها أو كما يُعرّب المصطلح المعبر عنها بالجيوديسيا Geodesy، الذي اشتق من اليونانية، وهي تعني حرفياً «تقسيم الأرض». حيث إنّ الهدف الأول من هذا العلم هو أن يوفّر إطاراً دقيقاً للتحكم في عمليات المسح الطبوغرافية الوطنية. وبالتالي، فإن الجيوديسيا هي العلم الذي يحدد شكل الأرض والعلاقة المتبادلة لنقاط مختارة على سطحها إما بتقنيات مباشرة أو غير مباشرة .

لقد طوَّر العلماء العرب والمسلمين منذ عصر **المأمون** هذا العلم باتجاهين. **الأول:** تحديد مواقع النقاط المتميزة على سطح الأرض. **الثاني:** تحديد ما يتعلق بشكل الأرض وقياسها، سواء جزئياً أو كلياً، وبحساب قياس خط نصف النهار. وهما الاتجاهان اللذان سيكون لهما تأثير كبير في تطوير علم رسم الخرائط العربي، وبالتحديد (الإسقاط الكروي) الذي بلغ ذروته عند **البيروني**.

استمرّ العلماء بالبحث عن أدلة تبرهن كروية الأرض وبين عامي (1934–1935م) أُطلق بالون يحمل آلة تصوير بالأشعة تحت الحمراء إلى ارتفاع 22066 كيلو متراً و أكّدت الصور بالفعل أن الأرض كروية كما تبيّن للعلماء بعد عام 1959م أن الأرض ليست كروية تماماً، وإنما مفلطحة، حيث إنها أكثر انتفاخاً في النصف الجنوبي منها من النصف الشمالي، كما أن قطبها الشمالي على تسطحه مثل القطب الجنوبي وهو أكثر تحدباً منه بشكل صغير جداً . كذلك أمكن تفسير سبب اختلاف التوزع الحراري على سطح الأرض بين نصفي الكرة الأرضية، حيث يوجد منطقتان قطبيتان باردتان، ومنطقتان معتدلتان، ومنطقة

حـارة في وسـط الكوكـب. كمـا أن تبنـي نظريـة كرويـة الأرض كان لـه أثـر ودور في جوانـب فيزيائيـة وفلكيـة أخـرى مثـل نمـوذج الكـون (مركـزي الأرض)، وجاذبيـة الأرض، والملاحـة البحريـة وحتـى قيـاس سـرعة الضـوء لاحقاً عنـد الأوربيـين.

تكمـن أهميـة هـذا الفصـل أنـه سـيوفر للقـارئ كل الأدلـة التـي يرغـب أن يواجـه بـه أصحـاب الأرض المسـطحة، كمـا أنـه يوفـر للباحـث التاريخي مراحل تطور ونشـأة نظريـة الأرض الكرويـة والمسـطحة، ويـزود المختصـين بالجيوديسـيا بـكل الأسـاليب العمليـة والنظريـة التـي كانـت تتبـع سـابقاً في قياسـات الأعمـال المسـاحية. ناهيـك عـن التأريـخ الموثـق لـكل مـا وصلنـا مـن أعمـال العلمـاء العـرب والمسـلمين.

شـــكل الأرض

تدور الأرض حول محورها وهذا المحور عبارة عن خط وهمي يصل القطبين الشمالي والجنوبي. هذه الحركة الدورانية السريعة تجعل الشمس وكأنها تتحرك من الشرق إلى الغرب مسببة حدوث النهار والليل على الأرض. وتستغرق الأرض زمناً قدره 23 ساعة و 56 دقيقة و 4.09 ثانية لإتمام دورة واحدة حول نفسها وهذا الطول الزمني يطلق عليه اليوم النجمي.

تسير الأرض مسافة قدرها 958 مليون كم حول الشمس في زمن قدره 365 يوم و6 ساعات و 9 دقائق و 9.54 ثانية. هذا الطول الزمني يطلق عليه السنة النجمية. خلال هذه الفترة تسير الأرض بمعدل سرعة قدرها 107,200كم/س ويسمى مسار الأرض حول الشمس المدار الأرضي. ويقع هذا المدار على سطح وهمي منبسط (المستوى المداري الأرضي).

تأخذ الأرض شكلاً إهليجياً (بيضوياً) يبلغ نصف قطرها الأفقي عند خط الاستواء 6378.1 كم ونصف قطرها العمودي عند الأقطاب 6356.7 كم أي أن هناك زيادة قدرها 21.4 كم عند خط الاستواء وهذه تمثل الشكل الإهليجي أو ثابت التفلطح، الذي يقدر بـ 0.0033 وذلك بفعل القوه الطاردة المركزية، بمعنى أن الشمس تدور باستمرار حول محورها وهذه الحركة تولد القوة الطاردة المركزية، هذه القوة أقوى ما تكون عند خط الاستواء فتسبب دفعاً، وهذا الدفع يتسبب بدوره في تحدب الأرض حول الوسط كما يتسبب في تسطحها قليلاً عند القطبين.

ثابت التفلطح = نصف القطر الاستوائي – نصف القطر القطبي مقسوماً على نصف القطر الاستوائي

قال تعالى : ﴿أَوَلَمْ يَرَوْا أَنَّا نَأْتِي الْأَرْضَ نَنقُصُهَا مِنْ أَطْرَافِهَا﴾ [سورة الرعد، الآية 41].

وهذا يعني أن سطح الأرض غير مستو ففيه قمم عالية، وسفوح هابطة وسهول وهي أطراف طبقًا للتباين في المناسيب، ومن ناحية أخرى فإن الأرض كما ذكرنا شبه كره (مفلطحة)، فلها قطبان ولها خط استواء فتعتبر هذه أطرافًا لها، والسطح كله يعتبر أطرافًا للأرض. ولقد فسر العلم الحديث أن الأرض تتكمش باستمرار، تتكمش على ذاتها، من كل أطرافها أو من كل أقطابها. وسبب الانكماش الحقيقي هو خروج الكميات الهائلة من المادة والطاقة على هيئة غازات وأبخرة ومواد، سائلة وصلبة تنطلق عبر فوهات البراكين بملايين الأطنان بصورة دورية فتؤدي إلى استمرار انكماش الأرض، ويؤكد العلماء أن الأرض الابتدائية كانت على الأقل مائتي ضعف حجم الأرض الحالية.

دوران الأرض

تشـكّل النظـام الشمسـي قبـل حوالـي 5 مليـارات عـام، وكان في بداياتـه كتلـةً عملاقـةً مـن الغـاز والغبـار، ومـع بدايـة انهيـار جزيئـات هـذه الكتلـة ازداد دورانهـا بشـكلٍ كبيـر جداً، فتكوّنـت الشـمس في مركـز هـذه الكتلـة أولاً، أمّـا باقـي جزيئـات تلـك الكتلـة مـن الغـاز والغبـار فاسـتمرّت في الـدوران والتماسـك ببعضهـا البعـض، فنتـج عـن ذلـك الكواكـب، والأقمـار، والكويكبـات، والمذنبـات، فظلّـت تـدور جميـع هـذه الأجـرام حـول الشـمس، ويجـدر بالذكـر أنّهـا تـدور في ذات الاتّجـاه لأنهـا كانـت تـدور بنفـس الاتجـاه قبـل تكوّنهـا. يعـود سـبب عـدم الشـعور بـدوران الأرض حيـث إن الأرض تـدور بسـرعة كبيـرة حـول الشـمس، وعليـه تـدور كلّ أجـزاء الكوكـب جنبـاً إلـى جنـب معهـا بنفـس السـرعة والاتّجـاه الـذي تـدور فيـه الأرض بمـا في ذلـك الغـلاف الجـوي والمحيطـات، ممّـا يُعطـي شـعوراً بـأنّ الأرض ثابتـة، ويجـدر بالذكـر أنّ الشـعور بـدوران الأرض غيـر ممكـن إلّا فيمـا لـو توقفـت الأرض عـن الـدوران فجـأة.

في الحقيقـة إن دوران كوكـب الأرض حـول الشـمس وحـول محـوره، ببسـاطة هـو بسـبب سـبب شـروق الشـمس مـن الشـرق وغروبهـا مـن الغـرب، والسـبب وراء منـازل (أطـوار) القمـر، وسـبب ظهـور النجـوم ودورانهـا حـول الأرض مـرةً كل يـوم. تقـوم الأرض بنوعـين مـن الـدوران. الأول حـول محورهـا، والـذي يُعـرف «باسـم الـدوران الفلكـي Sidereal Rotation» وهـذا مـا يسـمح بـدورة النهـار Diurnal Cycle، وهـو الأمـر الـذي يجعـل السـماء تبـدو ظاهريـاً وكأنهـا تـدور حولنـا. والنـوع الثانـي مـن الـدوران هـو دوران الأرض حـول الشـمس الـذي يُعـــرف باسـم «الفتــرة المداريـة

Orbital Period». هـذه الـدوران مسؤول عن تلك الفصـول، وطـول السـنة، وتغيـرات دورة النهـار. كمـا ذكرنـا أعـلاه لدينـا نوعـين مـن الـدوران :

أولاً : الـدوران الفلكـي تـدور الأرض حـول محورهـا مـرةً كل 23 سـاعة و 56 دقيقـة و 4.1 ثانيـة. أو مـا يُعـرف باسـم (اليـوم الفلكـي Sidereal Day)، قيسـت فتـرة الـدوران هـذه نسـبةً إلـى النجـوم. وفي الوقـت نفسـه، فـإن اليـوم الشمسـي لـلأرض (ويعنـي ذلـك مقـدار الوقـت الـذي تسـتغرقه الشـمس لتعـاود الظهـور في المـكان نفسـه مـن السـماء) هـو 24 سـاعة. تـزداد سـرعة دوران الأرض بالاتجـاه نحـو خـط الاسـتواء؛ حيـث يصـل معـدل سـرعة الأرض إلـى 1609.34 كـم في السـاعة الواحـدة عنـد المناطـق الواقعـة علـى خطـوط العـرض الوسـطى بينمـا تقـل سـرعة دوران الأرض بالاتجـاه نحـو قُطبـيّ الأرض. إن الـدوران الفلكـي لـلأرض هـو المسـؤول عـن نمـط الشـروق والغـروب. وباسـتخدام الأجـرام السـماوية كنقـاط مرجعيـة (مثـل: القمـر، والنجـوم، إلـخ) فـإن الأرض تـدور بمعـدل 15 درجـة / سـاعة (أو 15 دقيقـة قوسـية/دقيقة) باتجـاه الغـرب. وإذا نظرنـا إلـى الأرض من الفضـاء من جهة القطب الشـمالي، سـتظهر الأرض وهـي تـدور عكـس عقـرب السـاعة. ومـن هنـا سـنعرف سـبب شـروق الشـمس مـن جهـة الشـرق وغروبهـا مـن جهـة الغـرب. كان لسـرعة دوران الأرض تأثيـرات كبيـرة عبـر الوقـت، بمـا في ذلـك شـكل الأرض (شـكل كـروي مسـطح، مـع تسـطح عنـد القطبـين)، ومُنـاخ الأرض، وعمـق المحيطـات وتياراتهـا، بالإضافـة إلـى القـوى التكتونيـة. سـرعة دوران الأرض تبلـغ 1674.4 كـم/س ومـع ذلـك فـإن سـرعة كوكـب الأرض تتباطـأ مـع مـرور الوقـت، وذلـك بسـبب التأثيـرات المديـة للقمـر المؤثـرة في دوران الأرض. تُظهـر السـاعات الذريـة أن الوقـت الحالـي أطـول مـن الوقـت في القـرن الماضـي بمقـدار 1.7 مللـي ثانيـة. إن الزيـادة البطيئـة

الحاصلة تم تعديلها باستخدام **الثانية الكبيسة** Leap Seconds في النظام العالمي للتوقيت. تدور الأرض من الغرب إلى الشرق، وهذا هو سبب شروق الشمس من الشرق وغروبها من الغرب.

ثانياً : الفترة المدارية تدور الأرض حول الشمس من مسافة متوسطة مقدارها 149598023 كيلو متراً، (أي وحدة فلكية واحدة)، وتُكمل دورة كاملة خلال 365.2564 يوماً شمسياً. وهذا ما يجعل الشمس تبدو متحركةً في السماء من الشرق بمعدل درجة واحدة يومياً. ووفق هذا المعدل، تستغرق الشمس ما يعادل 24 ساعة (يوماً شمسياً واحداً) لإكمال دورة كاملة حول محور الأرض والعودة لنقطة الزوال (نقطة على سطح الكوكب تمتد من الشمال إلى الجنوب مروراً بالقطبين). وبالنظر من أعلى القطبين الشماليين لكل من الأرض والشمس تظهر الأرض وهي تدور حول الشمس بعكس عقرب الساعة. إن دوران الأرض حول الشمس، أو **الحركة البدارية** Precession للشمس خلال نقطتي الاعتدال، هي السبب وراء مدة السنة التي تبلغ 365.2 يوم. ولهذا السبب أيضاً يتم إضافة يوم آخر إلى شهر فبراير كل أربع سنوات فيما يعرف بالسنة الكبيسة (Leap Year) ليصبح شهر فبراير 29 يوماً. أيضاً يخضع دوران الأرض حول الشمس لشذوذ مداري مقداره 0.0167 درجة، مما يعني اقتراباً أو بُعداً دوريين لها من الشمس في أوقات محددة من السنة. تصل الأرض **لنقطة الحضيض** Perihelion (على بُعد 147089047 كيلو متراً من الشمس) في الثالث من يناير تقريباً، وتصل **نقطة الأوج** Aphelion في الرابع من يوليو (على بعد 152097701 كيلو متراً). يؤدي تغير المسافة بين الأرض والشمس إلى زيادة الطاقة الشمسية الواصلة إلى الأرض بنسبة 6.9 % عند نقطة الأوج

مقارنة بنقطة الحضيض. يميل نصف الكرة الأرضية الجنوبي باتجاه الشمس بنفس الوقت الذي تصل فيه الأرض أقرب نقطة لها من الشمس. لذلك يتلقى نصف الكرة الأرضية الجنوبي طاقةً من الشمس أكثر قليلاً من النصف الشمالي خلال السنة. وهو كذلك نفس السبب وراء ظهور منازل القمر، وكذلك كل من خسوف القمر (Lunar Eclipse) وكسوف الشمس (Solar Eclipse).

يحدث خسوف القمر عندما يدخل القمر منطقة ظل الأرض، نسبة إلى الشمس مما يسبب ظلمته ومظهره باللون الأحمر. يحدث كسوف للشمس خلال القمر الجديد عندما يكون القمر بين الشمس والأرض. وحيث إنهما يبدوان بنفس الحجم الظاهري في السماء، فإن القمر بإمكانه أن يحجب الشمس جزئياً، في ظاهرة تسمى **الكسوف الحلقي** Annular Eclipse أو يحجب الشمس بالكامل ويسمى الكسوف الكامل Total Eclipse. وفي حالة الكسوف الكامل يغطي القمر قرص الشمس كلياً، وتصبح **الهالة الشمسية** Solar Corona مرئيةً بالعين المجردة. ولولا الميل المحوري للأرض، الذي يميل بمقدار 23.5 درجة نسبة إلى الشمس، لكان هناك خسوف وكسوف كل أسبوعين، بالتناوب بينهما. وبسبب هذا الميل المحوري أيضاً تتباين كمية الأشعة الشمسية الواصلة إلى سطح الأرض خلال السنة. وهذا ما يسبب التغيرات الموسمية، والتغيرات في الدورة النهارية، والتغير في موقع الشمس في السماء نسبة إلى خط الاستواء. عندما يميل أحد نصفي الأرض باتجاه الشمس يكون عندها الفصل صيفاً في ذلك النصف، حيث ترتفع درجات الحرارة ويزداد طول النهار. وينعكس هذا الوضع كل ستة أشهر.

الأرض المسطحة أم الكرويـة؟

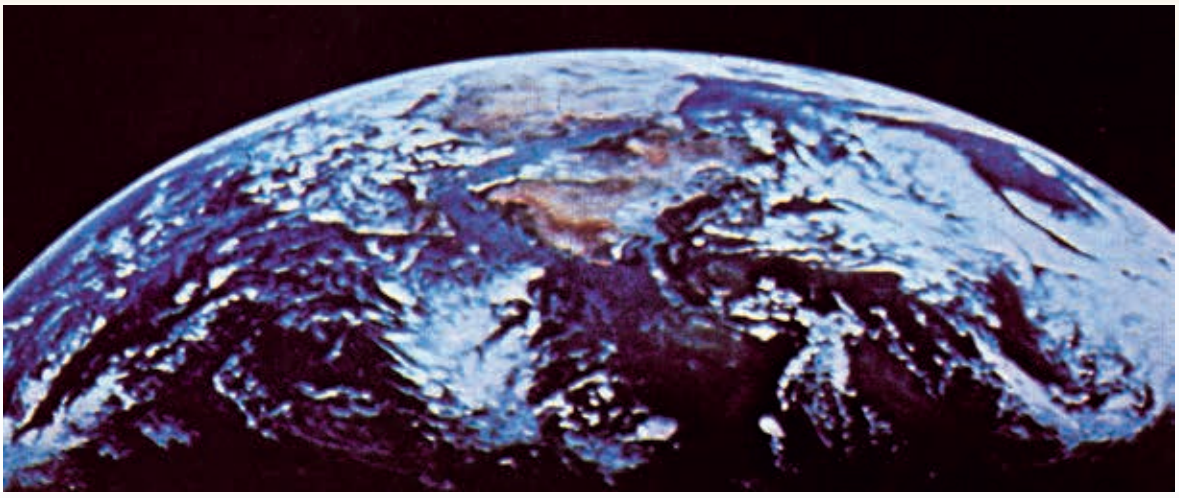
بدءاً من عام 2012 تقريباً، كان هناك انبعاثٌ كبيرٌ للاهتمام بفكرة الأرض المسطحة؛ حيث بدأ ذلك إريك دوباي E. Dubay، الذي نشر على الشبكة العنكبوتية كتابين حول هذا الموضوع: الأول هو (مؤامرة الأرض المسطحة Flat-Earth Conspiracy)، والثاني هو: (200 دليل على أن الأرض ليست كرة دوَّارة 200 Proofs the Earth Is Not a Spinning Ball)، وسرعان ما تبنى آخرون وجهة نظره مولّدين بذلك حركة جديدة، وقد جرى الترويج للكثير من هذه الأفكار على الشبكة كالنار في الهشيم، لا سيما من خلال وسائل التواصل الاجتماعي. كما ظهر بعض القادة البارزين في حركة الأرض المسطحة منهم مارك سارغنت M. Sargent وجيران كامبانيلا J. Campanella وروبي ديفيدسون R. Davidson وروب سكيبا R. Skiba. الأخيران منهم جديران بالملاحظة لأنهما يروجان لنسخة مسيحية من الأرض المسطحة بناءً على فهمهما لعلم كونيات الكتاب المقدس.

الشيء الغريب أنه حتى في عصرنا هذا – عصر الفضاء – يوجد أناس لا يقتنعون بأن الأرض كروية الشكل وإنما مسطّحة، مع وجود آلاف الصور الفضائية والجوية التي تبيّن حقيقة كرويتها، لذلك فإنّا نعتقد أن أصحاب نظرية الأرض المسطحة يحتاجون إلى رحلةٍ للفضاء حتى يتأكدوا بأم أعينهم أنها كروية، كونهم لم ولن يقتنعوا بالأدلة التي تشير إليها الكثير من الظواهر الطبيعية اليومية.

مع ذلك، فقد استمرَّ العلماء بالبحث عن أدلة تبرهن كرويتها منذ النصف الأول من القرن العشرين، ففي الفترة الواقعة بين عامي (1934-1935م) أُطلِق بالون يحمل آلة تصوير بالأشعة تحت الحمراء، وقد أُرسلَ هذا البالون إلى طبقة **الستراتوسفير** Stratosphere ووصل إلى ارتفاع 22066 كيلو متراً، وأخذ صورة أكّدت بالفعل أن

الأرض كروية (فولمان، 2015م). كما تبيّن للعلماء بعد عام 1959م أنّ الأرض ليست كروية تماماً، وإنما لها شكل الإجاصة، أي مفلطحة، ولكن التشوهات في وسطها تهمل بالنسبة لقطرها فتعتبر كروية تقريباً؛ حيث إنَّها أكثر انتفاخاً في النصف الجنوبي منها من النصف الشمالي، كما أنَّ قطبها الشمالي على تسطحه مثل القطب الجنوبي وهو أكثرُ تحدباً منه بشكلٍ صغيرٍ جداً. وتوضح صور الأقمار الصنعية أنّ محيط الأرض المارِّ بالقطب أقل بـ 432 كيلومتر من محيطها المارّ بخط الاستواء (ضاي، 1994م)؛ أيّ أنّ الأرض ليست كروية بشكل مثالي، وإنما مسطحة قليلاً عند قطبيها الشمالي والجنوبي؛ حيث إنّ قطرها المحوري – أي قطرها من القطب الجنوبي إلى الشمالي- ينقص 41.6 كيلو متراً عن قطرها الاستوائي. ولو كانت كرة تامة الكروية لتساوى طولي القطرين (صروف، 1932م).

في الواقع إنَّ شكل الأرض الكروي المفلطح – وفق المعطيات الحالية – يعني أن الأرض كانت بالضرورة بحالة مائعة في فترةٍ ما من تاريخها، وقد توصل العلماء لهذا الشكل من خلال قياسات أقواس خطوط الطول، وبخاصة من خلال دراسة جاذبية الأرض (موريه، 1987م).



التقطت هذه الصورة لكوكب الأرض من قِبل رُوَّاد المركبة الفضائية أبولو 8- في رحلتها إلى القمر عام 1968م ، وهو دليلٌ جديدٌ يحسم الجدل الذي بقي لأكثر من ألفي سنة بين العلماء حول الشكل الحقيقي للأرض (Faulkner, 2019)

إنّ الأرض كبيرة، ونحن صِغارُ الحجم لدرجة قد نعتقد أنّها مسطّحة فعلاً، لأنه حتى مع ركوبنا للطائرة وتحليقنا في الأجواء على ارتفاع 3 كيلومترات لن تظهر لنا كرويّة، ولعل هذا السبب هو الذي جعل الكثير من الناس يعتقدون أنها مسطحةٌ. وقد يتساءل البعض بماذا تختلف الأرض المسطحة – جوهرياً – عن الأرض الكروية؟

في حالة الأرض المسطحة، تكون الأرض مستويةً ومستديرةً؛ حيث يقع القطب الشمالي في مركز الأرض ولا يوجد قطب جنوبي، وإنما تتكون حافة الأرض المكتشفة من جدارٍ جليدي يسمونه أنتاركتيكا، هذا الجدار الجليدي لا يحدّ فقط من الأرض كما نعرفها، وإنما يقوم أيضاً على احتواء المحيطات،

هنـاك خـلافٌ بـين أصحـاب الأرض المسـطحة حـول مـدى امتـداد القـارة القطبيـة الجنوبيـة. فـوق الأرض توجـد قِبّـةٌ تندمـج فيهـا النجـوم، كذلـك تقـع القبـة علـى القـارة القطبيـة الجنوبيـة خلـف الجـدار الجليـدي، وتُناقـش أبعـاد القبـة وشـكلها الدقيـق بـين أصحـاب الأرض المسـطحة في العديـد مـن الإصـدارات، تكـون القبـة عبـارةً عـن مجسـم نصـف كـروي، بينمـا يفضـل البعـض الآخـر قبـةً ذات نصـف قطـرٍ أكبـر في المركـز (فـوق القطـب الشـمالي) أكثـر مـن حوافهـا، بحيـث تشـبه سـطح سـاحة الألعـاب الرياضيـة، كل يـوم تـدور القبـة حـول محورهـا الـذي يمـرّ عبـر القطـب الشـمالي لـلأرض، ويتسـبب هـذا في تحـرّك النجـوم في السـماء، يقـع نجـم القطـب الشـمالي مباشـرةً تقريبـاً فـوق القطـب الشـمالي، لذلـك يبقـى سـاكناً تقريبـاً بينمـا تـدور النجـوم الأخـرى في حلقـاتٍ حولـه، وفي معظـم نمـاذج الأرض المسـطحة، تكـون الشـمس والقمـر فـوق الأرض ولكـن بشـكلٍ عـام أسـفل القبـة، كمـا أنهـا تـدور حـول محـور القطـب الشـمالي كل يـوم، وهـو مـا يمثّـل حركتهـا اليوميـة، وتتحـرك الشـمس والقمـر بمعـدلٍ مختلـفٍ قليـلاً عـن القبّـة، وهـو مـا يفسـر حركتهمـا بالنسـبة إلـى النجـوم، ونظـراً لأنَّ الشـمس والقمـر دائمـاً فـوق الأرض، فلـن يشـرقا أو يغربـا أبـداً (Faulkner, 2019).

لا يزال هناك من يتبنى فكرة الأرض المسطحة حتى وقتنا الحاضر، ويتخلى عن فكرة كروية الأرض، وقد عقدت حركة الأرض المسطحة عدة مؤتمرات (في عامي 2017 و 2018) تحاول من خلالها أن تبرهن للعالم أننا نعيش على أرضٍ مسطحة وليس كروية (Faulkner, 2019)

كثيراً ما يخلط أصحاب الأرض المسطحة بين مسألة شكل الأرض ومسألة ما إذا كانت الأرض تتحرك، بالنسبة للأوروبيين كان غالبية علم الكونيات منذ ما يقرب من أربعة قرون يقرر أن الأرض كروية وتدور حول الشمس، ولمدة 2000 عام قبل ذلك، كان غالبية علم الكونيات في الغرب الأوروبي يقرر أن الأرض كروية وهي مركز الكون (يُعبّر عنها عموماً بنموذج بطليموس). وقد كان يؤمن بعض

النـاس بـأن الأرض كرويـة وهـي تقـع في مركـز الكـون (وهـو مـا يُعبّـر عنـه عمومـاً باسـم «علـم الكونيـات التيخونـي Tychonic» نسـبةً إلـى الفلكـي **تيخـو براهـي**)، وإذا اعتقـد المـرء أن الأرض مسـطّحة، فسـيبدو مـن الضـروري الإيمـان بمركزيـة الأرض للكـون؛ لنفتـرض أنّـه مـن الممكـن الإيمـان بعلـم كـون الأرض المسـطحة التـي تتمحـور حـول الشـمس، ولكـن كيـف يخلـط بعـض أصحـاب الأرض المسـطحة بـين هاتـين المسـألتين؟ إنهـم يفعلـون ذلـك عـن طريـق الخلـط بـين تاريـخ علـم الكونيـات الأوروبـي حـول هـذه المسـألة وبـين تقـديم الحجـج حـول مركزيـة الأرض، معتقديـن خطـأً أنّ الحجـج تثبـت أيضـاً أنّ الأرض مسـطحةً، أمـا أولئـك الذيـن يعتقـدون بحركـة مركزيـة الأرض الحديثـة سـيختلفون بشـدة مـع هـذا الطـرح (Faulkner, 2019).

من الناحية المعرفية (الأبستمولوجية) تجيب نظرية المعرفة على سؤال «كيف نعرف ما نعرفه؟» يطرح أصحاب الأرض المسطحة سؤالاً معرفياً جيداً: بينما يعتقد معظم الناس أن الأرض هي كرة، كيف نعرف ذلك؟ معظم الناس لم يفكروا في هذا السؤال؛ لأنهم تعلموا طوال حياتهم أنّ الأرض كروية، فلماذا القلق حيال ذلك؟ وبالتالي، مع عدم وجود فكرة عن الأسباب التي تجعلنا نعلم أنّ الأرض كروية، دخل معظم الناس منذ فترة طويلة في حالة من الرضا حول هذا الموضوع، وعندما يقوم فريق الأرض المسطحة الحديث ويبدؤون في إثارة ما يبدو أنّه اعتراضات بسيطة على الشكل الكروي للأرض، فلن يتطلب الأمر الكثير لإرباك معظم الناس عند حشرهم بهذه الطريقة، يستجيب الناس عموماً بملاحظة أن لدينا صوراً من الفضاء تُظهر بوضوح الأرض الكروية. ومع ذلك، من شبه المؤكد أنّ صاحب الأرض المسطحة سيقول إنه يمكن تزوير مثل هذه الأشياء بسهولة في هذه الأيام. في الواقع، لأننا نعلم جميعاً أنه من السهل جداً تزوير مثل هذه الصور، فربما لا تثبت هذه

الصور كثيراً بعد كل شيء. علاوةً على ذلك، يعود الإيمان بالأرض الكروية إلى ما قبل عصر الفضاء بكثير، لذلك من الواضح أنّه يجب أن تكون هناك استجاباتٌ أفضل؛ إذ بمجرد التقاط الصور الفضائية للأرض الكروية، يكون لدى معظم الناس عادةً إحدى إجابتين: إما عن طريق الرد الأكثر شيوعاً: وهو استبعاد الشخص الذي يطرح الأسئلة باعتباره شخصاً غريب الأطوار، أو أنّه أحمق لأنّ «الجميع يعلم أنّ الأرض كروية».

وقد يكون الرد بطريقةٍ أخرى: وهو إيلاء المزيد من الاهتمام لأصحاب الأرض المسطحة، والبحث عن أخطاءٍ في حقائقهم أو منطقهم، ومع أنه نادراً ما يكون لديهم المعرفة لدحض قضية الأرض المسطحة، فإنّ معظم الأشخاص الذين يتبعون هذا النهج يبحثون عن المساعدة، وعادةً ما ينتهي هذا البحث عن المساعدة على الشبكة (الإنترنت)، وعندها يجدون بسرعة عدداً كبيراً من المواقع ومقاطع الفيديو التي تروج للأرض المسطحة لكنّ القليل منهم، إنْ وجد، يدحضها. يظهر بعض الناس بعد بضع ساعات، وقد أهين غرور ذكائهم قليلاً؛ لأنهم ما زالوا يعتقدون أنّ الأرض مسطحةٌ وهو محضُ هراءٍ ولكنهم محبطون لأنهم لم يستطيعوا الإجابة على العديد من الحجج التي واجهوها للتو، في حين يخرج آخرون وينتهي بهم الأمر إلى التفكير في أن نظريات المؤامرة التي واجهوها طوال حياتهم ربما تكون صحيحة، ربما تلقينا جميعاً لفترةٍ طويلةٍ كذبةً كبيرةً حول الشكل الحقيقي للأرض؛ لكن لماذا يُفترض وجود مؤامرة لإخفاء الشكل الحقيقي للأرض؟ الإجابة الأكثر شيوعاً هي أنها محاولةٌ للسيطرة على العالم، مع أنّه ليس من الواضح كيف أن تعزيز ذلك والحفاظ على اعتقاد خاطئ حول شكل الأرض يحقق هذه السيطرة.

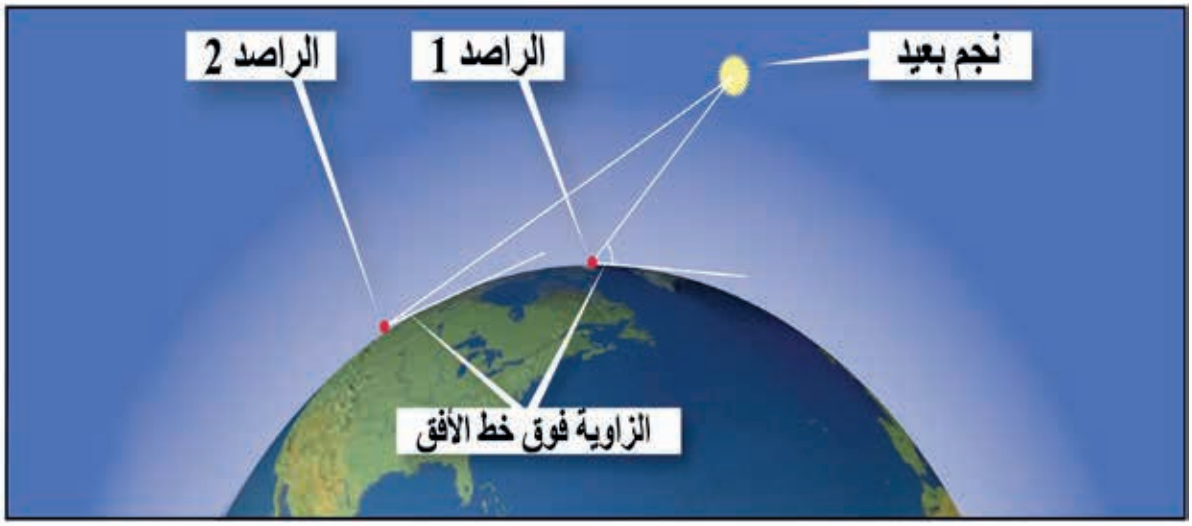
طبعـاً لا تقتصـر فائـدة اعتمـاد نظريـة الأرض الكرويـة علـى تحديـد محيطهـا وقطرهـا، وإنمـا أمكـن للعلمـاء أنْ يحسـبوا مـن خـلال هـذه الحقيقـة كتلتهـا وتحديـد بُعْدهـا عـن بقيـة الأجـرام في الكـون، وكذلـك فتـح بوابـة استكشـاف كوكـب الأرض الـذي مهّـد بـدوره لأضخـم عمليـاتٍ اسـتعماريةٍ غربيـةٍ.

ويعتقـد الكثيـر مـن النـاس أنّ المستكشـف الإسـباني المشـهور مـن أصـول إيطاليـة كريسـتوفر كولومبـوس Ch. Columbus (تـوفي 1506م) هـو مـن حسـم أمـر كرويـة الأرض منـذ أكثـر مـن خمسـة قـرون بوصولـه لأمريـكا، لكنـه في الواقـع لـم يحسـمه فعـلاً؛ ويذكـر الباحـث درابـر (مؤلـف كتـاب تجـدد العلـوم في الجنـوب)، أن كولومبـوس قـد اطلـع علـى كتـب ابـن رشـد قبـل أن ينطلـق برحلتـه نحـو العالـم الجديـد (العقـاد، 1983م)، فقـد اعتقـد كولومبـوس أن المسـافة بـين إسـبانيا والهنـد ليسـت بعيـدةً عـن طريـق المحيـط الغربـي (كـرم، 1936م).

وقـد ثَبُـتَ للأوربيـين كرويـة الأرض بشـكلٍ نهائـيٍ مـن خـلال الرحلـة التـي قـام بهـا البحـار الإسـباني فرنانـدو ماجـلان F. de Magallanes (تـوفي 1521م) بـين عامـي 1519 و 1522م، حيـث أكمـل الرحلـة خـوان سباسـتيان إلكانـو J. S. Elcano (تـوفي 1526م) عـام 1522م (علـي، 1978م).

كمـا كان مـن التطبيقـات العمليـة والمباشـرة الأخـرى لكرويـة الأرض تطويـر الإسـطرلاب واسـتخداماته، فالإسـطرلاب المسـطح مثـلاً، هـو إسـقاطٌ مباشـرٌ لخطـوط الطـول والعـرض السـماوية، علـى اعتبـار أن الأرض مركـز للكـرة السـماوية، أمـا الإسـطرلاب الكـروي فهـو محـاكاة مباشـرة للكـرة السـماوية.

أيضاً أمكن تفسير سبب اختلاف التوزع الحراري على سطح الأرض بين نصفي الكرة الأرضية، حيث يوجد منطقتان قطبيتان باردتان، ومنطقتان معتدلتان، ومنطقةٌ حارةٌ في وسط الكوكب. كما أن تبني نظرية كروية الأرض كان له أثر ودور في جوانب فيزيائية وفلكية أخرى مثل نموذج الكون (مركزي الأرض)، وجاذبية الأرض، والملاحة البحرية وحتى قياس سرعة الضوء لاحقاً عند الأوروبيين.



من الأدلة التي تثبت كروية الأرض النظر في الوقت نفسه إلى نجم بعيد من قبل راصدين بينهما مسافة بعيدة، عندها يرى أحدُ الراصدين النَّجم أعلى من الأفق مقارنةً بالآخر

علاوة على ذلك هناك دلائل علمية دامغة تبرهن أن الأرض ليست مسطحة ومنها على سبيل المثال لا الحصر:

- **القمر.** لاحظ **أرسطو** أنه خلال خسوف القمر (عندما تقع الأرض مباشرة بين الشمس والقمر، وتخلق بذلك ظلاً) يكون الظل الواقع على سطح القمر

دائرياً، وهـذا الظل هـو ظل الأرض، ويُعـد ذلـك دليـلاً قوياً على الشـكل الكـروي لـلأرض. ظل الأرض يعبـر سـطح القمـر، والظل منحنٍ لأن الأرض كروية.

- **المناطق الزمنية**: لدينـا مناطـق زمنيـة لأنـه عندمـا تضـيء الشـمس نصـف الأرض الكروية يكون النص الآخـر مظلماً. يمكن تفسـير هـذا الأمـر فقـط إذا كان الكوكـب كروياً ويـدور حـول محـوره الخـاص. فـإذا كانـت الشـمس تُشـرق علـى جـزء مـن الأرض، فـإن الجانـب المقابـل سـيكون مظلماً والعكس صحيـح، وهـذا يسـمح بوجـود فـروق التوقيـت والمناطـق الزمنيـة بخاصـة تلـك الأكثـر مـن 12 سـاعة.

- **مركز الجاذبية**. قـوة الجـذب بـين جسـمين تعتمد علـى كتلتيهما والمسـافة بينهما. سـوف تسـحبهما الجاذبية نحو مركز كتلة الجسـمين،

- **الصور من الفضاء** . خـلال الـ 60 سـنة الماضية مـن اكتشـاف الفضـاء، أطلقـت الأقمـار الصناعيـة والمسـابر إلـى الفضـاء. وبينمـا عـاد بعضهـم فقـد ظـل البعـض الآخـر يسـبح عبـر النظـام الشمسـي ، وترسـل صـوراً رائعـة لأجهـزة الاسـتقبال علـى الأرض. وفي كل الصـور تظهـر الأرض كرويـة، نعـم كرويـة. ويظهـر انحنـاء الأرض في العديـد مـن الصـور التـي يلتقطهـا رُوَّاد الفضـاء علـى مـتن محطـة الفضـاء الدوليـة.

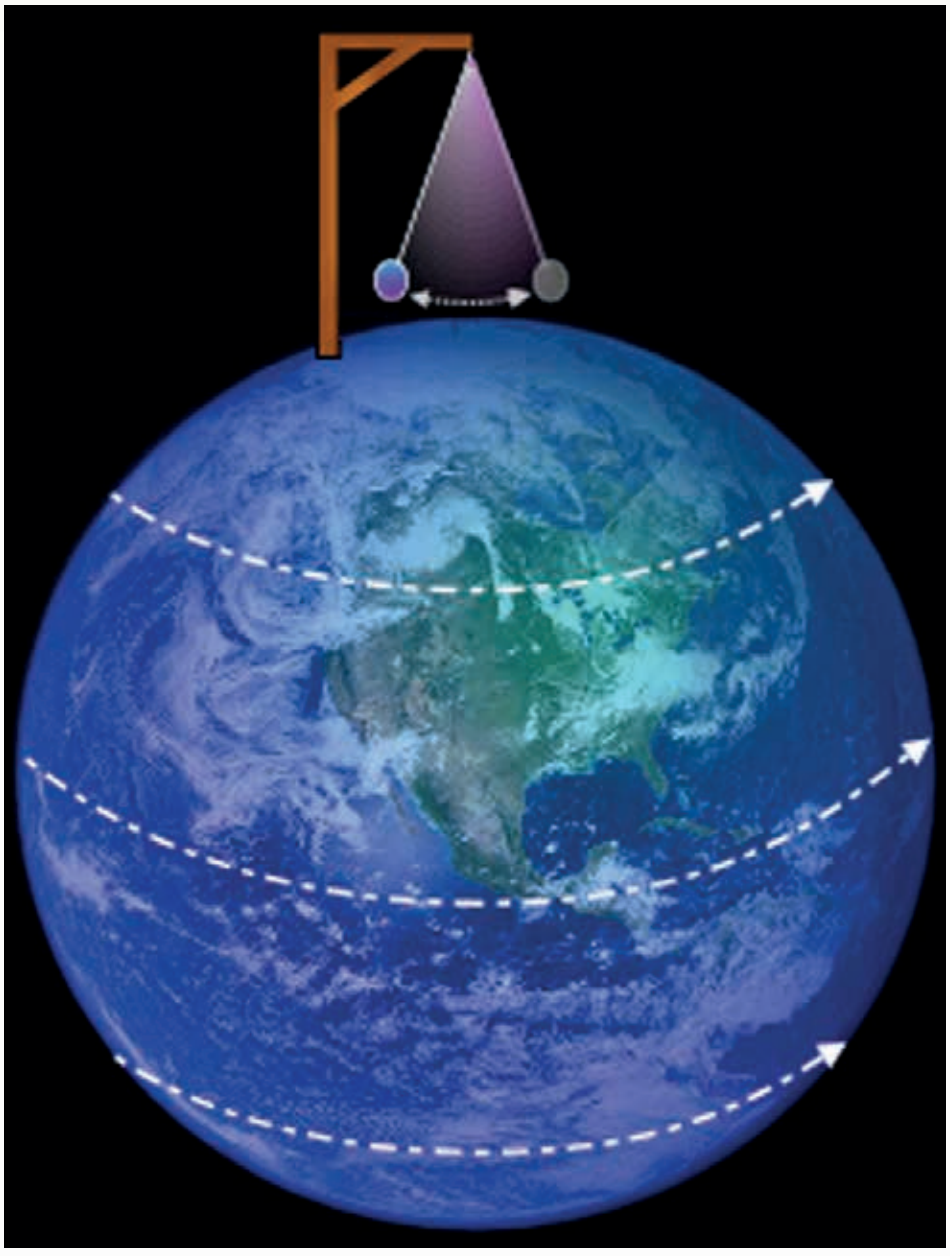
- **يعد تحدّب البحر** دليـل علـى كرويـة الأرض، خصوصـاً بالنسـبة لأولئـك الذيـن يبحـرون دومـاً؛ فهـم لا يسـتطيعون رؤيـة الأنـوار عنـد وضعهـا علـى مسـتوى أعينهـم نفسـه، ولكـن إذا رفعـت علـى ارتفـاع معيّن فإنهـا تصبـح مرئيـة للعيـان

فـوراً. أي أنّ البحـارة وهـم يقتربـون مـن مقصدهـم، يجـدون الشـاطئ يرتفـع باسـتمرار نحـو نظرهـم؛ والأجسـام التـي كانـت في البدايـة منخفضـة، تبـدأ بالارتفـاع. (Harris, 1898).

- عنـد السـفر نحـو الشـمال فـإن طـول ظـل الشـخص الواقـف تحـت أشـعة الشـمس يـزداد. وإذا سـافر الشـخص نحـو الشـرق أو الغـرب فـإن نجـم القطـب سـيبقى كمـا هـو علـى الارتفـاع نفسـه، لكـن لـو سـافر نحـو الشـمال فإنـه يصبـح أكثـر ارتفاعـاً أو الجنـوب فإنـه يصبـح أقـل ارتفاعـاً.

- من أدلة كروية الأرض تفاوت أوقات بدء الكسوفات ووسطها وانجلائها على الخط الواصل بين المشرق والمغرب، فمن كان بلده أقرب إلى المشرق كانت ساعات هذه الأوقات من أول الليل والنهار أكثر؛ ومن كان بلده أقرب إلى المغرب كانت ساعات هذه الأوقات من آخر الليل وآخر النهار (الهمداني، 1884م).

- من الأدلة العلمية الكبيرة التي تدل على كروية الأرض ودورانها حول محورها هو (بندول فوكو Foucault Pendulum) الذي اخترعه الفيزيائي الفرنسي جان برنار ليون فوكو J. B. L. Foucault (توفي 1868م)؛ ففي عام 1851م، علَّق فوكو كرةً كبيرة من الحديد وزنها 28 كغ في نهاية سلك طوله نحو 60م، فأخذت الكرة تتحرك، لكنَّ حركة بندول فوكو لا تقع في مستوٍ واحد. فمع الحركة الدورانية اليومية للأرض يظهر تغيرٌ في مستوى حركة البندول، ولكن تغيّر مستوي حركة البندول ظاهريٌّ فقط، فالأرض هي التي تدور تحت البندول، أما البندول فيبقى متحركاً في المستوى نفسه الذي بدأ فيه الحركة. وهذا التغيُّر لا يبدو ملحوظاً عند خط الاستواء لكنه يكون واضحاً عند القطبين الشماليّ والجنوبيّ.

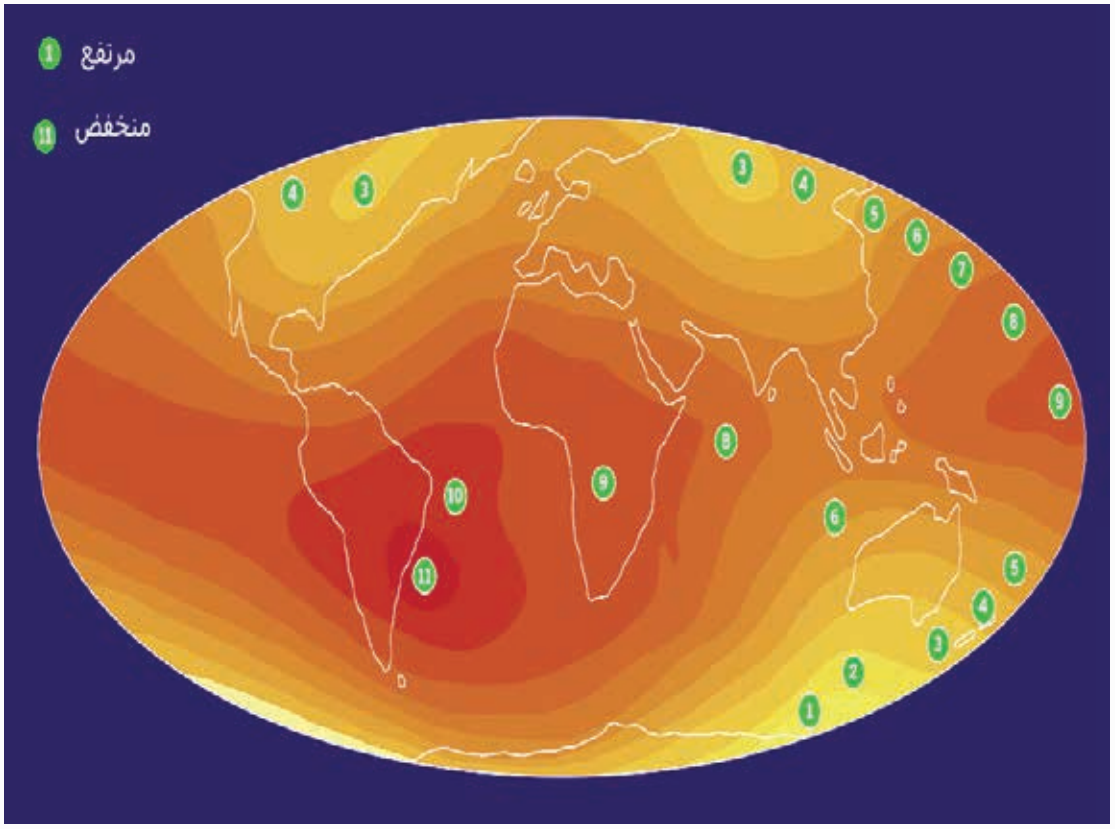


بندول فوكو عند القطب الشمالي: يتأرجح البندول في المستوى نفسه لأنّ الأرض تدور تحته

- **ظهور أثر أو مفعول كوروليس** Coriolis Effect، نسبةً إلى الفيزيائي الفرنسي غاسبار غوستاف كوريوليس G. G. de Coriolis (توفي 1843م)، يدل في تكوّر الأرض. ويعبّر هذا المفعول عن التأثير الظاهر لدوران الأرض على أي جسم يتحرك على سطح الكرة الأرضية. لا يمكن لأي شخص يمشي على قدميه أن يشعر بهذا التأثير وذلك نظراً لضآلته، إلا أنه يؤدي دوراً مُهماً في مسارات الأجسام الطائرة والمتحركة فوق الأرض. فخط سير الصاروخ المنطلق فوق الأرض، على سبيل المثال، يبدو مستقيماً، إلاّ أنه يظهر مقوساً وكأنَّ شيئاً ما يدفعه إذا راقبه شخصٌ يدور مع الأرض، وهذا الدفع الظاهر هو مفعول كريوليس. من خصائص هذا المفعول أنه يمنع الرياح التي تهب من القطبين الشمالي والجنوبي ومن خط الاستواء من التحرك مباشرة نحو الشمال أو الجنوب، حيث تنحرف الرياح التي تهب نحو خط الاستواء باتجاه الغرب، كما تؤثر هذه القوة على اتجاه تيارات المحيطات (Persson, 2005).

- **تشبه الأرض مغناطيساً عملاقاً**، وهي تدور حول خط وهمي يربط القطبين الجغرافيين الشمالي والجنوبي. وبالقُربْ من هذين القطبين فإن للأرض أيضاً قطباً مغنطيسياً، وهو الذي يجعل إبرة البوصلة تشير إلى الشمال. ويقع القطب المغناطيسي بالقُربْ من جزيرة إلف رنجنز في شمالي كندا على بعد 1400 كم تقريباً من القطب الشمالي. كما يقع القطب المغناطيسي الجنوبي بعيداً عن شاطئ ولكز لاند – وهي جزء من قارة القطب الجنوبي– على بُعْد 7502 كم تقريباً من القطب الجنوبي. ويدل قياس شدة المجال على سطح الأرض على كرويتها، فهو عند خط الاستواء أقل ما تكون حيث تبلغ 25 نانوتسلا وتزداد شدة المجال كلما ابتعدنا شمالاً أو جنوباً لتصل إلى

60 نانوتسـلا. وعنـد قيـاس اتجـاه المجـال عنـد خـط الاسـتواء نجـد أنـه مـوازٍ تمامـاً لسـطح الأرض وعمـودي علـى هـذا الخـط وعنـد قياسـه بعيـداً عـن خـط الاسـتواء نجـد أن الاتجـاه يشـير إلـى جهـة محـددة وهـي القطـب الشـمالي في مناطـق الشـمال والقطـب الجنوبـي في مناطـق الجنـوب (Chulliat, et al 2015).

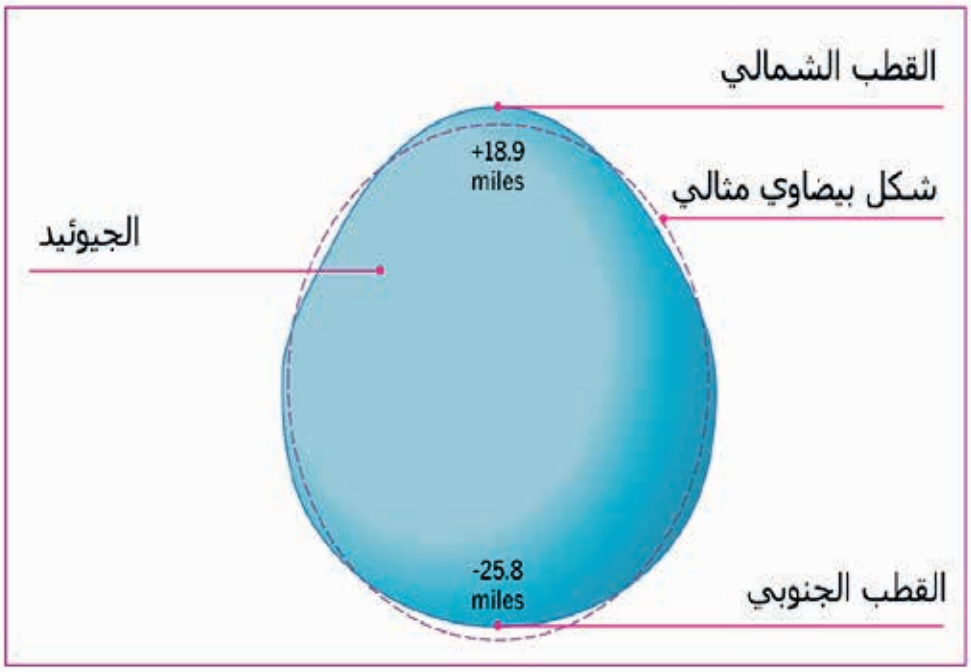


الاختلافات الإقليمية للمجال المغناطيسي الأرضي في شدته من مكان إلى آخر عبر سطح الكوكب، وتكون شدته أكبر بالقُرْب من الأقطاب المغناطيسية

الجيوئيـــد Geoid

اهتـم علـم الجيوديسـيا بشـكل أساسـي بتحديـد شـكل الأرض فيمـا يتعلـق بالمواقـع النجميـة، وزودت أيضـاً علـم الفلـك بوحـدة طـول لقيـاس أبعـاد الأجـرام السـماوية وأبعـاد الكـون. لقـد كانـت الجيوديسـياء أساسـيّة أيضـاً لعلـوم الأرض (رسـم الخرائـط، والجيولوجيـا، والجيوفيزيـاء) كمـا كانـت ضروريـةً غالبـاً للمهـام العسـكرية والاسـتعمارية، سـواءٌ لقيـاس خطـوط الطـول أو العـرض، أو تحديـد الموقع الفلكـي للمحطـات الجيوديسـية، فقـد اسـتخدم الضبـاط العسـكريون علـى الأرض التقنيـات التـي جـرى إنشـاؤها لمراقبـة النجـوم، مـع تكييـف المهـارات والمعرفـة المميـزة للمرصـد الفلكـي لقيـاس أبعـاد الأجسـام الأرضـي، وخـلال القـرن التاسـع عشـر، اعتمـد عـدد كبيـر مـن الـدول الغربيـة علـى الجيوديسـيا لتأسـيس القـوة الإقليميـة وممارسـتها، وبذلـك أصبحـت الجيوديسـيا مكونـاً مركزيـاً للعمـل المنجـز في المراصـد الأوروبيـة الرئيسـة (Schiavon, 2010).

في الواقـع يعـدّ الجيوئيـد Geoid الشـكل الفعلـي لـلأرض ويجـري حسـابه مـع الأخـذ في الاعتبـار كتلتـه ومرونتـه ومعـدل دورانـه. يتبـع متوسـط مسـتوى سـطح البحـر في المحيطـات وهـو علـى شـكل كمثـرى قليـلاً، مـع القطـب الشـمالي (30 كـم) بعيـدًا عـن مركـز الأرض عـن الأماكـن الأخـرى والقطـب الجنوبـي (42 كـم) أقـرب (Adams, & Lambert, 2006).



شكل الجيوئيد - تقريب لشكل الأرض الفعلي - مقابل الشكل البيضوي. يجري تضخيم الجيوئيد بصرياً لتوضيح اختلافه عن الشكل الإهليلجي المثالي (Adams, & Lambert, 2006).

الجيوئيـد هـو السـطح متسـاوي الجهـد Equi-Potential Surface الـذي ينطبـق مـع مسـتوى سـطح البحـر إذا لـم يتغيـر بالريـاح أو المـد والجـزر وارتفاعـه يسـاوي الصفـر. وتكمـن أهميتـه في المسـح الجاذبـي لأنـه أفقـي ويشـكل زاويـة قائمـة علـى اتجـاه التسـارع النـاتج عـن الجاذبيـة في إي مـكان مـن هـذا السـطح أي أن العلاقـة بـين اتجاهـات السـطح والقـوى الثـلاث (التجـاذب، وقوة الطـرد المركزيـة، والجاذبيـة) هـي مـا يعـرف بـ (الجيوئيد). ويسـتخدم كمرجـع لعمليات التسـوية والتحديد الفلكي للانحـراف الرأسـي بـين مسـتوى الجيوئيـد والاسـفيرويد باسـتخدام تكامـل سـتوك Stokes Integral في أي محطـة (العمـري 2021).

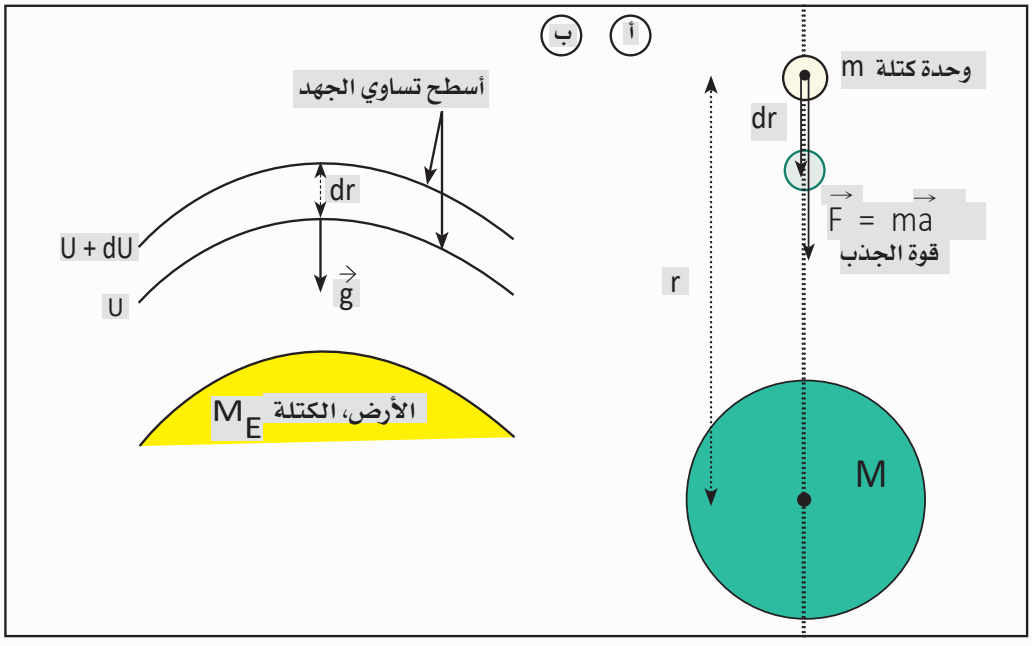
ينظـر إلـى الجهـد التثاقلـي V علـى أنـه عبـارة عـن انحـدار Gradient لعجلـة الجاذبيـة الأرضيـة. ويعـرف علـى أنـه هـو الشـغل المبـذول بواسـطة قـوة الجـذب لكتلـة m2 لتحريـك وحـدة الكتـل مـن مسـافة r إلـى مسـافة مـا لا نهايـة ضـد قـوة التجـاذب بسـبب الكتلـة m1.

$$V = \int_r^{\infty} \frac{GM}{r^2}\, dr = \left| - \frac{GM}{r} \right|_r^{\infty} = \frac{GM}{r}$$

وعجلـة التسـارع التثاقلـي a هـي عبـارة عـن معـدل تغيـر الجهـد التثاقلـي V بالنسـبة للمسـافة r.

$$a = - \frac{\partial V}{\partial r}$$

وإذا إذا افترضنـا أن الأرض جسـم ثابـت لا يـدور أي كرويـة الشـكل وكذلـك متسـاوية الكثافـة فـإن الخـط الواصـل بـين قيـم الجهـد المتسـاوية (يسـمى سـطح تسـاوى الجهـد Equi-Potential Surface) ويمكـن تخيلـه كمـا لـو كان خـط كنتـوري يصـل بـين النقـاط متسـاوية المنسـوب ويكـون موازيـاً لسـطح الأرض ويكـون اتجـاه عجلـة الجاذبيـة متعامـداً علـى هـذا السـطح في أي مـكان علـى سـطح الأرض. ولكـن هـذا غيـر حقيقـي؛ لأن قيمـة واتجـاه الجاذبيـة الأرضيـة تختلـف مـن مـكان لآخـر علـى سـطح الأرض حسـب التغيـرات في خـط العـرض والتضاريس وكثافـة طبقـات الأرض. وبالتالـي فـإن شـكل سـطح الجيوئيـد لـن يكـون منتظمـاً بـل سـيكون شـديد التعـرج والتمـوج، وبالتالـي يصعـب وصفـه بمعـادلات رياضيـة مثـل سـطح Ellipsoid؛ ولـذا يلـزم قياسـه بدقـة باسـتخدام قياسـات الجاذبيـة الأرضيـة الدقيقـة.



أسطح تساوى الجهد واتجاه عجلة الجاذبية متعامدة في أي مكان على سطح الأرض.

ولمعرفة العلاقة بين سطح الجيوئيد والجاذبية الأرضية يجب معرفة الفرق بين:

- سطح أو نموذج Spheroid.
- الجيوئيد Geoid.
- الشاذة التثاقلية Gravity Anomaly.
- شاذة الجيوئيد Geoid Anomaly.
- تعرجات الجيوئيد (Geoid Undulations).

سطح أو نموذج Spheroid: لو افترضنا أن سطح الأرض Smooth وتركيبها متجانس Homogenous، وبالتالي لا يوجد تغير أفقي في الكثافة وأن شكل الأرض ليس كروياً وإنما شكلها مفلطح أو بيضوي Ellipsoidal فإن سطح الأرض في هذه الحالة يسمى Spheroid

الشاذة التثاقلية Gravity Anomaly:

الفرق بين قيمة الجاذبية المقاسة في أي مكان (g) وقيمة الجاذبية المتوقعة عند هذا المكان (γ) لنموذج Spheroid. $\Delta g = g - \gamma$

شـــاذة الجيوئيـــد Geoid Anomaly

هـي الفـرق بـين الجهـد التثاقلـي عنـد سـطح البحـر (الجيوئيـد) وقيمـة الجهـد التثاقلـي المتوقعـة عنـد هـذا المـكان طبقـاً لنمـوذج Spheroid

تعرجات الجيوئيد (Geoid Undulations): هـي تعرجـات أو تموجـات في سـطح Geoid تنتـج مـن الاختلافـات الأفقيـة في كثافـة مـادة الأرض

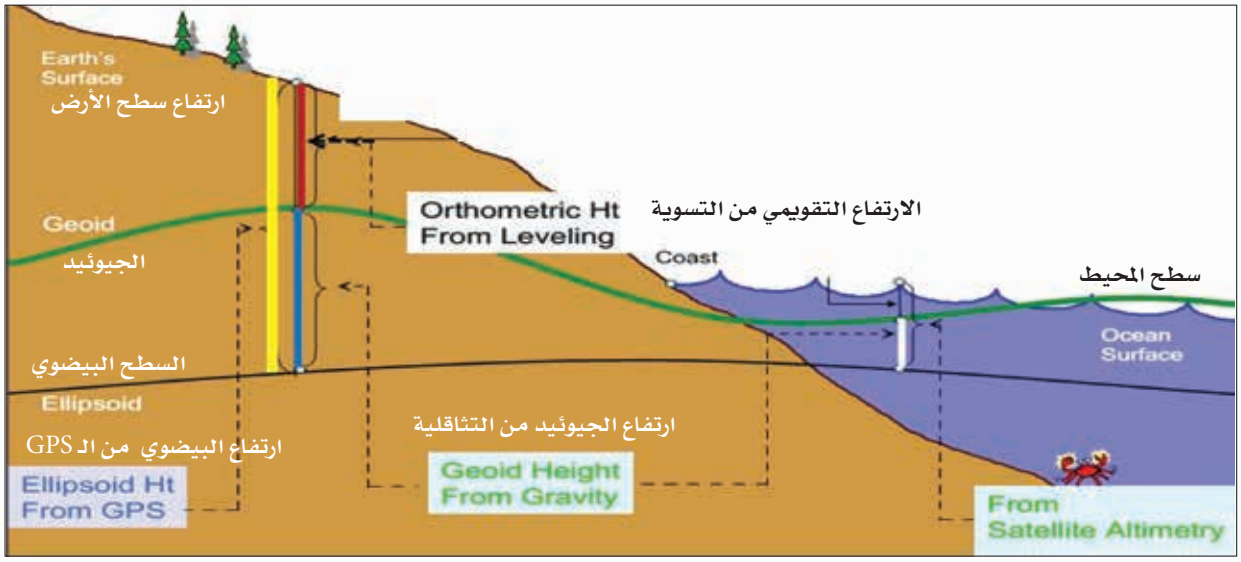
وكمـا ذكـر سـالفاً بـأن سـطح الجيوئيـد هـو سـطح تسـاوى الجهـد التثاقلـي ويكون دائمـاً وفـى أي مـكان علـى سـطح الأرض متعامـد مـع اتجـاه الجاذبيـة الأرضيـة. وبالتالـي يعتبـر هـو المرجـع الطبيعـي للارتفاعـات. ولمعرفـة علاقـة سـطح الجيوئيـد بالارتفاعـات يجـب معرفـة الفـرق بـين ارتفاعـات الأسـطح التاليـة:

سطح Spheroid: هـو شـكل افتراضـي لسـطح الأرض لـو افترضنـا أن سـطحها Smooth وتركيبهـا متجانـس Homogenous وشـكلها بيضـوي Ellipsoidal ولا يوجـد تغيـر أفقـي في الكثافـة.

Ellipsoid Height: هـي قيمـة الارتفـاع المقاسـة باسـتخدام GPS وهـى قيمـة ارتفـاع سـطح الأرض بالنسـبة لسـطح Spheroid أو Ellipsoid.

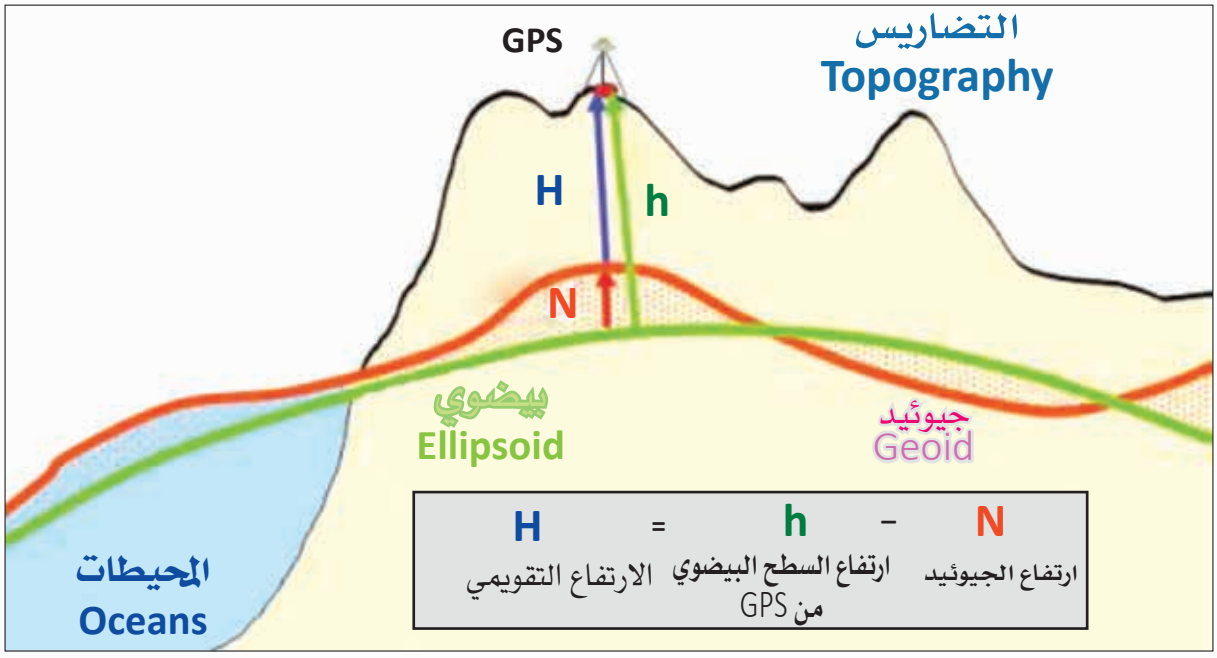
Orthometric Height: ارتفاع سطح الأرض بالنسبة لسطح الجيوئيد.

Geoid Height: هـي ارتفـــاع ســـــطح Geoid بالنسـبة لسـطح Spheroid أو Ellipsoid أي يعكـس تموجـات وتعرجـات سـطح الجيوئيـد(Geoid Undulations) .



علاقة سطح الجيوئيد بالارتفاعات

إذا كلما حددنا قيمة Geoid Height أو التموج في سطح Geoid بدقة كلما أمكننا تحديد قيمة Orthometric Height بدقة أيضاً وهذا هو الغرض من مسوحات الجاذبية الخاصة بالجيوئيد.



تحديد قيمة Orthometric Height

محيـط الأرض وقطـرها

لقد دفع الإقرار بكروية الأرض بالعلماء للتعامل مع الأرض على أساس أنها كرة مثالية وتامّة التكوّر، وبالتالي فإنّ مسقط هذه الكرة هو دائرة يمكن تطبيق كل المعارف والقوانين الهندسية النظرية عليها. ومن هنا أمكن حساب محيطها ونصف قطرها، وبالتالي أمكن إجراء الكثير من التطبيقات واسعة النطاق. لذلك يمكننا اعتبار قياس محيط الأرض Earth's Circumference وقطرها إحدى أهم نتائج كروية الأرض. وقد كانت هناك عدة محاولات عبر التاريخ لمعرفة هذه القيمة، لأنها تسهّل على الفلكيين والمسَّاحين الكثير من الحسابات.

أجريت مسوحات جيوديسية دقيقة خلال القرن التاسع عشر في إنجلترا وروسيا والنرويج والسويد وألمانيا والهند والبيرو. وأخيراً، فإن القياسات العابرة للقارات، التي أنجزتها هيئة المسح الجيوديسي والساحلي الأمريكية في عام 1897م، قدمت مساهمة أبعد وأكثر أهمية في معرفتنا بحجم وشكل الأرض. ومن الواضح أن القوس الموازي لخط العرض قد يضيف إضافات إلى هذه المعرفة، بالإضافة إلى قوس من خط الزوال. ففي الحالة الأولى، تكمن المشكلة الفلكية في إيجاد الفرق في خط الطول بين أطراف القوس المقاس؛ أما في الأخير فإنّ الاختلاف المقابل يكون في خط العرض.

العمليات الجيوديسية المناسبة، أي معرفة عدد الأميال والقدم والبوصة لمحطة من محطة أخرى تُجرى بواسطة نظام من القياسات غير المباشرة يسمى (التثليث Triangulation) وهي طريقة مخصصة لتحديد الأجزاء المجهولة للمثلثات من مثلثات معلومة. إذْ عندما تُعرف قيمة ضلع واحد وزاويتان في

نهايته، يمكننا معرفة قيمة الأضلاع الأخرى، بغض النظر عن النسب النسبية لهذه الأضلاع. من الواضح إذاً أنه إذا جرى قياس طول ضلع قصير، فيمكن العثور على طول الضلع الطويل من خلال عملية حسابية رياضياتية أبسط بكثير وأقل ملالاً وأكثر دقة. إذاً التثليث هو عملية إيجاد المسافة الدقيقة بين نقطتين بعيدتين عن طريق توصيلهما بسلسلة أو شبكة من المثلثات. يسمى الضلع القصير من المثلث الأساسي، الذي يجري قياسه بالفعل، قدماً إثرَ قدم، بالقاعدة. ورغبة بالحصول على دقة كبيرة، غالباً ما يجري قياس القاعدة عدة مرات. بعد ذلك يجب فقط قياس الزوايا الأفقية في الغالب؛ ويتم هذا الجزء من العمل بآلة التلسكوب السمتي الارتفاعي Altazimuth

ونتيجةً لمثل هذه الأعمال، وجد أن طول أقصر قطر للأرض، أو المسافة بين القطبين، هو 12640 كيلو متراً. أما في مستوى خط الاستواء، يبلغ قطر الكرة الأرضية 12683.2 كيلو متراً، أو أكبر بنحو 300 جزء من القطر بين القطبين. هذا الجزء أقل بقليل من انحراف الأرض أو انضغاطها القطبي. وتشير القياسات الأخيرة إلى أن خط الاستواء نفسه بيضوي الشكل قليلاً. لذلك يمكن اعتبار شكل الأرض بمثابة شكل بيضوي بثلاثة أقطار أو محاور غير متساوية. ومن خلال معرفة أطوال هذه الأقطار، أمكن حساب حجم الأرض ووجد أنه يبلغ 260 مليار ميل مكعب.

من الناحية التاريخية فقد يعود الفضل إلى **الكلدانيين** في إجراء التقدير الأول لمحيط الأرض (38400 كيلومتراً)، لكن من الموثّق لدينا أن الهنود واليونانيين والعرب والأوروبيين قد بذلوا جهوداً مهمة أيضاً.

لقد تغيّرت قيمة محيط الأرض بين اليونانيين الذي حسبوا قيمتها بين القرنين الرابع قبل الميلاد والثاني بعد الميلاد نجملها في الجدول الآتي، علماً أن محيط الأرض الحالي الوسطي (40033 كيلو متراً)، ونصف قطرها (6372 كيلو متراً):

العالم	المحيط (بوحدة كيلومتر)	نصف القطر (بوحدة كيلومتر)
أرسطو	70796	11267
أرخميدس	523800	83251
إيراتوستنيس	42895	6827
بوسيدنيوس وبطليموس	25750	7066

طبعاً كانت وحدة القياس المستخدمة عند اليونانيين هي (الستاد أو ستاديون كما يكتبها البعض)، التي ترجمها العرب بلفظ (غُلْوَة). ونظراً لكون وحدة الستاد اليونانية غير ثابتة القيمة عبر العصور، فقد أدى ذلك لاختلاف قيمة المحيط ونصف القطر سواء عند اليونانيين أو عند من أخذ عنهم من العرب والمسلمين لاحقاً. وهو أمر يلقي بالضوء على مشكلة عدم توحيد الوحدات والمقاييس في تلك العصور. ويُعتقد أن القيمة التي حصل عليها إيراتوستنيس هي الأقرب للقيمة الحالية. إذْ كان كل 1 ستاد يعادل 600 قدم يوناني (582 = قدم إنكليزي = 174.6 متر).

لقد كان حساب محيط الأرض الذي يُعزى إلى هرمس Hermes معروفاً لدى إبراهيم بن حبيب الفزاري (توفي حوالي 180هـ /796م)، وقد قدّر هذا المحيط

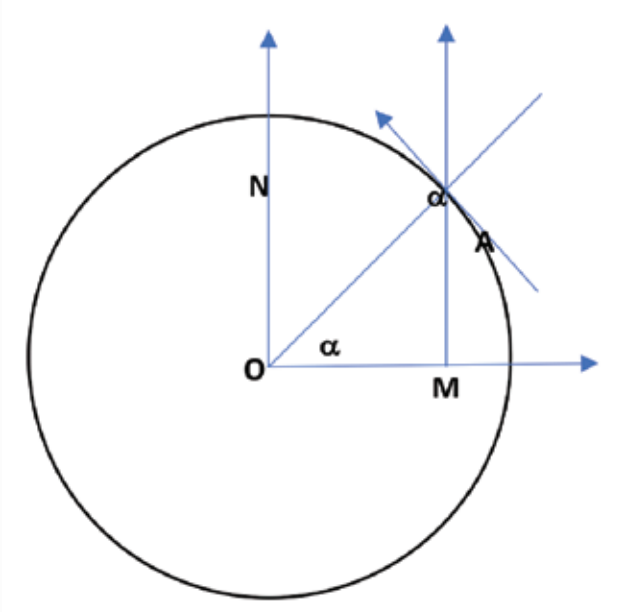
بـ (9000 فرسـخ)، وبلـغ طـول درجـة علـى خـط الاسـتواء 25 فرسـخاً، حيـث إن الفرسـخ الواحـد يعـادل 3 أميـال أو 5919 مترا، وبالتالـي فـإن قيمـة محيـط الأرض عنـد هرمـس هـي (53271 كيلومتـراً). يبـدو أن الفـزاري قـد اعتمـد علـى مصـادر فارسـية حتـى حصـل علـى هـذه المعلومـات.

وقـد ذكـر الإدريسـي أن هرمـس قـدر محيـط الأرض بالقيمـة (36 ألـف فرسـخ = 213084 كيلومتـراً)، وهـي تعـادل أربعـة أضعـاف القيمـة التـي وردت عنـد الفـزاري. حيـث قـال: «وأمـا هرمـس فإنـه قـدر إحاطـة الأرض وجعـل لـكل جـزء مائـة ميـل (فـ) تكـون بذلـك سـتة وثلاثـين ألـف ميـل، وتكـون مـن الفراسـخ اثنـي عشـر ألـف فرسـخ وبـين خـط الاسـتواء وكل واحـد مـن القطبـين تسـعون درجـة واسـتدارتها عرضـاً مثـل ذلـك». وقبـل الإدريسـي سـبق أن أكّـد لنـا البيرونـي علـى قيمـة (9000 فرسـخ) المنسـوبة إلـى هرمـس، إذ قـال: «وأمـا الفـزاري فذكـر في زيجـه، أن دور الأرض عنـد الهنـد سـتة آلاف وسـتمائة فرسـخ، علـى أن الفرسـخ سـتة عشـر ألـف ذراع. وأنـه عنـد هرمـس تسـعة آلاف فرسـخ، علـى أن الفرسـخ اثنـا عشـر ألـف ذراع. فتكـون حصـة الجـزء الواحـد مـن ثلاثمائـة وسـتين – بحسـب قـول الهنـد- مـن الفراسـخ ثمانيـة عشـر وثلـث، فـإن كان كل واحـد منهـا ثلاثـة أميـال كانـت للجـزء الواحـد خمسـة وخمسـين ميـلاً، وكل ميـل خمسـة آلاف وثلاثمائـة وثلاثـة وثلاثـين ذراعـاً وثلـث. وبحسـب قـول هرمـس خمسـة وعشـرين فرسـخاً، تكـون خمسـة وسـبعين ميـلاً، كل واحـد أربعـة آلاف ذراع. ثـم زعـم الفـزاري أن بعـض الحكمـاء قـدّر لـكل جـزءٍ مائـة ميـل، فصـارت اسـتدارة الأرض اثنـي عشـر ألـف فرسـخ».

مـع التوصـل إلـى توافـق بـين رأيـي فيثاغـورس وأرسـطو بشـأن شـكل الأرض علـى أنـه كـروي، تحـول التركيـز إلـى تقديـر حجمهـا. وأفـاد أرسـطو أن الجهـود قـد

بذلت بالفعل لحساب المحيط - ربما من خلال المواضع المختلفة للنجوم عند النظر إليها من خطوط عرض مختلفة - وقدم لنا أحد أقدم تقدير موجود وهو (400000 ستاد). وإذا اعتبرنا أن قيمة الستاد نحو 500 قدم (كما ذكرنا هذه نقطة خلافية لأن القياسات لم تكن موحدة)، سنحصل على القيمة 39000 أو 40000 ميل (64000 -62400 كيلومتراً) عند خط الاستواء.

ويمكن تلخيص طريقة أرسطو في حسابه لمحيط الأرض كما يأتي: بفرض أن كوكب الأرض كرة تامّة التكوّر، وأن النجوم تدور حولها على بُعد كبير عنها حول محور يمرّ في كل من نجم القطب الشمالي الثابت، ومركز الأرض الثابت، عندها فإن الزاوية التي يصنعها تقاطع هذين المحورين عند نقطةٍ ما على سطح الأرض (النقطة A) هي:

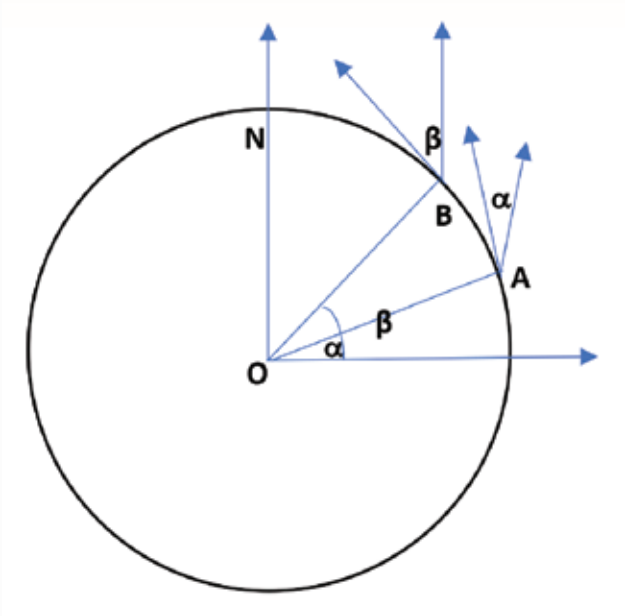


$$\alpha + \angle MAO = 90^\circ$$

$$\angle AOM + \angle MAO = 90^\circ$$

$$\angle AOM = \alpha$$

وإذا نظرنـا إلـى النقطتـين (A, B) علـى خـط طـول واحـد علـى سـطح الأرض، وبقيـاس الزاويتـين اللتـين يصنعهمـا نجـم القطـب مـع الأفـق عنـد هاتـين النقطتـين.



$$\theta = \beta - \alpha$$

$$\frac{AB}{C} = \frac{\theta}{2\pi}$$

$$C = \frac{2\pi(AB)}{\beta - \alpha}$$

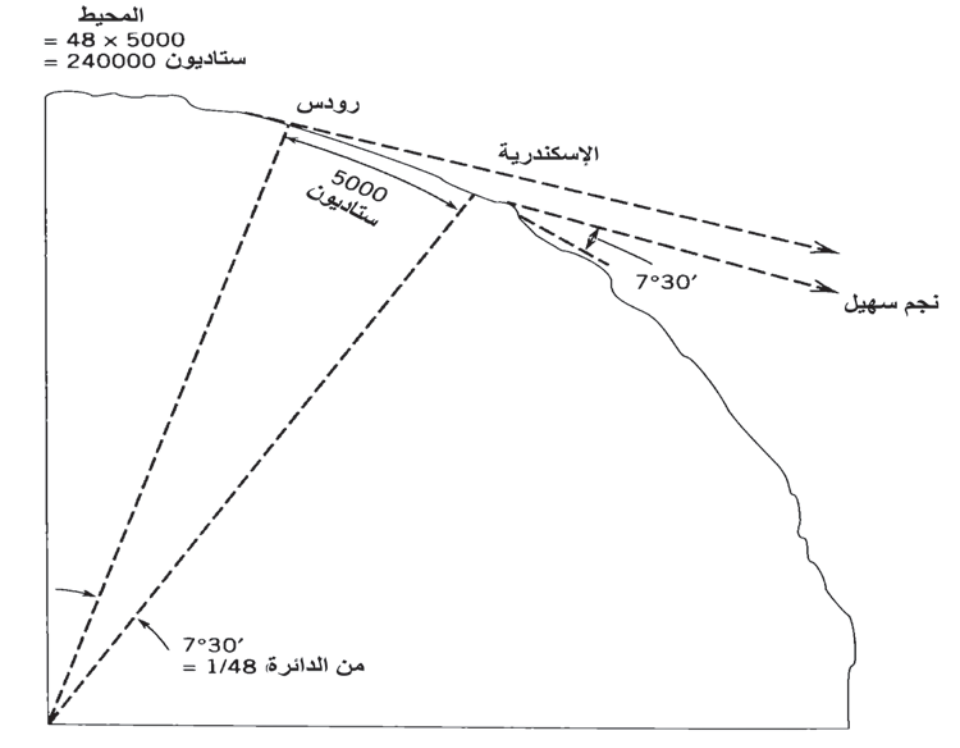
حيث:

C محيط الأرض.

θ الزاوية التي يقطعها المسافر من النقطة A إلى النقطة B.

وبذلـك وصـل أرسـطو إلـى أن نصـف قطـر الأرض هـو (400000 سـتاد)، في حـين قـدره أرخميـدس بالقيمـة (300000 سـتاد).

بعـــد قـرن مـن قيـــاس إيراتوستيـــس قـام بوسـيدينوس Poseidonius (تـوفي 51 ق.م) بإجـراء قيـاس آخـر لنصـف قطـر الأرض. لكنـه اسـتخدم أسـلوباً مختلفـاً وجيـداً مفترضـاً بالتأكيـد أن الأرض كرويـة للحصـول علـى قيمـة قريبـة مـن (240 ألـف سـتاد). فقـد لاحـظ أن نجـم سـهيل Canopus كان في الأفـق عنـد مشـاهدته مـن جزيـرة رودس، بينمـا كان ارتفاعـه في الإسـكندرية 48/1 مـن الدائـرة (7° ‘30). حيـث قـدرت المسـافة بـين المدينتـين بـ (5000 سـتاد)، ولكـن بمـا أن الميـاه تفصـل بينهمـا، فقـد يكـون هـذا ناتجـاً فقـط عـن تقديـرات البحـارة. كمـا هـو الحـال مـع إيراتوسـثنيس، كانـت الزاويـة التـي اسـتخدمها بوسـيدونيوس خاطئـة بشـكل كبيـر، في الواقـع بنسـبة 2، وكانـت المسـافة بعيـدة بنحـو 30% إلـى 40%. ومـع ذلـك، كانـت الأخطـاء تعويضيـة، أي جُمِـعَ بـين الزاويـة الصغيـرة جـداً والمسـافة الطويلـة جـداً لإعطـاء نتيجـة مقبولـة بالصدفـة. ويـروي سـترابون أن نتيجـة قيـاس بوسـيدونيوس كانـت (180 ألـف سـتاد)، أي أقـل ممـا ذكـر أعـلاه.



اعتمد بوسيدونيوس على نجم سهيل بدلاً من الشمس في قياسه لمحيط وقطر الأرض

نظـــراً لاعتقاد العالم الهنـــدي **براهما ســـيدهانتا** أو براهمـــا جوبتـــا Brahma Siddhanta (توفي نحو 668م) بكروية الأرض، فقد قدّر أن محيطها هو (5000 يوجانا)، وتعادل اليوجانا Oyojana الواحدة (7.2 كيلو متراً)، أي أن قيمة محيط الأرض وفق حساباته هي (36000 كيلو متراً) ومن ذلك يمكن حساب اختلاف المنظر الأفقي للقمر والمسافة من الأرض، فالأخير هو (51566 يوجانا ≅ حوالي 404800 كيلو متراً)، وهو رقم جيد بشكل ملحوظ مقارنةً بالقيمة الحالية.

مـن الناحيـة الهندسـية البحتـة، فقـد خـصّ العلمـاء العـرب دراسـة الأشـكال المختلفـة للكـرة بعلـم قائـم بذاتـه هـو (علـم الأكـر)، وقـد لاحظـت أن العلمـاء العـرب والمسـلمين كانـوا يسـتخدمون في كل كتاباتهـم مصطلـح (دور الأرض) ليعبّـروا بـه عـن مصطلـح (محيـط الأرض) المتـداول حاليـاً.

حسـب تقديـرات معظـم المؤرخـين الـذي درسـوا بدقـة مـا قـام بـه العلمـاء العـرب والمسـلمين في قيـاس محيـط وقطـر الأرض، فـإن العـرب نجحـوا إلـى حـدٍ بعيـد باسـتخدام تقنياتهـم الرصديـة وطرائقهـم الحسـابية بشـكلٍ أفضـل مـن أسـلافهم الفـرس والهنـود واليونانيـين. ويـرى بعـض الباحثـين أن القياسـات العربيـة لمحيـط الأرض كانـت أدق مـن القياسـات اليونانيـة، فقـد زاد تقديرهـم لدرجـة العـرض عـن الحقيقـة بنحـو 877 متـراً، في حـين زاد قيـاس إيراتوسـثنيس لدرجـة العـرض عـن الحقيقـة بنحـو 1575 متـراً.

ويعتقـد بعـض الباحثـين أن جميـع العلمـاء العـرب اعتمـدوا الطريقـة الجيوديسـية التـي تتلخـص بتعيـين طـول قـوس مـن خـط الطـول في عـروض مختلفـة. والتـي اسـتبدلت لاحقـاً مـن قِبـل الأوروبيـين فيمـا بعـد بطريقـة (التثليـث) أي حسـاب المثلثـات غيـر المباشـرة، التـي وضعهـا عالـم الفلـك والفيزيائـي الفرنسـي جـان بيـكار J. Picard (تـوفي 1682م). ومـن ثـم أدخلـت طريقـة الجاذبيـة التـي تعتمـد علـى حسـاب فروقـات الجاذبيـة بـين مختلـف الأماكـن علـى سـطح الأرض لكـن البحـوث الحديثـة أثبتـت أن البيرونـي كان علـى معرفـة تامـة بطريقـة (التثليـث)، وقـد طبقهـا عمليـاً بـين بغـداد وغزنـة.

يعـدّ تقديـر قطـر الأرض عنـد يعقـوب بـن طـارق (تـوفي 179هـ /796م) مـن أوائـل التقديـرات العربيـة التـي وصلتنـا قبـل بعثـة فريـق المأمـون بأكثـر مـن عشـرين سـنة.

حيث إنه افترض أن قطرها (21000 فرسخ)، ومحيطها (6597 فرسخاً). على اعتبار أن طول الفرسخ (16000 ذراع) أي نحو (8 كيلومترات) (سزكين - تاريخ التراث العربي).

نعلم جميعاً أن المأمون (توفي 218هـ/ 833م)، قد قام باستكمال مسيرة العلم وتطبيقاته التي سبق وأن بدأها عمه الخليفة أبو جعفر المنصور (توفي 158هـ / 775م) ووالده هارون الرشيد (توفي 193هـ / 809م)، ولكن بزخم أكبر مما كان عليه الحال في عهدهما. ذكرنا سابقاً أن تقديرات محيط الأرض وقطرها كانت معروفة في الحضارات السابقة وحتى عند بعض العلماء العرب مثل يعقوب بن طارق. حتى إن عم المأمون جعفر المنصور، قد سبق وأن قام بتجربة لقياس الدرجة الأرضية والاستفادة منها في تحديد حجم الأرض ومحيطها (عفيفي 1977). لكن أخبار هذه التجربة وفريق العمل الذي قام بها والقيمة التي توصلوا إليها غير معروفة بالوثائق بالنسبة لنا.

ذات يوم رغب المأمون أن تجري عملية القياس لمحيط الأرض وقطرها. ويبدو أن الدوافع الكامنة وراء تلك الرغبة كانت:

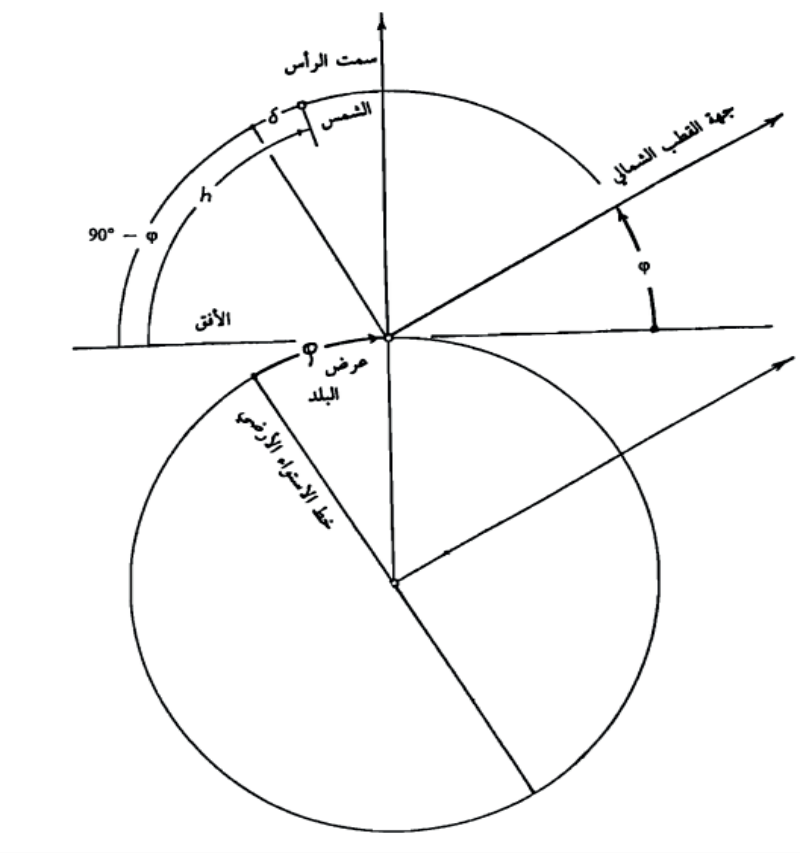
- **التحقق من قيمة خط الطول المقابل لدرجة واحدة التي سبق وأن وردت عند اليونانيين.**
- **ضبط قيمة (الستاديا) التي وردت عند أرسطو.**
- **التحقق من كروية الأرض بالقياس.**
- **ومن نتيجة القياسات السابقة حساب المسافة بين مكة وبغداد بشكلٍ دقيق.**

وهـي أهـداف علميـة وتطبيقيـة كمـا نلاحـظ، وهـي تضاهـي - دون مبالغـة - البعثـة الفرنسـية التـي سـتقوم بهـا الأكاديميـة الفرنسـية بعـد عمـل المأمـون بنحـو 900 سـنة.

اشـترك في فريق الإشـراف محمد بن موسـى الخوارزمي (توفي 232هـ/ 846م)، مؤسـس علم الجبـر الشـهير. وقـد أكـد البيرونـي مشـاركة الخوارزمـي ضمـن فريـق الرصـد الـذي شـكله المأمـون، إضافـة لأبنـاء موسـى بـن شـاكر (البيرونـي 1992). طبعـاً بـدأت عمليـة القيـاس بالانطـلاق مـن نقطـة مركزيـة، حيـث اتجهـت المجموعـة الأولـى نحـو الشـمال واتجهـت المجموعـة الثانيـة نحـو الجنـوب وبذلك تغيـرت الزوايا الرأسـية للنجـم القطبـي بمقـدار 1°. وقـد جـرى قيـاس المسـافات باسـتخدام حبـال طويلـة معقـودة، ويشـير مؤرخـون آخـرون إلـى قيـاس المسـافة التـي قطعهـا الفرسـان في وقـت معـين. وقـد جـرى قيـاس المسـافات بالأميـال العربيـة بنتيجـة مقبولـة تبلـغ 56 أميـال عربيـة لـ 1°، والمكافـئ لذلـك (111073 كيلومتـراً) أي أن محيـط الأرض وفقـاً لقياسـاتهم بآلاتهـم العلميـة في ذلـك الوقـت قـد بلـغ (39986 كيلـو متـراً)، وهـي قريبـة جـداً مـن القيمـة الحاليـة (40000 كيلـو متـراً) بفـارق بسـيط جـداً قـدره (14 كيلـو متـراً فقـط).

ويـرى بعـض المؤرخـين أن كريسـتوف كولومبـوس قـد اسـتخدم نتيجـة فريـق بعثـة المأمـون لكنـه افتـرض أنـه أخذهـا بالأميـال الإيطاليـة (الرومانيـة) وليـس بالأميـال العربيـة، لأن الفـرق بينهمـا حوالـي 25% وهـو صغيـر جـداً. وبالتالـي، فـإن الإبحـار غربـاً مـن أوروبـا نحـو أمريكا باسـتخدام أرقامـه سـيتطلب السـفر فقـط 60° خـط طـول و 2750 ميـلاً، بينمـا كان ينبغـي أن يكـون 220° و 12000 ميـل. يمكـن وضـع العديـد مـن السـيناريوهات الأخـرى، لكنهـا تشـير ضمنـاً إلـى أن المسـافة المتجهـة

غربـاً كانـت أقصـر بكثيـر بينمـا كانـت في الواقـع أطـول بكثيـر. مـن المحتمـل أن كولومبـوس لـم يقلـل مـن حجـم الأرض فحسـب، بـل بالـغ أيضـاً في تقديـر حجـم المنطقـة المعروفـة باسـم العالـم الصالـح للسـكن (Smith1997).



يساوي ارتفاع نقطة الأوج في دائرة الاستواء السماوي تمام ارتفاع القطب الشمالي، وارتفاع القطب الشمالي يساوي عرض البلد. ولتحديد خط العرض φ يجب أن نعلم h ارتفاع الشمس الزوالي (أي ارتفاع الشمس عند مرورها فوق خط زوال مكان الراصد في يوم معين)، وكذلك يجب أن نعلم ميل الشمس δ في لحظة الرصد، ومن ثمَّ يُحسب خط العرض من المعادلة الآتية التي تتحقق في مناطق الكرة الشمالية من الأرض $\varphi = 90° - (h - \delta)$

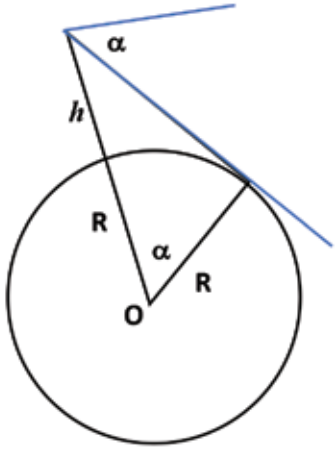
في الواقع، لقد طلب المأمون من فريق البعثة قياس عدة خطوط (ربما 4 خطوط) حول بغداد والرقة. ويرى الباحث أنور العقاد أن سبب طلب المأمون القيام بأكثر من قياس هو اعتقاده بأن «الأرض كرة غير منتظمة»، مخالفاً بذلك اعتقاد إيراتوستينيس الذي قال بأن الأرض كرة نموذجية (العقاد 1983). وإذا كان المأمون يقصد بها حالة التفلطح فعلاً، فإنه سيكون بهذا الافتراض قد سبق إسحق نيوتن، كما سبقه ثابت بن قرة أيضاً، مع فارق تحديد السبب بينهما؛ فقد قال نيوتن: «إن مادة الأرض لا تتأثر بالجاذبية نحو مركزها فحسب، وإنما تتأثر أيضاً بالقوة الطاردة المركزية الناشئة عن دورانها حول نفسها، وهذا القوة تبلغ ذروتها عند خط الاستواء».

قدّر محمد بن أحمد الخوارزمي (توفي نحو 387هـ/ 997م) أنّ «قطر الأرض سبعة آلاف فرسخ». أي (41433 كيلومتراً)، في حين أن قطر الأرض وفق بعثة فريق المأمون هو (12734.3949 كيلومتر) وهي كما نلاحظ أنه يزيد بـ (3.25 مرة). أيضاً لا نجد مبرراً لعدم اعتماد الخوارزمي لقيمتهم التي حسبوها لمحيط الأرض، وإنما اعتمد قيمة أرخميدس (7036 فرسخاً).

قال إخوان الصفا: «وبعد الأرض من السّماء من جميع جهاتها متساو، وأعظم دائرة في بسيط الأرض (25455 ميلاً و6855 فرسخاً)، وقطر هذه الدّائرة هو قطر الأرض (6551 ميلاً و2167 فرسخاً) بالتقريب». وهذا يعني أن إخوان الصفا قد قدروا قيمة قطر الأرض بـ (12826.473 كيلو متراً) وهي قريبة من القيمة الحديثة (12668 كيلو متراً)، وقريبة من قيمة بعثة المأمون.

مع كل الجهود الكبيرة التي قام بها فريق بعثة المأمون في قياس محيط الأرض، فإن أبا الريحان البيروني (توفي 440هـ/ 1048م) لم يكن راضٍ عنها.

فقد اطلع على كل الروايات التي تحدثت عن جهود فريق البيروني، وقارن فيما بينها وحاول أن يتحقق منها ووصل إلى نتيجةٍ مفادها أنهم غير متفقين على رأي واحد. ولعل هذا هو السبب الذي دفع البيروني لوضع طريقته (التي تسمى حالياً طريقة انحطاط الأفق المرئي Horizon Depression Method) (السويسي 1985). لقياس نصف قطر الأرض في كتابه (تحديد نهايات الأماكن لتصحيح مسافات المساكن) ويقصد بالانحطاط: الزاوية التي تقع تحت خط الأفق. وقد اختار وقت قياسها عند مغيب الشمس، حيث تكون حدّة أشعة الشمس مكسورة تماماً، إضافةً لتجنب أخطاء الرصد الناجمة عن انكسار أشعة الضوء في الغلاف الجوي للأرض. وقد افترض وجود جبلٍ بمحاذاة البحر، وعندما تغيب الشمس يمكن للمرء قياس الزاوية التي يصنعها رأس الجبل مع خط الأفق (α). ثم يقيس الارتفاع العمودي للجبل (h)، ومنه يستخرج نصف قطر الأرض كما يأتي:



$$cos\alpha = \frac{R}{R+h}$$

$$R.cos\alpha + h.cos\alpha = R$$

$$R = \frac{h.cos\alpha}{1-cos\alpha}$$

وبعد إجراء تطبيق عملي حصل البيروني على القيمة: 25000 ميل، وهي قيمة قريبة من القيمة الحالية (غصيب) لأن البيروني اعتبر أن كوكب الأرض كرة مثالية، في حين أنها بيضوية الشكل وليست تامة الكروية.

وقد اكتشف الباحث رايموند ميرسر أن البيروني ما كان لينجح في حساباته لمحيط الأرض لولا أنه طبّق طريقة التثليث – التي ستُنسب إلى الفرنسي جان بيكارد لاحقاً – عندما أراد تحديد خط طول مدينة غزنة، معتمداً على معرفته لقيمة خط العرض والمسافات التي قدمها له المسافرون. فقد تمكّن البيروني من القيام بالتحويل المثلثاتي للمسافات التي قدمها له المسافرون إلى إحداثيات حقيقية .

ان المَعْلَمْ الحقيقي في تطوير طريقة التثليث كان التقنية التي استخدمها ويلبرد سنيل W. Snellius (توفي 1626م) في عشرينيات القرن السادس عشر. وقد لاحظ سنيل أن بين بيرخن أوب زووم وألكمار في هولندا، مخطط تثليث مع خمسة خطوط أساسية في محيط ليدن. انحرفت هذه التقنية عن جميع المقاييس القوسية السابقة حيث يمكننا تحديد المسافة بين النقاط الطرفية بشكل غير مباشر وليس بشكل مباشر. أي بدلاً من قياس أكثر من 100 كيلو متراً بواسطة شريط أو حبل، كل ما هو مطلوب هو قياس خط واحد على الأقل بدقة شديدة (في حالة سنيل، متوسط الخطوط 1300 متر) لحساب طول قوس يبلغ نحو 130 كيلو متراً .

بحلول نهاية القرن السادس عشر وأوائل القرن السابع عشر، جرت العديد من القياسات والحسابات المتضاربة فيما يتعلق بشكل الأرض في أوروبا، وقد أثر هذا التضارب بدوره على تقديرات حجم الأرض. بالتزامن مع تأسيس

الجمعيـة الملكيـة في لنـدن والأكاديميـة الملكيـة للعلـوم في باريـس، توجهـت البعثـات الأوروبيـة إلـى الخـارج. كان لهـا اختصاصـات واسـعة، مثـل ملاحظـات اهتـزازات الرّقّـاص (البنـدول) علـى ارتفاعـات مختلفـة وفي خطـوط عـرض مختلفـة، والتغيـر في سـرعة الصـوت وتغيـر الضغـط الجـوي مـع الارتفـاع. اقترحـت هـذه الملاحظـات، جنبـاً إلـى جنـب مـع نظريـات إسـحاق نيوتـن، أن الأرض يجـب أن تكـون مسـطّحة عنـد القطبـين ومنتفخـة عنـد خـط الاسـتواء. بالتـوازي مـع هـذه الأنشـطة تقريبـاً، جـرى قيـاس العديـد مـن الأقـواس الطويلـة في فرنسـا. اقترحـت جميـع قياسـات القـوس الفرنسـي تسـطيحاً اسـتوائياً بـدلاً مـن التسـطيح عنـد القطبـين.

مفهوم شكل الأرض عند العلماء العرب والمسلمون

بخصوص كروية الأرض أو تسطيحها، فإنني لم أتوصل لوثيقة أو نص (شعري أو نثري) يدلّنا على معرفة أو مناقشة العرب قبل الإسلام لهذا الموضوع، ويبدو أنّه لم يكن هذا الأمر يعنيهم كثيراً، وإنما كان يهمهم البحث عن أماكن يتوفر المطر فيها ومياه الشرب والمرعى الذي يؤمن لهم سبل الحياة بأبسط أشكالها، في حين أننا سنجد أن الحال قد تغيّر بعد الإسلام مع المسلمين الأوائل الذين أدركوا أهمية شكل الأرض بالنسبة لهم كونه يؤثر في إقامة شعائر الإسلام من صلاة وحج وصيام. لذلك ومنذ السنوات الأولى لنزول القرآن الكريم فهم المسلمون من قوله تعالى ﴿يُكَوِّرُ ٱلَّيۡلَ عَلَى ٱلنَّهَارِ وَيُكَوِّرُ ٱلنَّهَارَ عَلَى ٱلَّيۡلِ﴾ [سورة الزمر، الآية 5]، أنّ اتخاذ الليل أو النهار شكلهما الكروي دلالةً على أنهما يسقطان على سطح كروي وليس على أي مجسم فراغي آخر، وقد جاء في (المنتخب من التفسير) الذي أصدره المجلس الأعلى للشؤون الإسلامية بالقاهرة: «تشير هذه الآية الكريمة إلى أن الأرض كروية وتدور حول نفسها، لأن مادة التكوير معناها لفّ الشيء على سبيل التتابع، ولو كانت الأرض غير كروية – مسطّحة مثلاً- لخيّم الليل أو النهار على جميع أجزائها دفعةً واحدةً». وقد كانت العرب تقول «كوَّرَ فلانٌ عمامتهُ على رأسهِ» أي أنّ الرأس شكله كروي، واستمدت العمامة كرويتها من الرأس. فالتَّكوير يعني الاستدارة، ولا معنى لاستدارة الليل والذي هو الظّلمة لولا كرويّة الأرض حيث تستدير الظّلمة حول الوجه المستدبر للشّمس، ويستدير الضّوء حول الوجه المستقبل للشّمس، ولأنّ الأرض في حالة دوران حول نفسها اقتضى ذلك أن يتحوّل الضوء من جهة إلى جهة أخرى فيكون في الموقع الذي كانت الظلمة تغشاه، وبذلك يُصبح

الموقـع الـذي كان الضّـوء يغشـاه مظلمًـا، فليـس لموقـع الضّـوء ثبـات كمـا أنّـه ليـس لموقـع الظّلمـة ثبـات، بـل كلٌّ مـن الليـل والنّهـار يتعاقبـان علـى كلٍّ مـن وجهَـي الأرض (العمـري و بصمـه جـي 2021).

صحيـح أن مـدى رؤيـة العـين محـدود جـداً، مقارنـة بسـعة الأرض، أي إن تقـوس الأرض لا يظهـر للرائـي علـى الإطـلاق بالعـين، وذكـر التسـطح لسـهولة تمييـزه، وفي ﴿ وَٱلۡأَرۡضَ مَدَدۡنَٰهَا وَأَلۡقَيۡنَا فِيهَا رَوَٰسِيَ وَأَنۢبَتۡنَا فِيهَا مِن كُلِّ شَيۡءٖ مَّوۡزُونٖ ﴾ [سورة الحجر، الآية 19]، مددناهـا بمعنـى بسـطناها، ونحـن نـرى الأرض مبسـوطة أمامنـا فـلا تناقـض بـين القـرآن الكـريم وبـين الظاهـر الموجـود. فالأرض أمامك مبسـوطة... فهـي مبسـوطة أمـام البشـر جميعـاً في كل موقـع يوجـدون فيـه... وهـذا لا يمكـن أن يحـدث إلا إذا كانـت الأرض كرويـة، فلـو كانـت الأرض مسـطحة أو مربعـة أو مثلثـة في أي شـكل مـن الأشـكال لوصلنـا فيهـا إلـى حافـة، وحيـث إنـه لا يمكـن أن تصـل فيـه إلـى حافـة فالشـكل الوحيـد الـذي تـراه مبسـوطاً أمامـك، ولا يمكـن أن تصـل فيـه إلـى حافـة هـو أن تكـون الأرض كرويـة.

ومـن الإشـارات القرآنيـة الواضحـة علـى كرويـة الأرض إشـارة القـرآن إلـى تعـدد المشـارق والمغـارب في قولـه تعالـى: ﴿بِرَبِّ ٱلۡمَشَٰرِقِ وَٱلۡمَغَٰرِبِ﴾ [سورة المعارج ، الآية 40]، فـلا يحصـل هـذا التعـدد إلا بكرويـة الأرض، إذ تشـرق وتغـرب في كل وقـت علـى أماكـن مختلفـة بصفـة مسـتمرة ومتكـررة.

وكمـا ورد في القـرآن الكـريم أيضـا لفـظُ «دَحَاهَـا» وهـو أبلـغ لفـظ لوصـف حالـة الفلطحـة أو الشـكل الإهليجـي الحقيقـي الـذي هـو عليـه شـكل الأرض، مـع أن قواميـس اللغـة تفسّـر كلمـة «دحاهـا» بمعنيـين الأول: سـطّحها، والثانـي: كورهـا؛ لكـن المعنـى الـذي يعبّـر عـن حقيقتهـا الفعليـة هـو أنهـا كمثريـة الشـكل (علـى شـكل إجاصـة)، أو لهـا شـكل إجاصـة مفلطحـة، وليسـت كرويـة تمامـاً.

فالعرب أدركوا منذ نزول القرآن الكريم عليهم كروية الأرض، أي قبل عصر الترجمة بمائة سنة على الأقل، كما أننا سنجد أنّ بعضهم بقي متمسكاً بفكرة الأرض المسطحة الوافدة من اليونانية ولم يتخلَّ عنها حتى بعد نقل أدلة كروية الأرض عن فيثاغورس وأرسطو وبطليموس وشيوعها.

في الواقع وجدنا أنه ظهر اتجاهان لدى العلماء العرب المسلمين:

الاتجاه الأول: هو قولهم بالأرض المسطحة، وهو ما نجده عند قلّةٍ قليلةٍ من علماء الكلام أمثال أبو علي الجبائي وتلميذه أبو رشيد النيسابوري، وقد لاحظنا أن هذا الاتجاه قد أفل نجمه لأكثر من 700 سنة، ثم عاد للظهور مع نشر كتاب جلال الدين السيوطي (الهيئة السَّنِية في الهيئة السُّنِّية) وشروحات أتباعه عليه، أمثال مرعي بن يوسف الكرمي المقدسي (توفي 1033هـ/ 1623م) في كتابه (بهجة الناظرين وآيات المستدلين)، وإبراهيم القرماني الآمدي (كان حياً عام 1046هـ/ 1654م) في كتابه (علم الهيئة على اعتقاد أهل السنة والجماعة دون الفلاسفة)، إذْ كان حينها الإنتاج العلمي العربي في علم الفلك النظري والرصدي قد تراجع بشكل جاد، ليحلّ البديل النقلي عنه، بحيث يمكن للأجيال الجديدة فهم الكون وأسراره من خلاله.

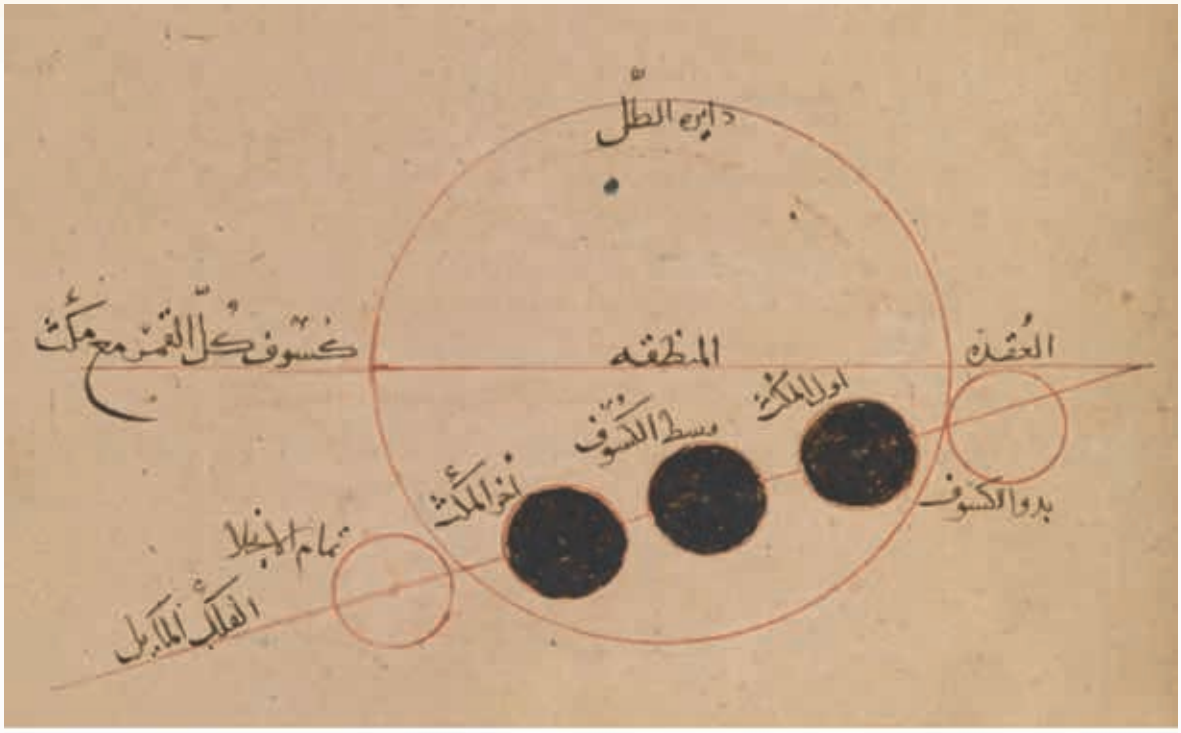
أما الاتجاه الثاني: فهو الذي اعتمد كروية الأرض وساق كل الأدلة العلمية والواقعية الممكنة على حقيقتها، وهو الاتجاه الذي تبناه السواد الأعظم من علماء الفلك والجغرافيا والطبيعة وحتى علماء الدين الذين لم يقتنعوا بتوجهات علماء الكلام أو السيوطي وأتباعه، وذلك بدءاً من القرن 8م وحتى أواخر القرن 19م. وسنقوم باختصار بتقديم كل ما وصلنا من آراء للعلماء العرب والمسلمين مع النصوص التراثية القصيرة حول كروية الأرض.

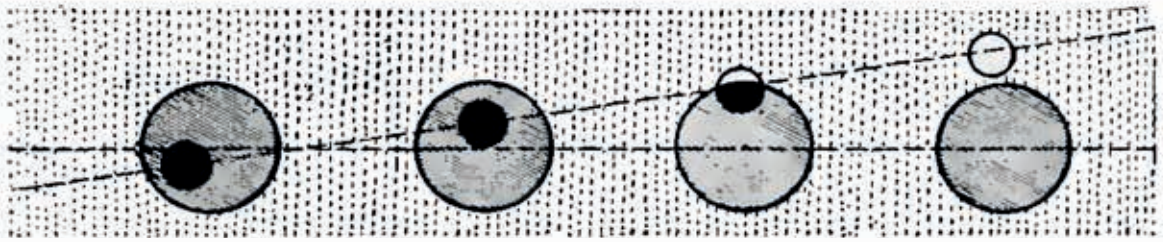
ناقش أبو إسحق الكندي (توفي 252هـ/ 866م) موضوع كروية الأرض في ثلاث رسائل الأولى: (كتاب الكندي في الصناعة العظمى)، والثانية: هي (رسالة الكندي إلى أحمد بن المعتصم في أنّ العناصر والجرم الأقصى كروية الشكل)، والثالثة: هي (رسالة في أن سطح ماء البحر كروي) (ابن النديم، 1997م). بينما تناول أبو بكر الرازي (توفي 311هـ/ 923م) موضوع كروية الأرض في كتابه (هيئة العالم) (ابن أبي أصيبعة، 1965م)، كما توصّل في كتابه (سبب تحرّك الفلك على استدارة) إلى كروية الأرض وأنّ الأرض تفوق بحجمها القمر، في حين أن حجمها يقلّ كثيراً عن حجم الشمس.

قرر أبو القاسم عبيد الله بن أحمد بن خرداذبة (توفي نحو 280 هـ / نحو 893م) أن «صفة الأرض أنها مدوّرة كتدوير الكرة، موضوعة في جوف الفلك كالمحّة في جوف البيضة والنسيم حول الأرض وهو جاذب لها من جميع جوانبها إلى الفلك». لكنه لم يورد في كتابه أي دليل على كروية الأرض.

وثّق لنا الإمام فخر الدين الرازي (توفي 606هـ / 1210م) مناقشة علمية دقيقة منسوبة إلى ثابت بن قرة (توفي 288هـ / 901م) تتعلق بكروية الأرض. إذْ مضى ثابت بشكل أعمق من الآخرين، سواء منهم السابقين أو اللاحقين، حول منشأ كروية الأرض أصلاً، وليس البحث في أدلة كرويتها. وقد توصل بعد تفكير منطقي أن الجاذبية هي المسؤول الأول عن تكوّرها. وهذا تقدم قوي في نظرية كروية الأرض؛ إذْ لم يسبق لأحد أن أشار بشكل مباشر إلى دور قوة الجاذبية في تكوّر الأرض، وهو الدور الذي سيعود له نيوتن لاحقاً ليبرزه مرة أخرى في القرن 18م.

اقتنع **ابن الحائك الهمداني** (توفي 334هـ /945م) بأن الأرض كروية، قال الهمداني: «اعلم أن الأرض ليست بمنسطحة، ولا ببساط مستوي الوسط والأطراف، ولكنها مقببة، وذلك التقبيب لا يبين مع السعة، إنما يبين تقبيبها بقياساتها إلى أجزاء الفلك، فيقطع منها أفق كل قوم على خلاف ما يقطع عليه أفق الآخرين طولاً وعرضاً في جميع العمران، ولذلك يظهر على أهل الجنوب كواكب لا يراها أهل الشمال، ويظهر على أهل الشمال ما لا يراه أهل الجنوب ويكون عند هؤلاء نجوم أبدية الظهور والمسير حول القطب، وهي عند أولئك تظهر وتغيب، وسأضع لك في ذلك مقياساً بيناً للعامة، من ذلك أن ارتفاع سهيل بصنعاء وما سامتها إذا حلق، زيادة على عشرين درجة، وارتفاعه بالحجاز قرب العشر، وهو بالعراق لا يُرى إلا على خط الأفق، ولا يُرى بأرض الشمال، وهناك لا تغيب بنات نعش، وهي تغيب على المواضع التي يُرى فيها **سهيل**، فهذه شهادة العرض. وأما شهادة الطول فتفاوت أوقات بدء الكسوفات ووسطها وانجلائها على خط فيما بين المشرق والمغرب، فمن كان بلده أقرب إلى المشرق كانت ساعات هذه الأوقات من أول الليل والنهار أكثر؛ ومن كان بلده أقرب إلى المغرب كانت ساعات هذه الأوقات من آخر الليل وآخر النهار منكوسا إلى أولهما أكثر، فذلك دليل على تدوير موضع المساكن والأرض، وأن دوائر الأفق متخالفة في جميع بقاع العامر، ولو كان سطح الأرض صفيحة، لكان منظر **سهيل** وبنات نعش واحداً».





استدل الهمداني وغيره من العلماء العرب والمسلمين على كروية الأرض من خلال سقوط ظل القمر عند الخسوف على الأرض (هي حجة سبق وأن طرحها فيثاغورس وأرسطو من قبل)، حيث يبدو الظل قرصاً دائرياً طبعاً يحدث خسوف القمر فقط عند اكتمال القمر، عندما يظهر القمر في مواجهة الشمس في السماء. في حين أن اكتمال القمر هو شرط ضروري لخسوف القمر، إلا أنه ليس شرطًا كافياً، لأن خسوف القمر لا يحدث عند كل اكتمال للقمر. لماذا هذا؟ يميل المستوى المداري للقمر بما يزيد قليلاً على خمس درجات إلى مستوى مدار الأرض حول الشمس (نسمي المستوي المداري للأرض مسار الشمس (The ecliptic) (Faulkner, D.

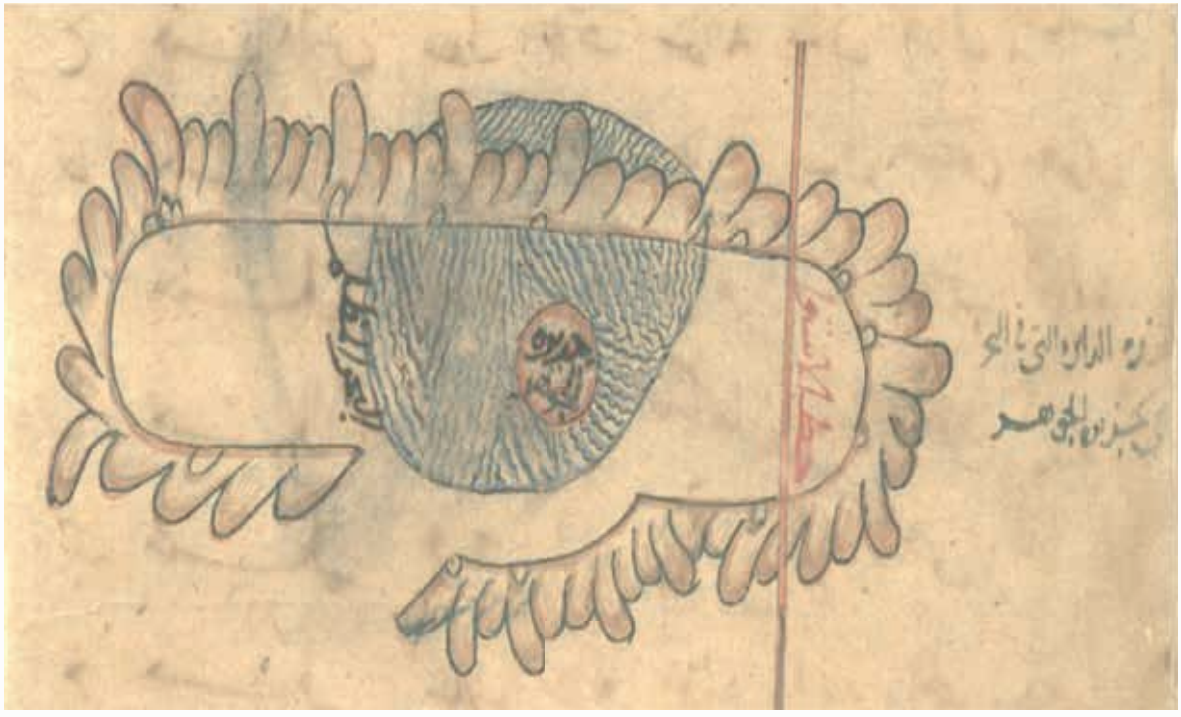
اعتمد أبو نصر محمد الفارابي (توفي عام 339 هـ/950م) في إثباته لكروية الأرض على كروية العناصر الأربعة (التراب، الماء، الهواء، النار) التي تقع بين كرة الأرض وكرة القمر؛ حيث قال: «وشكل كلّ واحدٍ من الأربعة على شكل كرةٍ»، ويتابع:» والعالم يركّب من بسائط صائرة كرة واحدة».

اقتنع ابن الحائك الهمداني (توفي 334هـ /945م) بأنّ الأرض كروية، وقد ساق الأدلة المعروفة في ذلك، لكنه حاول تطبيقها في حالة البلدان العربية بدلاً من إطلاق الأدلة بشكل عام. بينما قال الهمداني: «اعلم أنّ الأرض ليست بمنسطحة، ولا ببساط مستوي الوسط والأطراف، ولكنها مقببة، وذلك التقبيب لا يبين مع السعة، إنما يبين تقبيبها بقياساتها إلى أجزاء الفلك، فيقطع منها أفق كل قوم على خلاف ما يقطع عليه أفق الآخرين طولاً وعرضاً في جميع العمران، ولذلك يظهر على أهل الجنوب كواكب لا يراها أهل الشمال، ويظهر على أهل الشمال ما لا يراه أهل الجنوب ويكون عند هؤلاء نجومٌ أبديةُ الظهور والمسير حول القطب، وهي عند أولئك تظهر وتغيب،

تعرفنا على رأي محمد بن أحمد الخوارزمي (توفي نحو 387هـ/ 997م) عن كروية الأرض من خلال ما كتبه عنه تقي الدين المقريزي (توفي 845هـ/ 1442م) إذْ قال: «وقال محمد بن أحمد الخوارزمي: الأرض في وسط السماء، والوسط هو السفلي بالحقيقة، وهي مدوّرةٌ مضرسةٌ من جهة الجبال البارزة والوهاد الغائرة، وذلك لا يخرجها عن الكريّة إذا اعتبرت جملتها لأن مقادير الجبال وإن شمخت يسيرة بالقياس إلى كرة الأرض، فإن الكرة التي قطرها ذراع، أو ذراعان مثلاً إذا أنتأ منها شيء أو غار فيها لا يخرجها عن الكرية، ولا هذه التضاريس لإحاطة الماء بها من جميع جوانبها وغمرها، بحيث لا يظهر منها شيء» (المقريزي، 1997م).

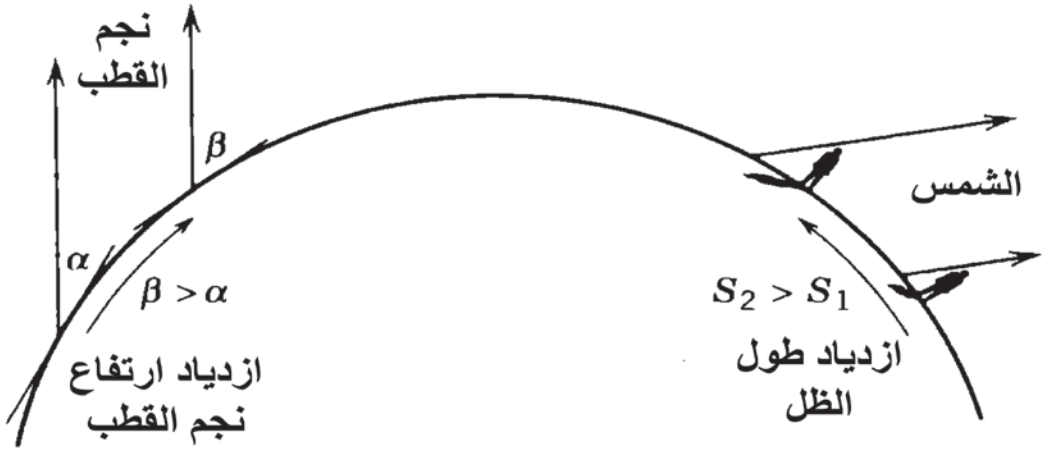
ويشـير هنـا الخوارزمـي إشـارةً مهمـةً وهـي أنّ التضاريـس والمعالـم الطبيعيـة المنتشـرة علـى سـطح الأرض لا تمنـع أنْ تجعـل الأرض كرويّـة الهيئـة، ويسـتعين لتأكيـد هـذه الفكـرة بتشـبيه مبسّـط هـو أنّ الكـرة التـي قطرهـا نحـو 50 سـنتيمتراً لـن تؤثـر النتـوءات التـي تنتشـر علـى سـطحها في كرويتهـا في شـيء.

كان محمـد بـن موسـى الخوارزمـي (تـوفي 232هـ/ 846م) يقـرّ بكرويـة الأرض، وإن لـم أعثـر علـى نـص صريـح لـه بذلـك، لكننـي اسـتنتجته مـن كتابـه (صـورة الأرض) الـذي اعتمـد فيـه علـى جغرافيـة بطليمـوس. إذْ كثيـراً مـا يكـرر عبـارة (كـرة الأرض) في عناويـن الكتـاب.



هيئة الأرض كما رسمها الخوارزمي في كتابه (صورة الأرض). حيث تحيط البحار باليابسة المدوّرة في الوسط

أورد أحمد بن محمد بن كثير الفرغاني (توفي بعد 237هـ / 851م) عدداً من الأدلة التي أثبت فيها كروية الأرض. وهي أدلة ورد بعضها عند فيثاغورس وأرسطو وبطليموس، لكن الدليل الجديد الذي أضافه الفرغاني ذلك المتعلق بالشهب. حيث إنه وجد أن رصده يختلف بين الراصد الذي يكون في المشرق والآخر الذي يكون في المغرب (الفرغاني 1970).



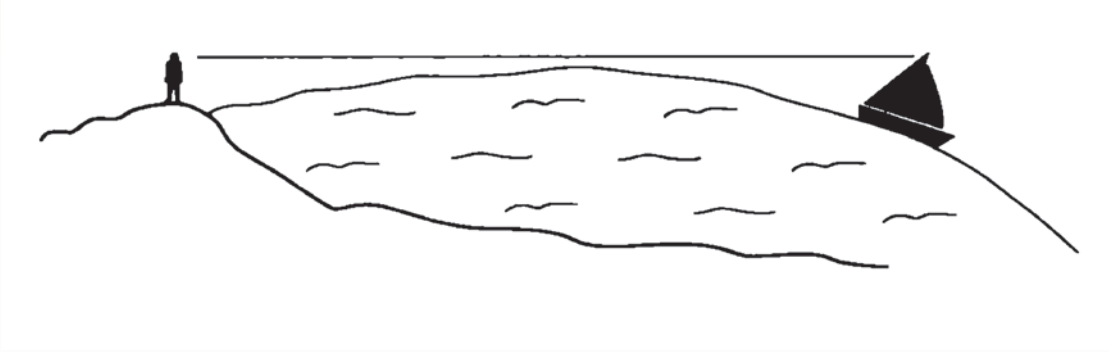
عند السفر نحو الشمال

من الأدلة التي أوردها الفرغاني على كروية الأرض أنه عند السفر نحو الشمال فإن طول ظل الشخص الواقف تحت أشعة الشمس يزداد. ولكن إذا سافر الشخص نحو الشرق أو الغرب فإن نجم القطب سيبقى كما هو على الارتفاع نفسه، لكن لو سافر نحو الشمال فإنه يصبح أكثر أو الجنوب فإنه يصبح أقل (Smith 1997)

استدلّ أبو بكر محمد حسن الكرجي (توفي بعد 406هـ/ 1015م) على كروية الأرض عملياً من خلال البحار، وقد برهن على ذلك منطقياً من خلال موازاة سطح البحر لسطح اليابسة ولم يكن هناك أي جريان أو تدفق للمياه نحو اليابسة. ثم قدم لنا الكرجي رده على أنّ تكوّر الأرض يقتضي حركتها بشكل أبدي، وبالتالي فإن الماء الموزع على سطحها يتحرك أيضاً بشكل أبدي. حيث قال: إن تضرّس سطح الأرض هو السبب في سكونها وعدم حركتها. لكن ووجدنا أن الخوارزمي لم يُعر أية أهمية لمسألة التضاريس وتأثيرها في شكل كروية أو سكونها وحركتها.

قام الحسن بن الهيثم (توفي نحو 430هـ / نحو 1038م) بتكرار الرأي نفسه حول كرويّة الأرض وانتشار التضاريس على سطحها وسكونها في مركز العالم، حيث قال: «وشكل الأرض بكلّيتها وجميع أجزائها شبيه بالكرة، لكن سطحها ليس بصحيح الاستدارة بل فيه تضاريس ليس للذي يعرض فيه من تأثيرات الأجرام السماوية، إلا أنّ ذلك ليس بمبطلٍ لكرويتها ولا يخرجها عن شكلها، بل هي بالإضافة إلى جملتها كالخشونة العارضة في سطح بعض الأكر الصغار؛ فالأرض بجملتها كرةٌ مستديرةٌ مركزها مركز العالم وهي مستقرّة في وسطه، ثابتةٌ فيه غير منتقلةٍ إلى جهةٍ من الجهات، ولا متحركة بضربٍ من ضروب الحركات بل هي دائمة السكون.

قرّر ابن سينا (توفي 428هـ / 1037م) كرويّة الأرض، لأنّ «الأجسام الفلكية تعمّها جميعاً الجسمية والشكل المستدير والحركة على الاستدارة، وإنّ فعالها بالطبيعة لا بالقصد، فإن ما يقع عنها إنّما يقع من طبيعة حركاتها وقواها، إلا أنها عالمة بما يقع من حركاتها وشكلها بأشكالها المختلفة وممازجاتها.



أعاد ابن سينا حجة أرسطو في اختفاء السفينة بعد خط الأفق عندما ينظر إليه مراقب من الشاطئ وهي تبحر مبتعدةً عنه (Smith 1997)

بينما ردّ أبو الريحان البيروني (توفي 440هـ/ 1048م) على من يقول إنّ شكل الأرض أسطوانياً، سواءٌ من الهنود أو اليونانيين، وقال بأنّ هذا غير ممكنٍ، وإلا لبرز الربع الجنوبي المقاطر للربع الشمالي عن الماء (البيروني، تحديد نهايات الأماكن لتصحيح مسافات المساكن، 1962م)، وهو ما لم نشاهده في الواقع، ثم أورد البيروني أدلّة بطليموس في إثبات كروية الأرض، ويبدو أنّه كان مقتنعاً بها نظراً لمنطقها العقلي السليم، فهو لم يقدم أي اعتراض عليها (البيروني، القانون المسعودي، 1954م). كما أننا نلاحظ أنّ البيروني قد تبنى رأي محمد بن أحمد الخوارزمي في شكل الأرض وتوزع المعالم الجغرافية عليها.

أشار البيروني أيضاً إلى حالات التقعُّر والتحدّب والاستقامة التي يُستدلّ من خلالها على كروية الأرض، وقد أثبت أن الامتداد في اتجاهات الشرق والغرب والجنوب والشمال محدّب الشكل وليس مستقيماً ولا مقعّراً. إذْ لو كان الامتداد

مـن الشـرق إلـى الغـرب مستقيماً لشـاهد جميـع سـكان البـلاد القاطنـين في هـذا الاتجـاه شـروق الأجـرام السـماوية في الوقـت نفسـه، ولـو كان الامتـداد مقعـراً، أي منحنيـاً إلـى الداخـل لاختلفـت أوقـات الشـروق بشـكل فعلـي بـين بلـدٍ وآخـر، ولـكان سـكان البـلاد الغربيـة سيشـاهدون شـروقها قبـل البـلاد الشـرقية؛ وفي حـال التحديـب الشـبيه بسـطح كـرة فـإن مـا يحـدث هـو مشـاهدة سـكان البـلاد الشـرقية للأجـرام قبـل الغربيـة (أحمـد، 1960م).

قـدم لنـا محمـد بـن أبـي بكـر الزهـري الغرناطـي (تـوفي بعـد 541هـ/ 1154م) أدلـة كرويـة الأرض، سـواء النقلـي منهـا أو العقلـي. وهـي بمجملهـا تكـرار لمـا سـبق وأن طرحـه العلمـاء السـابقون.

قـال الزهـري الغرناطـي: «لأن الأرض كرويـة، والجغرافية بسـيطة، لكنهم بسـطوا الإسـطرلاب، وكمـا بسـطوا هيئـات الكسـوف في دواوينهـم، ليعلـم الناظـر فيهـا جميـع أجزائهـا وأصقاعهـا وحدودهـا وأقاليمهـا وبحارهـا وأنهارهـا وجبالهـا ومعمورهـا وقفرهـا وحيـث تقـع كل مدينـة مـن مدائنهـا في شـرقها وغربهـا وبنظـر الناظـر مكان أعاجيبهـا ومـا في كل جـزء مـن الأعاجيـب المشـهورة والمبانـي الموصوفـة بالقـدم في أقطارهـا». وقـد «اختلـف النـاس ممـن سـلف وخلـف أن الأرض كرويـة. ومنهـم مـن قـال إنهـا سـطح. فأمـا مـن قـال إنهـا سـطح فـلا يقـوم لـه بُرهـان، غيـر أنـه تعلّـق بقولـه تعالـى: ﴿وَٱلۡأَرۡضَ بَعۡدَ ذَٰلِكَ دَحَىٰهَآ﴾ [سـورة النازعـات، الآيـة 30]، تأويـل هـذه الآيـة لا يفقهـه إلا أهـل العلـم. ولـو أن اللّه تعالـى دحـى الأرض لمـا اسـتقر عليهـا أحـد. وهـو قولـه عـز وجـل: ﴿لِّتَسۡلُكُواْ مِنۡهَا سُبُلٗا فِجَاجٗا﴾ [سـورة نـوح، الآيـة 20]،، وأمـا مـن قـال إنهـا كرويـة فلـه في ذلـك البراهـين الواضحـة والدلائـل البينـة منهـا:

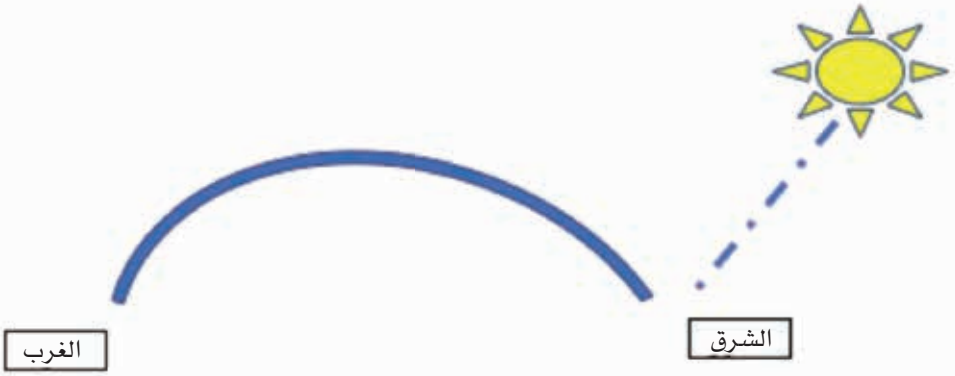
- جري الماء على الأرض،
- واختلاف النظر في الفلك،
- وقِصر الظلّ،
- وقصر الليل وطول النهار وإيلاج بعضها في بعض،
- واختلاف درج المطالع،

ولو كانت الأرض سطحية لم يكن في الفلك من هذا كله شيء ولكان الليل والنهار على حدٍّ واحد طول الدهر. واختصرنا الكلام في هذا إذ هذا موضعه»

لخص الجغرافي البارز محمد بن محمد بن عبد الله بن إدريس الإدريسي (توفي 560هـ / 1165م) أقوال السابقين حول كروية الأرض دون أن يقدم لنا الجديد، وقال: «إنّ الذي تحصّل من كلام الفلاسفة وجلّة العلماء وأهل النظر في علم الهيئة أن الأرض مدوّرة كتدوير الكرة والماءُ لاصقٌ بها وراكد عليها ركوداً طبيعياً لا يفارقها والأرض والماء مستقران في جوف الفلك كالمحة في جوف البيضة ووضعهما وضع متوسطٍ والنسيمُ محيطٌ بهما من جميع جهاتهما وهو لهما جاذب إلى جهة الفلك أو دافع لهما والله أعلم بحقيقة ذلك» (الإدريسي، 1989م).

في حال كانت الأرضُ مسطحةً فإن جميع السكان يشاهدون الشروق في الوقت نفسه

لو كانت الأرضُ مقعرة الشّكل لشاهد سكان البلاد الغربية الشروق قبل سكان البلاد الشرقية



باعتبار أن الأرض محدّبة الشكل فإن سكان الشرق يشاهدون الشروق قبل سكان الغرب

أورد الجغرافي الشهير ياقوت الحموي (توفي 626هـ / 1229م) آراء من سبقه حول شكل الأرض، سواءٌ من اليونانيين أو العلماء العرب والمسلمين وعلى مختلف فرقهم: فلاسفة ومتكلمين؛ لكنه يميل لتبني رأي محمد بن أحمد الخوارزمي فقط، وهو أنّ الأرض كروية تنتشر عليها التضاريس والمعالم الصخرية المختلفة التي تسمح بتوزع الماء بشكلٍ مختلف على سطحها (الحموي، 1995م).

ناقش قطب الدين الشيرازي (توفي 710هـ / 1310م) كروية الأرض وما يحيط بها من الماء بشكل موسّع ومفصّل في كتابه (نهاية الإدراك في دراية الأفلاك). لكنه في البداية انطلق من فرضيات أنها غير مكوّرة، ثمّ نقضها، ثم بين أنها كروية. وقد كان عرضه أفضل من عرض الكثيرين الذين سبقوه؛ لأنه اعتمد البرهان بطريقة نقض الفرض، وهي طريقة منطقية تجعل من الحجة قوية.

كان محمد بن إبراهيم بن يحيى بن علي الأنصاري الكتبي، المعروف بالوطواط (توفي 718هـ / 1318م) مقتنعاً بكروية الأرض والسماء وكل الأجرام السماوية، وقد استقى براهينه من العلماء السابقين. فقد ركّز على مثالي تأخر رؤية الخسوف بين الراصد المشرق والمغربي، واختلاف منظر النجوم المرصودة في المكان نفسه.

أقرّ الشيخ شمس الدين أبو عبد الله محمد بن أبي طالب الأنصاري الدمشقي المعروف بشيخ الربوة (توفي 727هـ/ 1327م) بأن الأرض كروية فهي «كروية الشكل بالكلية، مضرّسة بالجزئية من جهة الجبال البارزة والوهدات الغائرة، ولا يخرجها ذلك من الكروية» (شيخ الربوة 1865). وأثر الخوارزمي واضح في طروحاته. ثم أورد أدلة كرويتها حسب ما وصله ممن سبقه: قالوا

والدليل على أنّ الأرض كروية الشكل مستديرة أن الشمس والقمر وسائر الكواكب لا يوجد طلوعها ولا غروبها على جميع النواحي في وقتٍ واحد، بل يُرى طلوعها في النواحي المشرقية من الأرض قبل طلوعها على النواحي المغربية، وغيبوبتها عن المغربية.

انضم أبو الفداء إسماعيل بن علي أبو الفداء (توفي 732هـ / 1331م) إلى القائلين بكروية الأرض، وقد ثبت له ذلك «بعدّة أدلّة منها: أن تقدّم طلوع الكواكب، وتقدّم غروبها للمشرقيّين على طلوعها وغروبها للمغربيّين يدلّ على استدارتها شرقا وغرباً، وارتفاع القطب والكواكب الشماليّة وانحطاط الجنوبية للواغلين في الشمال، وارتفاع القطب والكواكب الجنوبية وانحطاط الشمالية للواغلين في الجنوب.

أشار الفلكي محمود بن محمد بن عمر الجغميني (توفي 745هـ/ 1345م) إشارة مهمة تتعلق بكروية الأشياء عموماً، وكروية الأرض خصوصاً. وقد استنتج الجغميني أن الأرض كرة كاملة الاستدارة، لكنها مضرّسة بشكل جزئي بسبب الوهاد والجبال، لكن هذا التضريس لا يخرجها من كونها كروية نظراً لصغر الجبال مهما ارتفعت، فهي لن تكون أكثر من حبة شعير على بيضة.

انطلاقاً من ثقة عبد الرحمن بن خلدون (توفي 808هـ / 1406م) بآراء علماء الطبيعة نراه يُقرّ بكروية الأرض، ويحاول أن يصحح فكرة انتشار الماء على سطحها الخارجي تحديداً وليس تحتها. قال ابن خلدون: «اعلم أنّه تبين في كتب الحكماء الناظرين في أحوال العالم أن شكل الأرض كرويّ وأنّها محفوفةٌ بعنصر الماء كأنّها عنّبةٌ طافيةٌ عليه فانحسر الماء عن بعض جوانبها لما أراد

اللّه من تكوين الحيوانات فيها وعمرانها بالنوع البشري الذي له الخلافة على سائرها، وقد يتوهم من ذلك أنّ الماء تحت الأرض وليس بصحيح وإنّما التحت الطبيعي قلبٌ بالأرض ووسط كرتها الذي هو مركزها والكل يطلبه بما فيه من الثقل وما عدا ذلك من جوانبها، وأمّا الماء المحيط بها فهو فوق الأرض وإنْ قيل في شيء منها إنه تحت الأرض فبالإضافة إلى جهة أخرى منه» (ابن خلدون، 2004م).

تأرجح رأي أحمد بن علي بن عبد القادر المقريزي (توفي 845هـ/ 1441م) بين أن تكون الأرض كروية الأرض وقد لا تكون كروية، ولم يستقر على رأي محدد، لكنه يقرّ بأنها واقفة في مركز العالم. قال المقريزي: إن الأرض «جسمٌ مستدير كالكرة، وقيل: ليست بكروية الشكل وهي واقفة في الهواء بجميع جبالها وبحارها وعامرها وغامرها، والهواء محيط بها من جميع جهاتها كالمح في جوف البيضة وبعدها من السماء متساو من جميع الجهات وأسفل الأرض ما تحقيقه هو عمق باطنها مما يلي مركزها من أي جانب كان. ذهب الجمهور إلى أن الأرض كالكرة موضوعة في جوف الفلك كالمح في البيضة، وأنها في الوسط وبعدها في الفلك من جميع الجهات على التساوي» (المقريزي1997).

مفهـــوم شـكل الأرض عنـــد الأوروبيـين

لقـد رسـم كوسـماس إنديكوبليوتـس Cosmas Indicopleustes (تـوفي 550م)، وهـو يونانـي مـن الإسـكندرية، الأرض كمسـتطيل، أي أنّ طولهـا (شـرقاً وغربـاً) ضعف عرضها (شمالاً وجنوباً)، وهـي الفكرة التي نشأ منها مفهوم خط الطول (الطـول) وخـط العـرض (العـرض)؛ ومـن الزوايـا الأربـع لهـذه الأرض المسـتطيلة نشـأت أعمـدة وردية لدعـم قبـة السـماء. ربمـا اسـتوحى ذلـك مـن المعتقـدات المصريـة القديمـة القائمـة علـى الفكـرة نفسـها.

أعلـن بيـدي المكـرّم The Venerable Bede (تـوفي 735م) عـام 700م أنّ الأرض علـى شـكل بيضـة تطفـو في المـاء ومحاطـة بالنـار في كل مـكان. وفي كتابـه (حـول حسـاب الوقـت)، علّـم بيـدي بوضـوح عـن الأرض كرويـة.

اختلـف جوانـز إكسـارخ Joannes Exarch (تـوفي في القـرن 10م) بشـكل جـذري مـع وجهـة النظـر التوراتيـة حـول شـكل الأرض. وقـد قبـل وجهـة نظـر أرسـطو بـأن الأرض كرويـة. عـلاوة علـى ذلـك، جـادل مؤلفـين مثـل كوسـماس إنديكوبليوتـس الـذي كان يؤكـد أن الأرض مسـطحة، كمـا وجدنـا سـابقاً.

كـــان الكـون عند الفلكي البولنـــدي نيكـــولاس كوبرنيكوس N. Copernicus (تـوفي 1543م)، كلـه كـروي وليسـت الأرض فقـط، «لأن كل شـيءٍ يتجـه في العالـم نحـو التقيّـد بهـذا الشـكل، كمـا يتضـح في حالـة قطـرات الميـاه وغيرهـا مـن الأجسـام السـائلة، عندمـا تتحـدد ذاتيـاً».

لقـد بـات النقـاش مركّـزاً، منـذ منتصـف القـرن السـادس عشـر، علـى المواضـع والحـركات المفترضـة للكـرة الأرضيـة. كان محـور هـذا التطور هو عمـل كوبرنيكوس،

الـذي نشـر كتابـاً (حـول دوران الأجـرام السـماوية Revolution Bus) عـام 1543م. وبشـكل مثيـر للصدمـة، تحـدى الكتـاب الرؤيـة البطلميـة الأرسـطية لكـون (مركـزه الأرض)، وهـي الفكـرة التـي سـيطرت علـى علـم الفلـك حوالـي 1500 سـنة. وكبديـل لذلـك، افتـرض كوبرنيكـوس وجـود نظـام (مركـزه الشـمس)، حيـث أصبحـت الأرض مجـرد كوكـب آخـر في مـدار حـول الشـمس، بـدلاً مـن أن تكـون المركـز الثابـت للكـون كموضـوع لخلـق اللّه الخـاص.

في عام 1616م، وإدراكاً منها للتأثير المحتمل في تفسير الكتاب المقدس، حظرت الكنيسـة الكاثوليكيـة الكتـب التـي جادلـت لصالـح حركـة الأرض. ومـع ذلـك، جـرى استكشـاف أطروحـة كوبرنيكـوس وتوسـيعها مـن قبـل عالـم الرياضيـات الألمانـي يوهانـس كيبلـر J. Kepler (تـوفي 1630م)، الـذي اكتشـف أن الكواكـب لا تتبـع مسـاراً دائريـاً حـول الشـمس، كمـا كان يعتقـد كوبرنيكـوس، ولكنهـا تتحـرك علـى مسـار قطـع ناقـص. في هـذه الأثنـاء، في إيطاليـا، كان غاليليـو غاليليـه يسـتخدم التلسـكوب لإجـراء عـدد مـن الاكتشـافات التـي تتناقـض مـع النظـام الأرسـطي ومـع الدليـل التجريبـي علـى أنّ كـون كوبرنيكـوس شمسـي المركـز.

بعدهـا أشـار مارتـن لوثـر M. Luther (تـوفي 1546م) في تعليقـه علـى سـفر التكويـن، مؤكـداً أن الأرض كرويـة. كمـا أنـه كثيـراً مـا أشـار إلـى أرسـطو في تعليقـه. حيـث أكّـد أرسـطو بوضـوح أن الأرض كرويـة،

يخلـط أصحـاب الأرض المسـطحة باسـتمرار بـين مركزيـة الشـمس وكرويـة الأرض، ويدمجونهـا مـع الأسـاطير التـي نسـجت حـول كولومبـوس مـع قضيـة غاليليـو غاليليـه بعـد أكثـر مـن قـرن بقليـل. ففـي عـام 1543م، بعـد نصـف قـرن مـن رحلـة كولومبـوس، نشـر نيكـولاس كوبرنيكـوس كتابـه (حـول دوران الأجـرام السـماوية)،

الـذي روج فيـه لنظريـة مركزيـة الشـمس. وعلـى عكس الاعتقـاد الخاطـئ الشـائع، لـم يُحظـر علـى الفـور مـن قبـل الكنيسـة الكاثوليكيـة الرومانيـة. وإنمـا قُـرِأَ عمـل كوبرنيكوس علـى نطـاق واسـع وأثـار الكثيـر مـن النقـاش. كان غاليليـو غاليليـه أحـد الذيـن تحولـوا إلـى نظريـة مركزيـة الشـمس. في عـام 1610م، نشـر غاليليـو كتابـه (الرسـول النجمـي The Starry Messenger)، حيـث شـارك بأرصـاده التلسـكوبية عـن أطـوار كوكـب الزهـرة والأقمـار الأربعـة التـي تـدور حـول كوكـب المشـتري، التـي دعمـت نمـوذج مركزيـة الشـمس ودحضـت النمـوذج البطلمـي المتمركـز حـول الأرض، جنبـاً إلـى جنـب مـع الجوانـب ذات الصلـة بالفيزيـاء الأرسـطية المهيمنـة. أثـار هـذا الكتـاب، مـع تعليـم غاليليـو المسـتمر لنظريـة مركزيـة الشـمس، بعـض المعارضـة، ولكـن ليـس مـن قبـل اللاهوتيـين، كمـا يعتقـد معظـم النـاس. وإنمـا كان مـن قبـل العلمـاء الآخريـن المعارضـين لغاليليـو، لأنـه إذا كان نمـوذج مركزيـة الشـمس صحيحـاً، فإنـه سـيقلب النمـوذج البطلمـي، وهـو علـم الكونيـات السـائد لمـدة 15 قرنـاً.

نشـر غاليليـو كتابـه (حـوار حـول نظامـين) روج هـذا الكتـاب مـرة أخـرى لمركزيـة الشـمس، وهـذه المـرة علـى شـكل نقـاش بـين ثلاثـة أشـخاص، اثنـان مـن دعـاة النمـوذج الكوبرنيكـي، وواحـد مدافـع عـن النمـوذج البطلمـي. حصـل غاليليـو علـى إذن مـن المسـؤولين الكاثوليك الرومان لنشـر الكتاب. باللغة الإيطالية للوصول إلى جمهور أكبر. وعلـى الفـور، لقـي الكتـاب رواجـاً كبيـراً، لكنـه اسـتجلب معارضـة سـريعة جـداً مـن قـادة الكنيسـة. أُديـن غاليليـو بتهمـة تعليـم عقيـدة هرطقيّـة، وحُكـم عليـه بالإقامـة الجبريـة لبقيـة حياتـه. كمـا أُجبـر علـى التراجـع ومُنـع مـرة أخـرى مـن تدريـس مركزيـة الشـمس.

بعـد أن وضـع إسـحاق نيوتـن I. Newton (تـوفي 1727م) قانـون الجاذبيـة العـام، شـرع في تتبـع بعـض نتائجـه علـى أرض الواقـع. فقـد رأى أن شـكل الأرض يعتمـد

جزئياً على الجاذبية المتبادلة بين أجزائها، وجزئياً على ميل الطرد المركزي بسبب دوران الأرض، ومن شأن هذه الأفعال أن تتسبب في تسطيح القطبين. وقد دفعه ذلك لاختراع طريقة رياضياتية استخدمها لحساب نسبة القطر القطبي إلى القطر الاستوائي. ولاحظ أن ما يترتب على ذلك من انتفاخ للمادة عند خط الاستواء سوف يجذبها القمر بشكل غير متساوٍ، فالأجزاء الأقرب أكثر انجذاباً؛ وبذلك يعمل القمر على إمالة الأرض عندما يكون في بعض أجزاء مداره؛ وتفعل الشمس ذلك أيضاً بدرجة أقل بسبب بعدها الكبير عن الأرض. ثم أثبت أن التأثير يجب أن يكون دوراناً لمحور الأرض على سطح مخروطي في الفضاء، تماماً كما يرسم محور القمة مخروطاً. وقد حسب المقدار بالفعل؛ وبذلك تمكن من تفسير سبب بداية الاعتدال الذي اكتشفه هيبارخوس حوالي عام 150 قبل الميلاد (Forbes, 1909).

كما وجد نيوتن أن دوران الأرض يولد قوة طرد مركزية تتسبب في انتفاخ خط الاستواء قليلاً، بحيث بلغ قطر الأرض حوالي (6374.4 كيلو متراً) عند خط الاستواء، وفقط (6345.6 كيلو متراً) عبر القطبين؛ بعبارة أخرى، فقد حدثت تسوية عند القطبين بمقدار (230/1). قوة الطرد المركزي هذه، التي تعمل عكس جاذبية الأرض، ستؤدي أيضاً إلى أن تكون الجاذبية الفعالة أصغر بشكل يمكن قياسه عند خط الاستواء، كما أوضح ريتشر. وقد استقبل زملاء نيوتن في الجمعية الملكية على الفور الفلسفة المبنية على الرياضيات المتأصلة في العمل، مع أنهم كانوا غالباً محبطين في فهم الصيغ. لكن اعتنق العلماء البريطانيون بشكل خاص مفهوم الجذب كدليل للدراسة العامة للمادة. ومن خلال العمل بإصرار على تعقيدات الرياضيات الكثيفة لنيوتن، سعوا لإيجاد تطبيقات عملية لقوانين الجاذبية. وعلى النقيض من ذلك، كان الكثير من

المجتمع العلمي في القارة الأوروبية متشككاً جداً في ادعاءات نيوتن، لا سيما في فرنسا. فقد جد العلماء هناك هذا المفهوم الجديد للجاذبية، والنتيجة الطبيعية للأرض المسطحة ذات الجاذبية المتغيرة، والتي تتعارض تماماً مع نموذج المنطق الذي تبناه قبل نصف قرن تقريباً مواطنهم رينيه ديكارت René Des-cartes (توفي 1650م). إذْ وفقاً لعمل ديكارت الضخم (مبادئ الفلسفة Princip-ia Philosophiae، 1644)، فإن الأرض والقمر والكواكب والنجوم مغمورة في سائل هائل غير مرئي سماه «الأثير»، والذي وضعه الله – كما يدعي- بحركة دائرية عند الخليقة ودواماته العظيمة تستمر في الدوران.

لكن نيوتن هو من حظي بالثناء على نطاق واسع في الخيال الشعبي اللاحق، حيث دعمت أعماله الكلاسيكية، مثل كتاب (المبادئ Principia 1687) و (البصريات Opticks 1709)، الجمع بين الرياضيات وعلم الفلك. وقد أكدت البعثات الفرنسية خلال القرن الثامن عشر النتيجة التي توصل إليها (في الكتاب الثالث من كتاب المبادئ) بأن الأرض ليست كروية مثالية وإنما كروية مفلطحة تنتفخ عند خط الاستواء بسبب دورانها.

كان الفلاسفة الفرنسيون مثل فولتير مستحوذين على الاحتمالات التي تَعِدُ بها. حيث ظهرت الطبيعة وكأنه يمكن استيعابها بالعقل، وأنها تعمل بالقوانين التي كانت تنتظر أن يكتشفها الراصد العقلاني. وبذلك فقد افترض المفكرون أن الإنسان، كجزء من الطبيعة، يجب أن يكون نتاج مبادئ مماثلة. افترض بعض الفلاسفة أن تداعيات ذلك كانت مذهلة؛ لأنه إذا كان من الممكن اكتشاف قوانين شاملة في العالم الخارجي من حولنا، فلماذا لا يحدث ذلك في البشر والمجتمع ككل؟ وبدافع من تفسيرهم لعمل نيوتن، ترجمت محاولتهم لإيجاد قوانين أساسية

من الرياضيات وعلم الفلك إلى الفضائل والأخلاق، بينما كان يُعتقد أن الطريق إلى هذا الاكتشاف هو العقل.

هذه العقلانية الأوربية المتأخرة للطبيعة كان جابر بن حيان قد سبقهم إليها منذ القرن التاسع الميلادي. فقد وجد من خلال تأسيسه (علم الميزان) أن يمكننا «تخليق أو تصنيع المواد» وليس انتظار الطبيعة حتى تصنعها، ثم عمم هذه الفكرة بجرأة أكبر ليشمل كل الكائنات الحية. فلو كانت الظروف والإمكانيات البحثية في عصره متاحة لوجدناه يصنّع مختلف المواد الكيميائية التي نصنعها اليوم، ولا أستبعد أبداً من إمكانية وصوله لعمليات الاستنساخ والهندسة الوراثية (العمري وبصمه جي 2021).

وإذا نظرنا إلى الوراء، يمكننا أن نرى في عمل نيوتن عن شكل الأرض بدايات نظرية مرضية. ومع ذلك، كان من الصعب متابعة تفسيراته، التي اعتمدت على العديد من الافتراضات التي لم تذكر بوضوح ولم تكن واضحة على الإطلاق. نعم لقد كانت نظرية نيوتن عن شكل الأرض - بالنسبة لمعظم قراء كتاب (المبادئ) - غير مفهومة إلى حد كبير (Linton, 2007).

للأسف بعد قرونٍ من الجهود العلمية والتقنية الكبيرة التي بُذلت لإثبات كروية الأرض، نجد حدوث انتكاسة في هذا القرن مع عودة ظهور التيار الداعم لنظرية الأرض المسطحة.

درس الفلكيون القدامى حركة القمر والكواكب لكن هذه الحركة لم تفسر بشكل صحيح إلا في أواخر القرن السابع عشر عندما أوضح العالم الإنجليزي أسحاق نيوتن (1642 - 1727م) أن هناك ارتباطاً بين القوى الجاذبة للأجسام نحو الأرض وأسلوب حركة الكواكب. بنى نيوتن دراسته على الدراسة الدقيقة

لحركة الكواكب والتي قام بها اثنان من الفلكيين في أواخر القرن السادس عشر الميلادي وهما تيخو براهي الدنماركي ويوهان كيبلر الألماني. ومن القوانين الثلاثة التي اكتشفها كيبلر أوضح نيوتن كيف أن قوة الجذب للشمس لابد أن تقل بزيادة المسافة، وافترض أن جذب الأرض لابد أن تسلك ذات السلوك فتمكن من حساب القوة التي تجذب القمر إلى الأرض عند سطحها. أما عالم الطبيعة الإيطالي غاليليو غاليلي (1564- 1642م) فقد قدم مساهمات جيدة في مراقبة الأجسام الساقطة تجاه الأرض، واستنتج أن معدل السرعة المتزايد (عجلة الجاذبية الأرضية) ثابتة بالنسبة لكل الأجسام، وأن سرعة الجسم الساقط تساوي في الثانية الأولى نصف قيمة عجلة الجاذبية في مكان سقوطه إلى سطح الأرض.

الفصل الثامن

سـطح الأرض

مُقَدِّمَة

الأرض عبارة عن كرة ضخمة يتكون سطحها من صخور وتربة وماء. تتكون الأرض من عدة عناصر منها الحديد حيث تشكل أعلى نسبة وهي 32.1 % من كتلة الأرض، و يعتبر الحديد المكون الأساسي للب الأرض بنسبة 88.8 %، وتتكون الأرض أيضاً من الأكسجين بنسبة 30.1 %، ومن الكبريت بنسبة 2.9 %، ومن الألومنيوم بنسبة 1.4 % ومن الكالسيوم بنسبة 1.5 %، ومن عنصر السيليكون حيث تشكل نسبته 15.1%، ومن المغنيسيوم بنسبة 13.9 %، وتكون العناصر الأثقل حجماً أقربها موقعاً لمركز الأرض، بينما تبعد العناصر الأقل حجماً عن مركز الأرض، ويشكل الأكسجين أكثر من 47 % من مكونات القشرة الأرضية.

الأرض أحد الكواكب السيارة التسعة التي تسير حول الشمس عبر الفضاء وعلى طول مسارات تسمى المدارات. وتقع في المدار الثالث من المجموعة الشمسية. أما الشمس فهي نجم واحد من ملايين النجوم التي تشكل مجرة تسمى «درب اللبانة». وللأرض ثلاث حركات دورانية: حركة سريعة حول محورها، حركة حول الشمس، وحركة عبر درب التبانة مع بقية النظام الشمسي كل 250 مليون سنة .

ليس من السهل أن تحكم على كروية الأرض أو تسطّحها وأنت تعيش على مساحاتٍ هائلةٍ مستويةٍ من التضاريس والأفق، دون مراقبة بعض الظواهر الطبيعية والاستدلال بها، أو دون أنْ تتوفر لديك وسيلةٌ للخروج بعيداً عن كوكب

الأرض، ومعرفة شكله الحقيقي كما حدث في عصر الفضاء في القرن العشرين. يصنف موضوع كروية الأرض اليوم تحت علم هيئة الأرض ومساحتها أو كما يُعرّب المصطلح المعبر عنها بالجيوديسيا Geodesy، الذي اشتق من اليونانية، وهي تعني حرفياً «تقسيم الأرض». حيث إنّ الهدف الأول من هذا العلم هو أن يوفّر إطاراً دقيقاً للتحكم في عمليات المسح الطبوغرافية الوطنية. وبالتالي، فإن الجيوديسيا هي العلم الذي يحدد شكل الأرض والعلاقة المتبادلة لنقاط مختارة على سطحها إما بتقنيات مباشرة أو غير مباشرة .

لقد طوَّر العلماء العرب والمسلمين منذ عصر **المأمون** هذا العلم باتجاهين. **الأول:** تحديد مواقع النقاط المتميزة على سطح الأرض. **الثاني:** تحديد ما يتعلق بشكل الأرض وقياسها، سواء جزئياً أو كلياً، وبحساب قياس خط نصف النهار. وهما الاتجاهان اللذان سيكون لهما تأثير كبير في تطوير علم رسم الخرائط العربي، وبالتحديد (الإسقاط الكروي) الذي بلغ ذروته عند **البيروني**.

استمرّ العلماء بالبحث عن أدلة تبرهن كروية الأرض وبين عامي (1934–1935م) أُطلق بالون يحمل آلة تصوير بالأشعة تحت الحمراء إلى ارتفاع 22066 كيلو متراً و أكّدت الصور بالفعل أن الأرض كروية كما تبيّن للعلماء بعد عام 1959م أن الأرض ليست كروية تماماً، وإنما مفلطحة، حيث إنها أكثر انتفاخاً في النصف الجنوبي منها من النصف الشمالي، كما أن قطبها الشمالي على تسطحه مثل القطب الجنوبي وهو أكثر تحدباً منه بشكل صغير جداً . كذلك أمكن تفسير سبب اختلاف التوزع الحراري على سطح الأرض بين نصفي الكرة الأرضية، حيث يوجد منطقتان قطبيتان باردتان، ومنطقتان معتدلتان، ومنطقة

حـارة في وسـط الكوكـب. كمـا أن تبنـي نظريـة كرويـة الأرض كان لـه أثـر ودور في جوانـب فيزيائيـة وفلكيـة أخـرى مثـل نمـوذج الكـون (مركـزي الأرض)، وجاذبيـة الأرض، والملاحـة البحريـة وحتـى قيـاس سـرعة الضـوء لاحقاً عنـد الأوربيـين.

تكمـن أهميـة هـذا الفصـل أنـه سـيوفر للقـارئ كل الأدلـة التـي يرغـب أن يواجـه بـه أصحـاب الأرض المسـطحة، كمـا أنـه يوفـر للباحـث التاريخي مراحل تطور ونشـأة نظريـة الأرض الكرويـة والمسـطحة، ويـزود المختصـين بالجيوديسـيا بـكل الأسـاليب العمليـة والنظريـة التـي كانـت تتبـع سـابقاً في قياسـات الأعمـال المسـاحية. ناهيـك عـن التأريـخ الموثـق لـكل مـا وصلنـا مـن أعمـال العلمـاء العـرب والمسـلمين.

شـــكل الأرض

تدور الأرض حول محورها وهذا المحور عبارة عن خط وهمي يصل القطبين الشمالي والجنوبي. هذه الحركة الدورانية السريعة تجعل الشمس وكأنها تتحرك من الشرق إلى الغرب مسببة حدوث النهار والليل على الأرض. وتستغرق الأرض زمناً قدره 23 ساعة و 56 دقيقة و 4.09 ثانية لإتمام دورة واحدة حول نفسها وهذا الطول الزمني يطلق عليه اليوم النجمي.

تسير الأرض مسافة قدرها 958 مليون كم حول الشمس في زمن قدره 365 يوم و6 ساعات و 9 دقائق و 9.54 ثانية. هذا الطول الزمني يطلق عليه السنة النجمية. خلال هذه الفترة تسير الأرض بمعدل سرعة قدرها 107,200كم/س ويسمى مسار الأرض حول الشمس المدار الأرضي. ويقع هذا المدار على سطح وهمي منبسط (المستوى المداري الأرضي).

تأخذ الأرض شكلاً إهليجياً (بيضوياً) يبلغ نصف قطرها الأفقي عند خط الاستواء 6378.1 كم ونصف قطرها العمودي عند الأقطاب 6356.7 كم أي أن هناك زيادة قدرها 21.4 كم عند خط الاستواء وهذه تمثل الشكل الإهليجي أو ثابت التفلطح، الذي يقدر بـ 0.0033 وذلك بفعل القوه الطاردة المركزية، بمعنى أن الشمس تدور باستمرار حول محورها وهذه الحركة تولد القوة الطاردة المركزية، هذه القوة أقوى ما تكون عند خط الاستواء فتسبب دفعاً، وهذا الدفع يتسبب بدوره في تحدب الأرض حول الوسط كما يتسبب في تسطحها قليلاً عند القطبين.

ثابت التفلطح = نصف القطر الاستوائي – نصف القطر القطبي مقسوماً على نصف القطر الاستوائي

قال تعالى : ﴿أَوَلَمْ يَرَوْا أَنَّا نَأْتِي الْأَرْضَ نَنقُصُهَا مِنْ أَطْرَافِهَا﴾ [سورة الرعد، الآية 41].

وهذا يعني أن سطح الأرض غير مستو ففيه قمم عالية، وسفوح هابطة وسهول وهي أطراف طبقًا للتباين في المناسيب، ومن ناحية أخرى فإن الأرض كما ذكرنا شبه كره (مفلطحة)، فلها قطبان ولها خط استواء فتعتبر هذه أطرافًا لها، والسطح كله يعتبر أطرافًا للأرض. ولقد فسر العلم الحديث أن الأرض تتكمش باستمرار، تتكمش على ذاتها، من كل أطرافها أو من كل أقطابها. وسبب الانكماش الحقيقي هو خروج الكميات الهائلة من المادة والطاقة على هيئة غازات وأبخرة ومواد، سائلة وصلبة تنطلق عبر فوهات البراكين بملايين الأطنان بصورة دورية فتؤدي إلى استمرار انكماش الأرض، ويؤكد العلماء أن الأرض الابتدائية كانت على الأقل مائتي ضعف حجم الأرض الحالية.

دوران الأرض

تشـكّل النظـام الشمسـي قبـل حوالـي 5 مليـارات عـام، وكان في بداياتـه كتلـةً عملاقـةً مـن الغـاز والغبـار، ومـع بدايـة انهيـار جزيئـات هـذه الكتلـة ازداد دورانهـا بشـكلٍ كبيـر جداً، فتكوّنـت الشـمس في مركـز هـذه الكتلـة أولاً، أمّـا باقـي جزيئـات تلـك الكتلـة مـن الغـاز والغبـار فاسـتمرّت في الـدوران والتماسـك ببعضهـا البعـض، فنتـج عـن ذلـك الكواكـب، والأقمـار، والكويكبـات، والمذنبـات، فظلّـت تـدور جميـع هـذه الأجـرام حـول الشـمس، ويجـدر بالذكـر أنّهـا تـدور في ذات الاتّجـاه لأنهـا كانـت تـدور بنفـس الاتجـاه قبـل تكوّنهـا. يعـود سـبب عـدم الشـعور بـدوران الأرض حيـث إن الأرض تـدور بسـرعة كبيـرة حـول الشـمس، وعليـه تـدور كلّ أجـزاء الكوكـب جنبـاً إلـى جنـب معهـا بنفـس السـرعة والاتّجـاه الـذي تـدور فيـه الأرض بمـا في ذلـك الغـلاف الجـوي والمحيطـات، ممّـا يُعطـي شـعوراً بـأنّ الأرض ثابتـة، ويجـدر بالذكـر أنّ الشـعور بـدوران الأرض غيـر ممكـن إلّا فيمـا لـو توقفـت الأرض عـن الـدوران فجـأة.

في الحقيقـة إن دوران كوكـب الأرض حـول الشـمس وحـول محـوره، ببسـاطة هـو بسـبب سـبب شـروق الشـمس مـن الشـرق وغروبهـا مـن الغـرب، والسـبب وراء منـازل (أطـوار) القمـر، وسـبب ظهـور النجـوم ودورانهـا حـول الأرض مـرةً كل يـوم. تقـوم الأرض بنوعـين مـن الـدوران. الأول حـول محورهـا، والـذي يُعـرف «باسـم الـدوران الفلكـي Sidereal Rotation» وهـذا مـا يسـمح بـدورة النهـار Diurnal Cycle، وهـو الأمـر الـذي يجعـل السـماء تبـدو ظاهريـاً وكأنهـا تـدور حولنـا. والنـوع الثانـي مـن الـدوران هـو دوران الأرض حـول الشـمس الـذي يُعـــرف باسـم «الفتــرة المداريـة

Orbital Period». هـذه الـدوران مسؤول عن تلك الفصـول، وطـول السـنة، وتغيـرات دورة النهـار. كمـا ذكرنـا أعـلاه لدينـا نوعـين مـن الـدوران :

أولاً : الـدوران الفلكـي تـدور الأرض حـول محورهـا مـرةً كل 23 سـاعة و 56 دقيقـة و 4.1 ثانيـة. أو مـا يُعـرف باسـم (اليـوم الفلكـي Sidereal Day)، قيسـت فتـرة الـدوران هـذه نسـبةً إلـى النجـوم. وفي الوقـت نفسـه، فـإن اليـوم الشمسـي لـلأرض (ويعنـي ذلـك مقـدار الوقـت الـذي تسـتغرقه الشـمس لتعـاود الظهـور في المـكان نفسـه مـن السـماء) هـو 24 سـاعة. تـزداد سـرعة دوران الأرض بالاتجـاه نحـو خـط الاسـتواء؛ حيـث يصـل معـدل سـرعة الأرض إلـى 1609.34 كـم في السـاعة الواحـدة عنـد المناطـق الواقعـة علـى خطـوط العـرض الوسـطى بينمـا تقـل سـرعة دوران الأرض بالاتجـاه نحـو قُطبـيّ الأرض. إن الـدوران الفلكـي لـلأرض هـو المسـؤول عـن نمـط الشـروق والغـروب. وباسـتخدام الأجـرام السـماوية كنقـاط مرجعيـة (مثـل: القمـر، والنجـوم، إلـخ) فـإن الأرض تـدور بمعـدل 15 درجـة / سـاعة (أو 15 دقيقـة قوسـية/دقيقة) باتجـاه الغـرب. وإذا نظرنـا إلـى الأرض من الفضـاء من جهة القطب الشـمالي، سـتظهر الأرض وهـي تـدور عكـس عقـرب السـاعة. ومـن هنـا سـنعرف سـبب شـروق الشـمس مـن جهـة الشـرق وغروبهـا مـن جهـة الغـرب. كان لسـرعة دوران الأرض تأثيـرات كبيـرة عبـر الوقـت، بمـا في ذلـك شـكل الأرض (شـكل كـروي مسـطح، مـع تسـطح عنـد القطبـين)، ومُنـاخ الأرض، وعمـق المحيطـات وتياراتهـا، بالإضافـة إلـى القـوى التكتونيـة. سـرعة دوران الأرض تبلـغ 1674.4 كـم/س ومـع ذلـك فـإن سـرعة كوكـب الأرض تتباطـأ مـع مـرور الوقـت، وذلـك بسـبب التأثيـرات المديـة للقمـر المؤثـرة في دوران الأرض. تُظهـر السـاعات الذريـة أن الوقـت الحالـي أطـول مـن الوقـت في القـرن الماضـي بمقـدار 1.7 مللـي ثانيـة. إن الزيـادة البطيئـة

الحاصلة تم تعديلها باستخدام **الثانية الكبيسة** Leap Seconds في النظام العالمي للتوقيت. تدور الأرض من الغرب إلى الشرق، وهذا هو سبب شروق الشمس من الشرق وغروبها من الغرب.

ثانياً : الفترة المدارية تدور الأرض حول الشمس من مسافة متوسطة مقدارها 149598023 كيلو متراً، (أي وحدة فلكية واحدة)، وتُكمل دورة كاملة خلال 365.2564 يوماً شمسياً. وهذا ما يجعل الشمس تبدو متحركةً في السماء من الشرق بمعدل درجة واحدة يومياً. ووفق هذا المعدل، تستغرق الشمس ما يعادل 24 ساعة (يوماً شمسياً واحداً) لإكمال دورة كاملة حول محور الأرض والعودة لنقطة الزوال (نقطة على سطح الكوكب تمتد من الشمال إلى الجنوب مروراً بالقطبين). وبالنظر من أعلى القطبين الشماليين لكل من الأرض والشمس تظهر الأرض وهي تدور حول الشمس بعكس عقرب الساعة. إن دوران الأرض حول الشمس، أو **الحركة البدارية** Precession للشمس خلال نقطتي الاعتدال، هي السبب وراء مدة السنة التي تبلغ 365.2 يوم. ولهذا السبب أيضاً يتم إضافة يوم آخر إلى شهر فبراير كل أربع سنوات فيما يعرف بالسنة الكبيسة (Leap Year) ليصبح شهر فبراير 29 يوماً. أيضاً يخضع دوران الأرض حول الشمس لشذوذ مداري مقداره 0.0167 درجة، مما يعني اقتراباً أو بُعداً دوريين لها من الشمس في أوقات محددة من السنة. تصل الأرض **لنقطة الحضيض** Perihelion (على بُعد 147089047 كيلو متراً من الشمس) في الثالث من يناير تقريباً، وتصل **نقطة الأوج** Aphelion في الرابع من يوليو (على بعد 152097701 كيلو متراً). يؤدي تغير المسافة بين الأرض والشمس إلى زيادة الطاقة الشمسية الواصلة إلى الأرض بنسبة 6.9 % عند نقطة الأوج

مقارنة بنقطة الحضيض. يميل نصف الكرة الأرضية الجنوبي باتجاه الشمس بنفس الوقت الذي تصل فيه الأرض أقرب نقطة لها من الشمس. لذلك يتلقى نصف الكرة الأرضية الجنوبي طاقةً من الشمس أكثر قليلاً من النصف الشمالي خلال السنة. وهو كذلك نفس السبب وراء ظهور منازل القمر، وكذلك كل من خسوف القمر (Lunar Eclipse) وكسوف الشمس (Solar Eclipse).

يحدث خسوف القمر عندما يدخل القمر منطقة ظل الأرض، نسبة إلى الشمس مما يسبب ظلمته ومظهره باللون الأحمر. يحدث كسوف للشمس خلال القمر الجديد عندما يكون القمر بين الشمس والأرض. وحيث إنهما يبدوان بنفس الحجم الظاهري في السماء، فإن القمر بإمكانه أن يحجب الشمس جزئياً، في ظاهرة تسمى **الكسوف الحلقي** Annular Eclipse أو يحجب الشمس بالكامل ويسمى الكسوف الكامل Total Eclipse. وفي حالة الكسوف الكامل يغطي القمر قرص الشمس كلياً، وتصبح **الهالة الشمسية** Solar Corona مرئيةً بالعين المجردة. ولولا الميل المحوري للأرض، الذي يميل بمقدار 23.5 درجة نسبة إلى الشمس، لكان هناك خسوف وكسوف كل أسبوعين، بالتناوب بينهما. وبسبب هذا الميل المحوري أيضاً تتباين كمية الأشعة الشمسية الواصلة إلى سطح الأرض خلال السنة. وهذا ما يسبب التغيرات الموسمية، والتغيرات في الدورة النهارية، والتغير في موقع الشمس في السماء نسبة إلى خط الاستواء. عندما يميل أحد نصفي الأرض باتجاه الشمس يكون عندها الفصل صيفاً في ذلك النصف، حيث ترتفع درجات الحرارة ويزداد طول النهار. وينعكس هذا الوضع كل ستة أشهر.

الأرض المسطحة أم الكرويـة؟

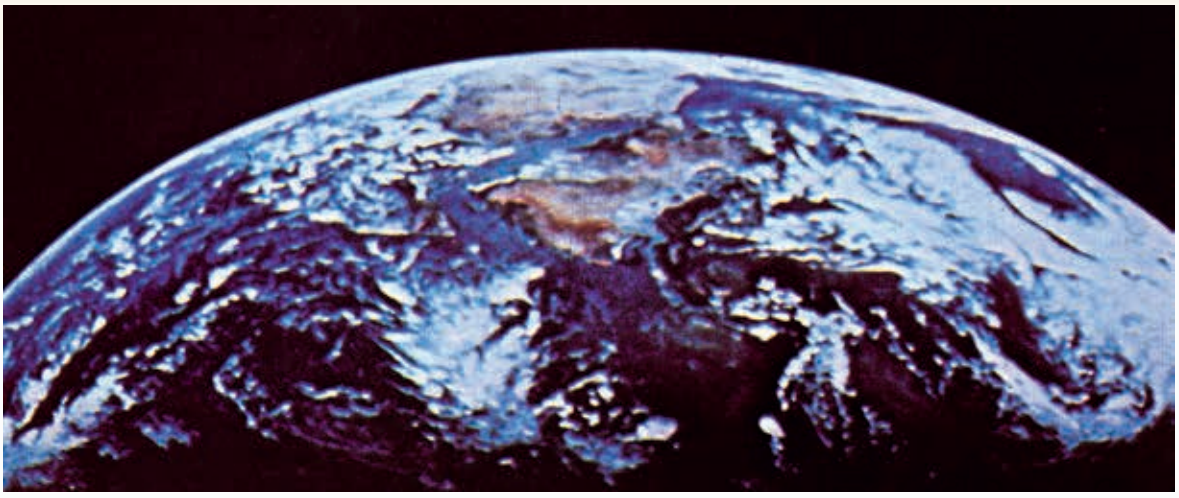
بدءاً من عام 2012 تقريباً، كان هناك انبعاثٌ كبيرٌ للاهتمام بفكرة الأرض المسطحة؛ حيث بدأ ذلك إريك دوباي E. Dubay، الذي نشر على الشبكة العنكبوتية كتابين حول هذا الموضوع: الأول هو (مؤامرة الأرض المسطحة Flat-Earth Conspiracy)، والثاني هو: (200 دليل على أن الأرض ليست كرة دوَّارة 200 Proofs the Earth Is Not a Spinning Ball)، وسرعان ما تبنى آخرون وجهة نظره مولّدين بذلك حركة جديدة، وقد جرى الترويج للكثير من هذه الأفكار على الشبكة كالنار في الهشيم، لا سيما من خلال وسائل التواصل الاجتماعي. كما ظهر بعض القادة البارزين في حركة الأرض المسطحة منهم مارك سارغنت M. Sargent وجيران كامبانيلا J. Campanella وروبي ديفيدسون R. Davidson وروب سكيبا R. Skiba. الأخيران منهم جديران بالملاحظة لأنهما يروجان لنسخة مسيحية من الأرض المسطحة بناءً على فهمهما لعلم كونيات الكتاب المقدس.

الشيء الغريب أنه حتى في عصرنا هذا – عصر الفضاء – يوجد أناس لا يقتنعون بأن الأرض كروية الشكل وإنما مسطّحة، مع وجود آلاف الصور الفضائية والجوية التي تبيّن حقيقة كرويتها، لذلك فإنّا نعتقد أن أصحاب نظرية الأرض المسطحة يحتاجون إلى رحلةٍ للفضاء حتى يتأكدوا بأم أعينهم أنها كروية، كونهم لم ولن يقتنعوا بالأدلة التي تشير إليها الكثير من الظواهر الطبيعية اليومية.

مع ذلك، فقد استمرَّ العلماء بالبحث عن أدلة تبرهن كرويتها منذ النصف الأول من القرن العشرين، ففي الفترة الواقعة بين عامي (1934-1935م) أُطلِق بالون يحمل آلة تصوير بالأشعة تحت الحمراء، وقد أُرسلَ هذا البالون إلى طبقة **الستراتوسفير** Stratosphere ووصل إلى ارتفاع 22066 كيلو متراً، وأخذ صورة أكّدت بالفعل أن

الأرض كروية (فولمان، 2015م). كما تبيّن للعلماء بعد عام 1959م أنّ الأرض ليست كروية تماماً، وإنما لها شكل الإجاصة، أي مفلطحة، ولكن التشوهات في وسطها تهمل بالنسبة لقطرها فتعتبر كروية تقريباً؛ حيث إنَّها أكثر انتفاخاً في النصف الجنوبي منها من النصف الشمالي، كما أنَّ قطبها الشمالي على تسطحه مثل القطب الجنوبي وهو أكثرُ تحدباً منه بشكلٍ صغيرٍ جداً. وتوضح صور الأقمار الصنعية أنّ محيط الأرض المارِّ بالقطب أقل بـ 432 كيلومتر من محيطها المارّ بخط الاستواء (ضاي، 1994م)؛ أيّ أنّ الأرض ليست كروية بشكل مثالي، وإنما مسطحة قليلاً عند قطبيها الشمالي والجنوبي؛ حيث إنّ قطرها المحوري – أي قطرها من القطب الجنوبي إلى الشمالي- ينقص 41.6 كيلو متراً عن قطرها الاستوائي. ولو كانت كرة تامة الكروية لتساوى طولي القطرين (صروف، 1932م).

في الواقع إنَّ شكل الأرض الكروي المفلطح – وفق المعطيات الحالية – يعني أن الأرض كانت بالضرورة بحالة مائعة في فترةٍ ما من تاريخها، وقد توصل العلماء لهذا الشكل من خلال قياسات أقواس خطوط الطول، وبخاصة من خلال دراسة جاذبية الأرض (موريه، 1987م).



التقطت هذه الصورة لكوكب الأرض من قِبل رُوَّاد المركبة الفضائية أبولو 8- في رحلتها إلى القمر عام 1968م ، وهو دليلٌ جديدٌ يحسم الجدل الذي بقي لأكثر من ألفي سنة بين العلماء حول الشكل الحقيقي للأرض (Faulkner, 2019)

إنّ الأرض كبيرة، ونحن صِغارُ الحجم لدرجة قد نعتقد أنّها مسطّحة فعلاً، لأنه حتى مع ركوبنا للطائرة وتحليقنا في الأجواء على ارتفاع 3 كيلومترات لن تظهر لنا كرويّة، ولعل هذا السبب هو الذي جعل الكثير من الناس يعتقدون أنها مسطحةٌ. وقد يتساءل البعض بماذا تختلف الأرض المسطحة – جوهرياً – عن الأرض الكروية؟

في حالة الأرض المسطحة، تكون الأرض مستويةً ومستديرةً؛ حيث يقع القطب الشمالي في مركز الأرض ولا يوجد قطب جنوبي، وإنما تتكون حافة الأرض المكتشفة من جدارٍ جليدي يسمونه أنتاركتيكا، هذا الجدار الجليدي لا يحدّ فقط من الأرض كما نعرفها، وإنما يقوم أيضاً على احتواء المحيطات،

هنـاك خـلافٌ بـين أصحـاب الأرض المسـطحة حـول مـدى امتـداد القـارة القطبيـة الجنوبيـة. فـوق الأرض توجـد قِبّـةٌ تندمـج فيهـا النجـوم، كذلـك تقـع القبـة علـى القـارة القطبيـة الجنوبيـة خلـف الجـدار الجليـدي، وتُناقـش أبعـاد القبـة وشـكلها الدقيـق بـين أصحـاب الأرض المسـطحة في العديـد مـن الإصـدارات، تكـون القبـة عبـارةً عـن مجسـم نصـف كـروي، بينمـا يفضـل البعـض الآخـر قبـةً ذات نصـف قطـرٍ أكبـر في المركـز (فـوق القطـب الشـمالي) أكثـر مـن حوافهـا، بحيـث تشـبه سـطح سـاحة الألعـاب الرياضيـة، كل يـوم تـدور القبـة حـول محورهـا الـذي يمـرّ عبـر القطـب الشـمالي لـلأرض، ويتسـبب هـذا في تحـرّك النجـوم في السـماء، يقـع نجـم القطـب الشـمالي مباشـرةً تقريبـاً فـوق القطـب الشـمالي، لذلـك يبقـى سـاكناً تقريبـاً بينمـا تـدور النجـوم الأخـرى في حلقـاتٍ حولـه، وفي معظـم نمـاذج الأرض المسـطحة، تكـون الشـمس والقمـر فـوق الأرض ولكـن بشـكلٍ عـام أسـفل القبـة، كمـا أنهـا تـدور حـول محـور القطـب الشـمالي كل يـوم، وهـو مـا يمثّـل حركتهـا اليوميـة، وتتحـرك الشـمس والقمـر بمعـدلٍ مختلـفٍ قليـلاً عـن القبّـة، وهـو مـا يفسـر حركتهمـا بالنسـبة إلـى النجـوم، ونظـراً لأنَّ الشـمس والقمـر دائمـاً فـوق الأرض، فلـن يشـرقا أو يغربـا أبـداً (Faulkner, 2019).

لا يزال هناك من يتبنى فكرة الأرض المسطحة حتى وقتنا الحاضر، ويتخلى عن فكرة كروية الأرض، وقد عقدت حركة الأرض المسطحة عدة مؤتمرات (في عامي 2017 و 2018) تحاول من خلالها أن تبرهن للعالم أننا نعيش على أرضٍ مسطحة وليس كروية (Faulkner, 2019)

كثيراً ما يخلط أصحاب الأرض المسطحة بين مسألة شكل الأرض ومسألة ما إذا كانت الأرض تتحرك، بالنسبة للأوروبيين كان غالبية علم الكونيات منذ ما يقرب من أربعة قرون يقرر أن الأرض كروية وتدور حول الشمس، ولمدة 2000 عام قبل ذلك، كان غالبية علم الكونيات في الغرب الأوروبي يقرر أن الأرض كروية وهي مركز الكون (يُعبّر عنها عموماً بنموذج بطليموس). وقد كان يؤمن بعض

النـاس بـأن الأرض كرويـة وهـي تقـع في مركـز الكـون (وهـو مـا يُعبّـر عنـه عمومـاً باسـم «علـم الكونيـات التيخونـي Tychonic» نسـبةً إلـى الفلكـي **تيخـو براهـي**)، وإذا اعتقـد المـرء أن الأرض مسـطّحة، فسـيبدو مـن الضـروري الإيمـان بمركزيـة الأرض للكـون؛ لنفتـرض أنّـه مـن الممكـن الإيمـان بعلـم كـون الأرض المسـطحة التـي تتمحـور حـول الشـمس، ولكـن كيـف يخلـط بعـض أصحـاب الأرض المسـطحة بـين هاتـين المسـألتين؟ إنهـم يفعلـون ذلـك عـن طريـق الخلـط بـين تاريـخ علـم الكونيـات الأوروبـي حـول هـذه المسـألة وبـين تقـديم الحجـج حـول مركزيـة الأرض، معتقديـن خطـأً أنّ الحجـج تثبـت أيضـاً أنّ الأرض مسـطحةً، أمـا أولئـك الذيـن يعتقـدون بحركـة مركزيـة الأرض الحديثـة سـيختلفون بشـدة مـع هـذا الطـرح (Faulkner, 2019).

من الناحية المعرفية (الأبستمولوجية) تجيب نظرية المعرفة على سؤال «كيف نعرف ما نعرفه؟» يطرح أصحاب الأرض المسطحة سؤالاً معرفياً جيداً: بينما يعتقد معظم الناس أن الأرض هي كرة، كيف نعرف ذلك؟ معظم الناس لم يفكروا في هذا السؤال؛ لأنهم تعلموا طوال حياتهم أنّ الأرض كروية، فلماذا القلق حيال ذلك؟ وبالتالي، مع عدم وجود فكرة عن الأسباب التي تجعلنا نعلم أنّ الأرض كروية، دخل معظم الناس منذ فترة طويلة في حالة من الرضا حول هذا الموضوع، وعندما يقوم فريق الأرض المسطحة الحديث ويبدؤون في إثارة ما يبدو أنّه اعتراضات بسيطة على الشكل الكروي للأرض، فلن يتطلب الأمر الكثير لإرباك معظم الناس عند حشرهم بهذه الطريقة، يستجيب الناس عموماً بملاحظة أن لدينا صوراً من الفضاء تُظهر بوضوح الأرض الكروية. ومع ذلك، من شبه المؤكد أنّ صاحب الأرض المسطحة سيقول إنه يمكن تزوير مثل هذه الأشياء بسهولة في هذه الأيام. في الواقع، لأننا نعلم جميعاً أنه من السهل جداً تزوير مثل هذه الصور، فربما لا تثبت هذه

الصور كثيراً بعد كل شيء. علاوةً على ذلك، يعود الإيمان بالأرض الكروية إلى ما قبل عصر الفضاء بكثير، لذلك من الواضح أنّه يجب أن تكون هناك استجاباتٌ أفضل؛ إذ بمجرد التقاط الصور الفضائية للأرض الكروية، يكون لدى معظم الناس عادةً إحدى إجابتين: إما عن طريق الرد الأكثر شيوعاً: وهو استبعاد الشخص الذي يطرح الأسئلة باعتباره شخصاً غريب الأطوار، أو أنّه أحمق لأنّ «الجميع يعلم أنّ الأرض كروية».

وقد يكون الرد بطريقةٍ أخرى: وهو إيلاء المزيد من الاهتمام لأصحاب الأرض المسطحة، والبحث عن أخطاءٍ في حقائقهم أو منطقهم، ومع أنه نادراً ما يكون لديهم المعرفة لدحض قضية الأرض المسطحة، فإنّ معظم الأشخاص الذين يتبعون هذا النهج يبحثون عن المساعدة، وعادةً ما ينتهي هذا البحث عن المساعدة على الشبكة (الإنترنت)، وعندها يجدون بسرعة عدداً كبيراً من المواقع ومقاطع الفيديو التي تروج للأرض المسطحة لكنّ القليل منهم، إنْ وجد، يدحضها. يظهر بعض الناس بعد بضع ساعات، وقد أهين غرور ذكائهم قليلاً؛ لأنهم ما زالوا يعتقدون أنّ الأرض مسطحةٌ وهو محضُ هراءٍ ولكنهم محبطون لأنهم لم يستطيعوا الإجابة على العديد من الحجج التي واجهوها للتو، في حين يخرج آخرون وينتهي بهم الأمر إلى التفكير في أن نظريات المؤامرة التي واجهوها طوال حياتهم ربما تكون صحيحة، ربما تلقينا جميعاً لفترةٍ طويلةٍ كذبةً كبيرةً حول الشكل الحقيقي للأرض؛ لكن لماذا يُفترض وجود مؤامرة لإخفاء الشكل الحقيقي للأرض؟ الإجابة الأكثر شيوعاً هي أنها محاولةٌ للسيطرة على العالم، مع أنّه ليس من الواضح كيف أن تعزيز ذلك والحفاظ على اعتقاد خاطئ حول شكل الأرض يحقق هذه السيطرة.

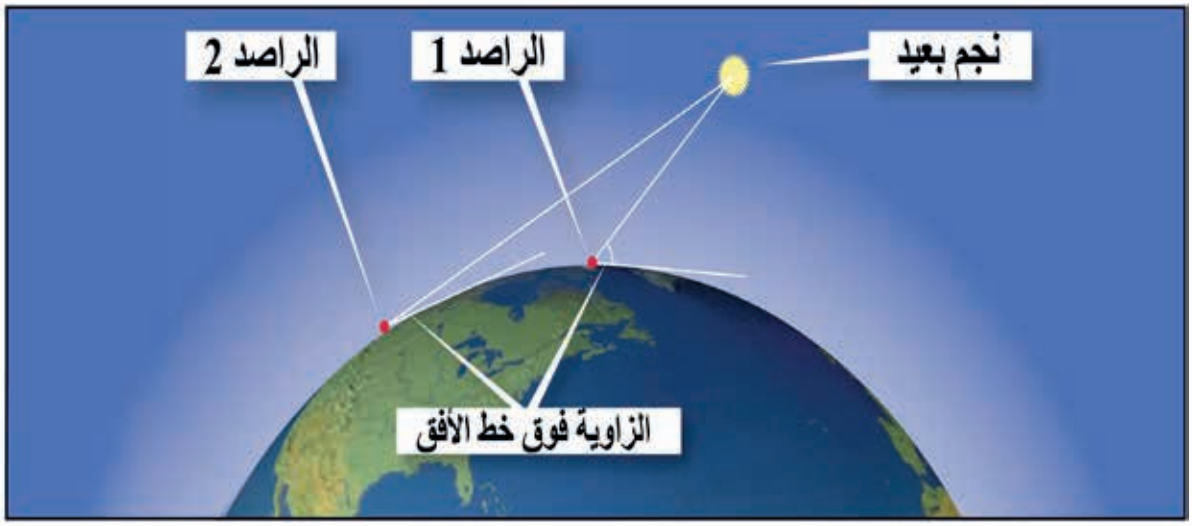
طبعـاً لا تقتصـر فائـدة اعتمـاد نظريـة الأرض الكرويـة علـى تحديـد محيطهـا وقطرهـا، وإنمـا أمكـن للعلمـاء أنْ يحسـبوا مـن خـلال هـذه الحقيقـة كتلتهـا وتحديـد بُعْدهـا عـن بقيـة الأجـرام في الكـون، وكذلـك فتـح بوابـة استكشـاف كوكـب الأرض الـذي مهّـد بـدوره لأضخـم عمليـاتٍ اسـتعماريةٍ غربيـةٍ.

ويعتقـد الكثيـر مـن النـاس أنّ المستكشـف الإسـباني المشـهور مـن أصـول إيطاليـة كريسـتوفر كولومبـوس Ch. Columbus (تـوفي 1506م) هـو مـن حسـم أمـر كرويـة الأرض منـذ أكثـر مـن خمسـة قـرون بوصولـه لأمريـكا، لكنـه في الواقـع لـم يحسـمه فعـلاً؛ ويذكـر الباحـث درابـر (مؤلـف كتـاب تجـدد العلـوم في الجنـوب)، أن كولومبـوس قـد اطلـع علـى كتـب ابـن رشـد قبـل أن ينطلـق برحلتـه نحـو العالـم الجديـد (العقـاد، 1983م)، فقـد اعتقـد كولومبـوس أن المسـافة بـين إسـبانيا والهنـد ليسـت بعيـدةً عـن طريـق المحيـط الغربـي (كـرم، 1936م).

وقـد ثَبُـتَ للأوربيـين كرويـة الأرض بشـكلٍ نهائـيٍ مـن خـلال الرحلـة التـي قـام بهـا البحـار الإسـباني فرنانـدو ماجـلان F. de Magallanes (تـوفي 1521م) بـين عامـي 1519 و 1522م، حيـث أكمـل الرحلـة خـوان سباسـتيان إلكانـو J. S. Elcano (تـوفي 1526م) عـام 1522م (علـي، 1978م).

كمـا كان مـن التطبيقـات العمليـة والمباشـرة الأخـرى لكرويـة الأرض تطويـر الإسـطرلاب واسـتخداماته، فالإسـطرلاب المسـطح مثـلاً، هـو إسـقاطٌ مباشـرٌ لخطـوط الطـول والعـرض السـماوية، علـى اعتبـار أن الأرض مركـز للكـرة السـماوية، أمـا الإسـطرلاب الكـروي فهـو محـاكاة مباشـرة للكـرة السـماوية.

أيضاً أمكن تفسير سبب اختلاف التوزع الحراري على سطح الأرض بين نصفي الكرة الأرضية، حيث يوجد منطقتان قطبيتان باردتان، ومنطقتان معتدلتان، ومنطقةٌ حارةٌ في وسط الكوكب. كما أن تبني نظرية كروية الأرض كان له أثر ودور في جوانب فيزيائية وفلكية أخرى مثل نموذج الكون (مركزي الأرض)، وجاذبية الأرض، والملاحة البحرية وحتى قياس سرعة الضوء لاحقاً عند الأوروبيين.



من الأدلة التي تثبت كروية الأرض النظر في الوقت نفسه إلى نجم بعيد من قبل راصدين بينهما مسافة بعيدة، عندها يرى أحدُ الراصدين النَّجم أعلى من الأفق مقارنةً بالآخر

علاوة على ذلك هناك دلائل علمية دامغة تبرهن أن الأرض ليست مسطحة ومنها على سبيل المثال لا الحصر:

- **القمر.** لاحظ **أرسطو** أنه خلال خسوف القمر (عندما تقع الأرض مباشرة بين الشمس والقمر، وتخلق بذلك ظلاً) يكون الظل الواقع على سطح القمر

دائرياً، وهـذا الظل هـو ظل الأرض، ويُعـد ذلـك دليـلاً قوياً على الشـكل الكـروي لـلأرض. ظل الأرض يعبـر سـطح القمـر، والظل منحنٍ لأن الأرض كروية.

- **المناطق الزمنية**: لدينـا مناطـق زمنيـة لأنـه عندمـا تضـيء الشـمس نصـف الأرض الكروية يكون النص الآخـر مظلماً. يمكن تفسـير هـذا الأمـر فقـط إذا كان الكوكـب كروياً ويـدور حـول محـوره الخـاص. فـإذا كانـت الشـمس تُشـرق علـى جـزء مـن الأرض، فـإن الجانـب المقابـل سـيكون مظلماً والعكس صحيـح، وهـذا يسـمح بوجـود فـروق التوقيـت والمناطـق الزمنيـة بخاصـة تلـك الأكثـر مـن 12 سـاعة.

- **مركز الجاذبية**. قـوة الجـذب بـين جسـمين تعتمد علـى كتلتيهما والمسـافة بينهما. سـوف تسـحبهما الجاذبية نحو مركز كتلة الجسـمين،

- **الصور من الفضاء** . خـلال الـ 60 سـنة الماضية مـن اكتشـاف الفضـاء، أطلقـت الأقمـار الصناعيـة والمسـابر إلـى الفضـاء. وبينمـا عـاد بعضهـم فقـد ظـل البعـض الآخـر يسـبح عبـر النظـام الشمسـي ، وترسـل صـوراً رائعـة لأجهـزة الاسـتقبال علـى الأرض. وفي كل الصـور تظهـر الأرض كرويـة، نعـم كرويـة. ويظهـر انحنـاء الأرض في العديـد مـن الصـور التـي يلتقطهـا رُوَّاد الفضـاء علـى مـتن محطـة الفضـاء الدوليـة.

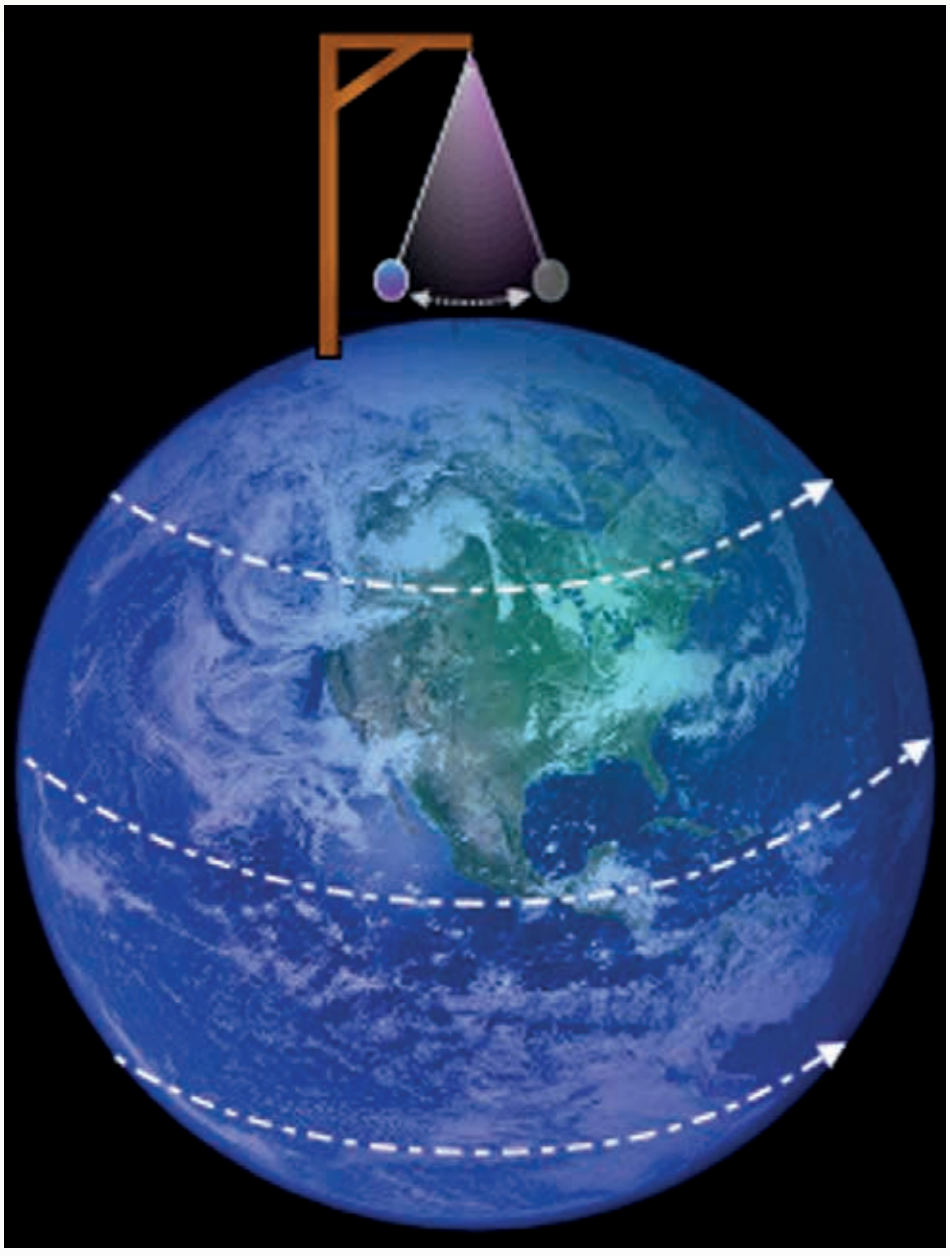
- **يعد تحدّب البحر** دليـل علـى كرويـة الأرض، خصوصـاً بالنسـبة لأولئـك الذيـن يبحـرون دومـاً؛ فهـم لا يسـتطيعون رؤيـة الأنـوار عنـد وضعهـا علـى مسـتوى أعينهـم نفسـه، ولكـن إذا رفعـت علـى ارتفـاع معيّن فإنهـا تصبـح مرئيـة للعيـان

فـوراً. أي أنّ البحـارة وهـم يقتربـون مـن مقصدهـم، يجـدون الشـاطئ يرتفـع باسـتمرار نحـو نظرهـم؛ والأجسـام التـي كانـت في البدايـة منخفضـة، تبـدأ بالارتفـاع. (Harris, 1898).

- عنـد السـفر نحـو الشـمال فـإن طـول ظـل الشـخص الواقـف تحـت أشـعة الشـمس يـزداد. وإذا سـافر الشـخص نحـو الشـرق أو الغـرب فـإن نجـم القطـب سـيبقى كمـا هـو علـى الارتفـاع نفسـه، لكـن لـو سـافر نحـو الشـمال فإنـه يصبـح أكثـر ارتفاعـاً أو الجنـوب فإنـه يصبـح أقـل ارتفاعـاً.

- من أدلة كروية الأرض تفاوت أوقات بدء الكسوفات ووسطها وانجلائها على الخط الواصل بين المشرق والمغرب، فمن كان بلده أقرب إلى المشرق كانت ساعات هذه الأوقات من أول الليل والنهار أكثر؛ ومن كان بلده أقرب إلى المغرب كانت ساعات هذه الأوقات من آخر الليل وآخر النهار (الهمداني، 1884م).

- من الأدلة العلمية الكبيرة التي تدل على كروية الأرض ودورانها حول محورها هو (بندول فوكو Foucault Pendulum) الذي اخترعه الفيزيائي الفرنسي جان برنار ليون فوكو J. B. L. Foucault (توفي 1868م)؛ ففي عام 1851م، علَّق فوكو كرةً كبيرة من الحديد وزنها 28 كغ في نهاية سلك طوله نحو 60م، فأخذت الكرة تتحرك، لكنَّ حركة بندول فوكو لا تقع في مستوٍ واحد. فمع الحركة الدورانية اليومية للأرض يظهر تغيرٌ في مستوى حركة البندول، ولكن تغيّر مستوي حركة البندول ظاهريٌّ فقط، فالأرض هي التي تدور تحت البندول، أما البندول فيبقى متحركاً في المستوى نفسه الذي بدأ فيه الحركة. وهذا التغيُّر لا يبدو ملحوظاً عند خط الاستواء لكنه يكون واضحاً عند القطبين الشماليّ والجنوبيّ.

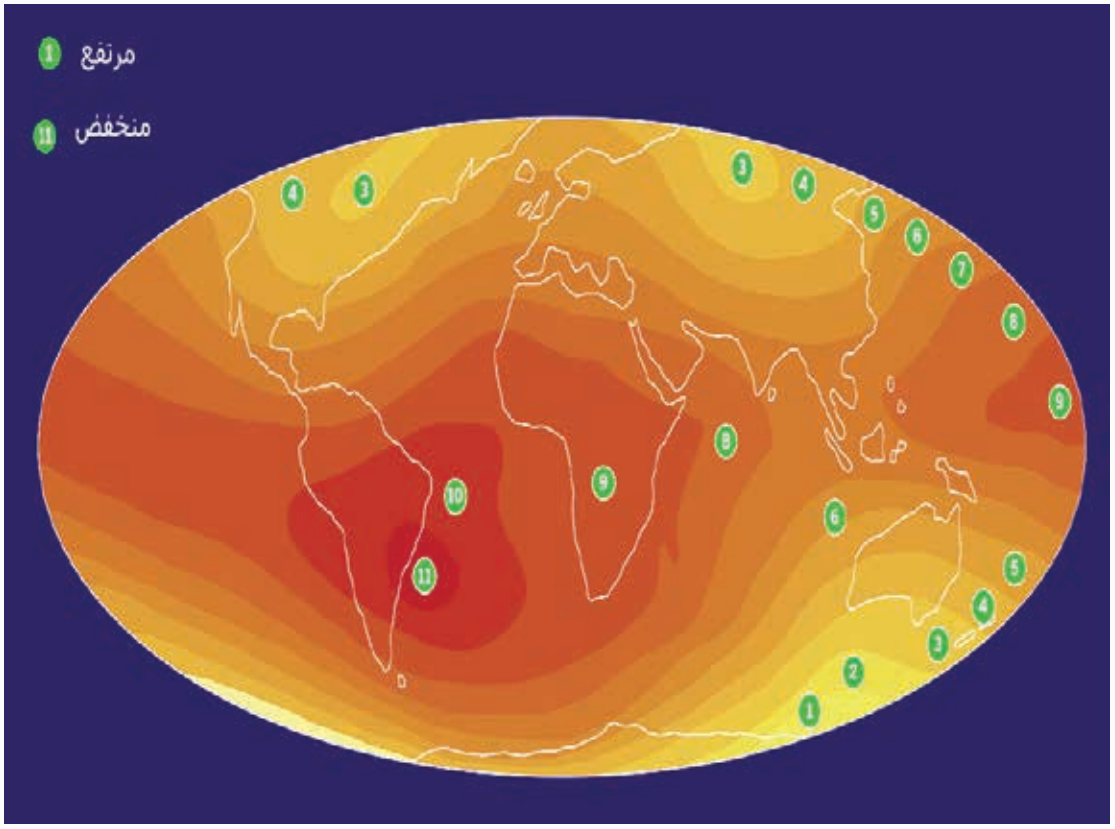


بندول فوكو عند القطب الشمالي: يتأرجح البندول في المستوى نفسه لأنّ الأرض تدور تحته

- **ظهور أثر أو مفعول كوروليس** Coriolis Effect، نسبةً إلى الفيزيائي الفرنسي غاسبار غوستاف كوريوليس G. G. de Coriolis (توفي 1843م)، يدل في تكوّر الأرض. ويعبّر هذا المفعول عن التأثير الظاهر لدوران الأرض على أي جسم يتحرك على سطح الكرة الأرضية. لا يمكن لأي شخص يمشي على قدميه أن يشعر بهذا التأثير وذلك نظراً لضآلته، إلا أنه يؤدي دوراً مُهماً في مسارات الأجسام الطائرة والمتحركة فوق الأرض. فخط سير الصاروخ المنطلق فوق الأرض، على سبيل المثال، يبدو مستقيماً، إلاّ أنه يظهر مقوساً وكأنَّ شيئاً ما يدفعه إذا راقبه شخصٌ يدور مع الأرض، وهذا الدفع الظاهر هو مفعول كريوليس. من خصائص هذا المفعول أنه يمنع الرياح التي تهب من القطبين الشمالي والجنوبي ومن خط الاستواء من التحرك مباشرة نحو الشمال أو الجنوب، حيث تنحرف الرياح التي تهب نحو خط الاستواء باتجاه الغرب، كما تؤثر هذه القوة على اتجاه تيارات المحيطات (Persson, 2005).

- **تشبه الأرض مغناطيساً عملاقاً**، وهي تدور حول خط وهمي يربط القطبين الجغرافيين الشمالي والجنوبي. وبالقُربْ من هذين القطبين فإن للأرض أيضاً قطباً مغنطيسياً، وهو الذي يجعل إبرة البوصلة تشير إلى الشمال. ويقع القطب المغناطيسي بالقُربْ من جزيرة إلف رنجنز في شمالي كندا على بعد 1400 كم تقريباً من القطب الشمالي. كما يقع القطب المغناطيسي الجنوبي بعيداً عن شاطئ ولكز لاند – وهي جزء من قارة القطب الجنوبي– على بُعْد 7502 كم تقريباً من القطب الجنوبي. ويدل قياس شدة المجال على سطح الأرض على كرويتها، فهو عند خط الاستواء أقل ما تكون حيث تبلغ 25 نانوتسلا وتزداد شدة المجال كلما ابتعدنا شمالاً أو جنوباً لتصل إلى

60 نانوتسـلا. وعنـد قيـاس اتجـاه المجـال عنـد خـط الاسـتواء نجـد أنـه مـوازٍ تمامـاً لسـطح الأرض وعمـودي علـى هـذا الخـط وعنـد قياسـه بعيـداً عـن خـط الاسـتواء نجـد أن الاتجـاه يشـير إلـى جهـة محـددة وهـي القطـب الشـمالي في مناطـق الشـمال والقطـب الجنوبـي في مناطـق الجنـوب (Chulliat, et al 2015).

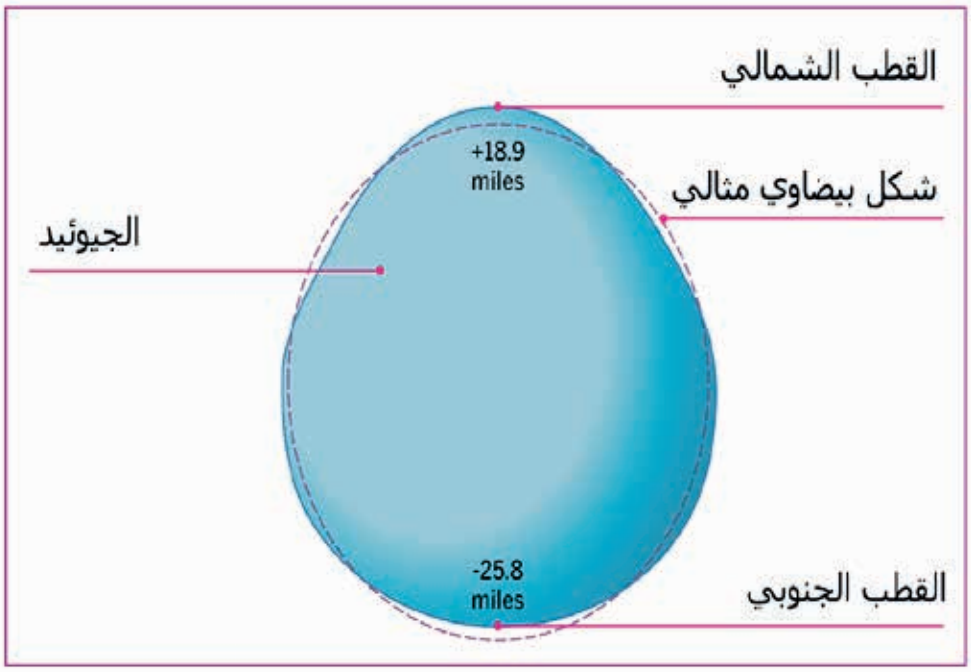


الاختلافات الإقليمية للمجال المغناطيسي الأرضي في شدته من مكان إلى آخر عبر سطح الكوكب، وتكون شدته أكبر بالقُرْب من الأقطاب المغناطيسية

الجيوئيـــد Geoid

اهتـم علـم الجيوديسـيا بشـكل أساسـي بتحديـد شـكل الأرض فيمـا يتعلـق بالمواقـع النجميـة، وزودت أيضـاً علـم الفلـك بوحـدة طـول لقيـاس أبعـاد الأجـرام السـماوية وأبعـاد الكـون. لقـد كانـت الجيوديسـياء أساسـيّة أيضـاً لعلـوم الأرض (رسـم الخرائـط، والجيولوجيـا، والجيوفيزيـاء) كمـا كانـت ضروريـةً غالبـاً للمهـام العسـكرية والاسـتعمارية، سـواءٌ لقيـاس خطـوط الطـول أو العـرض، أو تحديـد الموقع الفلكـي للمحطـات الجيوديسـية، فقـد اسـتخدم الضبـاط العسـكريون علـى الأرض التقنيـات التـي جـرى إنشـاؤها لمراقبـة النجـوم، مـع تكييـف المهـارات والمعرفـة المميـزة للمرصـد الفلكـي لقيـاس أبعـاد الأجسـام الأرضـي، وخـلال القـرن التاسـع عشـر، اعتمـد عـدد كبيـر مـن الـدول الغربيـة علـى الجيوديسـيا لتأسـيس القـوة الإقليميـة وممارسـتها، وبذلـك أصبحـت الجيوديسـيا مكونـاً مركزيـاً للعمـل المنجـز في المراصـد الأوروبيـة الرئيسـة (Schiavon, 2010).

في الواقـع يعـدّ الجيوئيـد Geoid الشـكل الفعلـي لـلأرض ويجـري حسـابه مـع الأخـذ في الاعتبـار كتلتـه ومرونتـه ومعـدل دورانـه. يتبـع متوسـط مسـتوى سـطح البحـر في المحيطـات وهـو علـى شـكل كمثـرى قليـلاً، مـع القطـب الشـمالي (30 كـم) بعيـدًا عـن مركـز الأرض عـن الأماكـن الأخـرى والقطـب الجنوبـي (42 كـم) أقـرب (Adams, & Lambert, 2006).



شكل الجيوئيد - تقريب لشكل الأرض الفعلي - مقابل الشكل البيضوي. يجري تضخيم الجيوئيد بصرياً لتوضيح اختلافه عن الشكل الإهليلجي المثالي (Adams, & Lambert, 2006).

الجيوئيـد هـو السـطح متسـاوي الجهـد Equi-Potential Surface الـذي ينطبـق مـع مسـتوى سـطح البحـر إذا لـم يتغيـر بالريـاح أو المـد والجـزر وارتفاعـه يسـاوي الصفـر. وتكمـن أهميتـه في المسـح الجاذبـي لأنـه أفقـي ويشـكل زاويـة قائمـة علـى اتجـاه التسـارع النـاتج عـن الجاذبيـة في إي مـكان مـن هـذا السـطح أي أن العلاقـة بـين اتجاهـات السـطح والقـوى الثـلاث (التجـاذب، وقوة الطـرد المركزيـة، والجاذبيـة) هـي مـا يعـرف بـ (الجيوئيد). ويسـتخدم كمرجـع لعمليات التسـوية والتحديد الفلكي للانحـراف الرأسـي بـين مسـتوى الجيوئيـد والاسـفيرويد باسـتخدام تكامـل سـتوك Stokes Integral في أي محطـة (العمـري 2021).

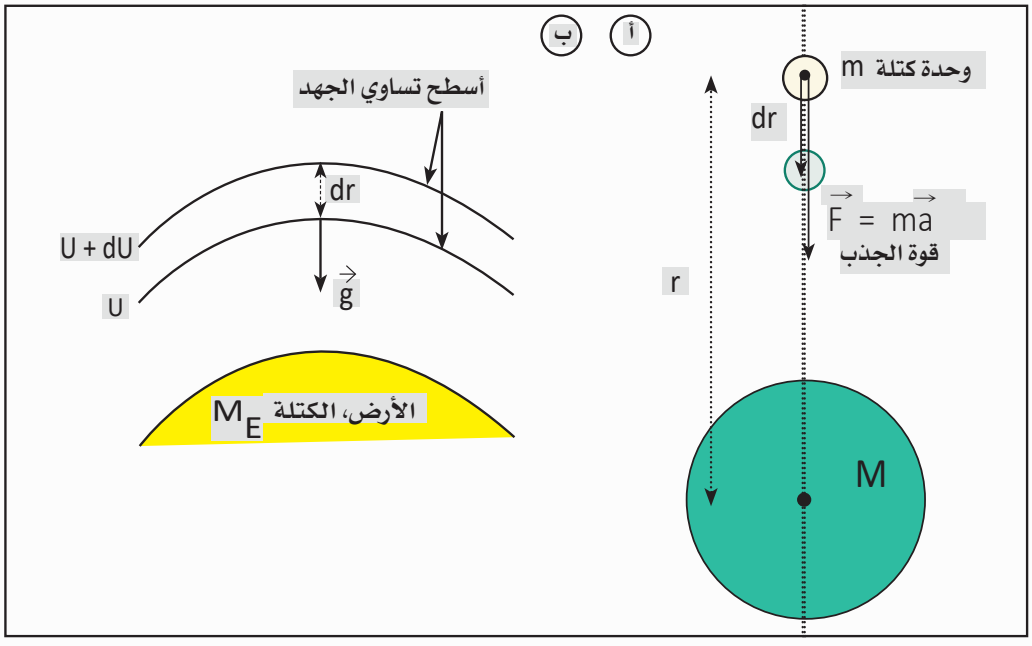
ينظـر إلـى الجهـد التثاقلـي V علـى أنـه عبـارة عـن انحـدار Gradient لعجلـة الجاذبيـة الأرضيـة. ويعـرف علـى أنـه هـو الشـغل المبـذول بواسـطة قـوة الجـذب لكتلـة m2 لتحريـك وحـدة الكتـل مـن مسـافة r إلـى مسـافة مـا لا نهايـة ضـد قـوة التجـاذب بسـبب الكتلـة m1.

$$V = \int_r^{\infty} \frac{GM}{r^2}\, dr = \left| - \frac{GM}{r} \right|_r^{\infty} = \frac{GM}{r}$$

وعجلـة التسـارع التثاقلـي a هـي عبـارة عـن معـدل تغيـر الجهـد التثاقلـي V بالنسـبة للمسـافة r.

$$a = - \frac{\partial V}{\partial r}$$

وإذا إذا افترضنـا أن الأرض جسـم ثابـت لا يـدور أي كرويـة الشـكل وكذلـك متسـاوية الكثافـة فـإن الخـط الواصـل بـين قيـم الجهـد المتسـاوية (يسـمى سـطح تسـاوى الجهـد Equi-Potential Surface) ويمكـن تخيلـه كمـا لـو كان خـط كنتـوري يصـل بـين النقـاط متسـاوية المنسـوب ويكـون موازيـاً لسـطح الأرض ويكـون اتجـاه عجلـة الجاذبيـة متعامـداً علـى هـذا السـطح في أي مـكان علـى سـطح الأرض. ولكـن هـذا غيـر حقيقـي؛ لأن قيمـة واتجـاه الجاذبيـة الأرضيـة تختلـف مـن مـكان لآخـر علـى سـطح الأرض حسـب التغيـرات في خـط العـرض والتضاريس وكثافـة طبقـات الأرض. وبالتالـي فـإن شـكل سـطح الجيوئيـد لـن يكـون منتظمـاً بـل سـيكون شـديد التعـرج والتمـوج، وبالتالـي يصعـب وصفـه بمعـادلات رياضيـة مثـل سـطح Ellipsoid؛ ولـذا يلـزم قياسـه بدقـة باسـتخدام قياسـات الجاذبيـة الأرضيـة الدقيقـة.



أسطح تساوى الجهد واتجاه عجلة الجاذبية متعامدة في أي مكان على سطح الأرض.

ولمعرفة العلاقة بين سطح الجيوئيد والجاذبية الأرضية يجب معرفة الفرق بين:

- سطح أو نموذج Spheroid.
- الجيوئيد Geoid.
- الشاذة التثاقلية Gravity Anomaly.
- شاذة الجيوئيد Geoid Anomaly.
- تعرجات الجيوئيد (Geoid Undulations).

سطح أو نموذج Spheroid: لو افترضنا أن سطح الأرض Smooth وتركيبها متجانس Homogenous، وبالتالي لا يوجد تغير أفقي في الكثافة وأن شكل الأرض ليس كروياً وإنما شكلها مفلطح أو بيضوي Ellipsoidal فإن سطح الأرض في هذه الحالة يسمى Spheroid

الشاذة التثاقلية Gravity Anomaly:

الفرق بين قيمة الجاذبية المقاسة في أي مكان (g) وقيمة الجاذبية المتوقعة عند هذا المكان (γ) لنموذج Spheroid. $\Delta g = g - \gamma$

شـــاذة الجيوئيـــد Geoid Anomaly

هـي الفـرق بـين الجهـد التثاقلـي عنـد سـطح البحـر (الجيوئيـد) وقيمـة الجهـد التثاقلـي المتوقعـة عنـد هـذا المـكان طبقـاً لنمـوذج Spheroid

تعرجات الجيوئيد (Geoid Undulations): هـي تعرجـات أو تموجـات في سـطح Geoid تنتـج مـن الاختلافـات الأفقيـة في كثافـة مـادة الأرض

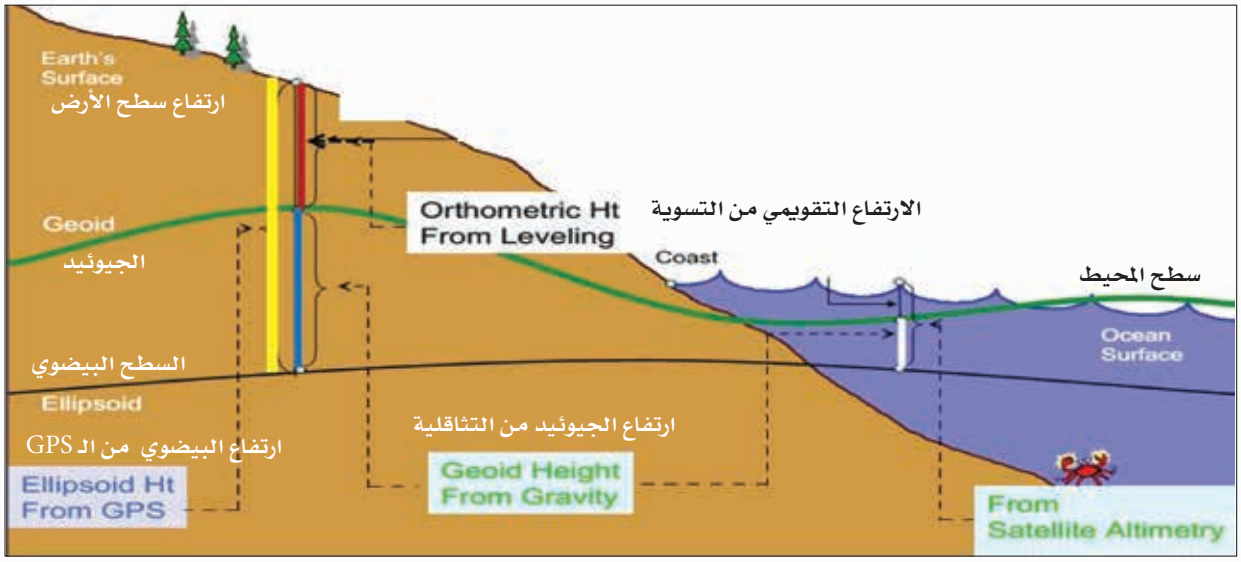
وكمـا ذكـر سـالفاً بـأن سـطح الجيوئيـد هـو سـطح تسـاوى الجهـد التثاقلـي ويكون دائمـاً وفـى أي مـكان علـى سـطح الأرض متعامـد مـع اتجـاه الجاذبيـة الأرضيـة. وبالتالـي يعتبـر هـو المرجـع الطبيعـي للارتفاعـات. ولمعرفـة علاقـة سـطح الجيوئيـد بالارتفاعـات يجـب معرفـة الفـرق بـين ارتفاعـات الأسـطح التاليـة:

سطح Spheroid: هـو شـكل افتراضـي لسـطح الأرض لـو افترضنـا أن سـطحها Smooth وتركيبهـا متجانـس Homogenous وشـكلها بيضـوي Ellipsoidal ولا يوجـد تغيـر أفقـي في الكثافـة.

Ellipsoid Height: هـي قيمـة الارتفـاع المقاسـة باسـتخدام GPS وهـى قيمـة ارتفـاع سـطح الأرض بالنسـبة لسـطح Spheroid أو Ellipsoid.

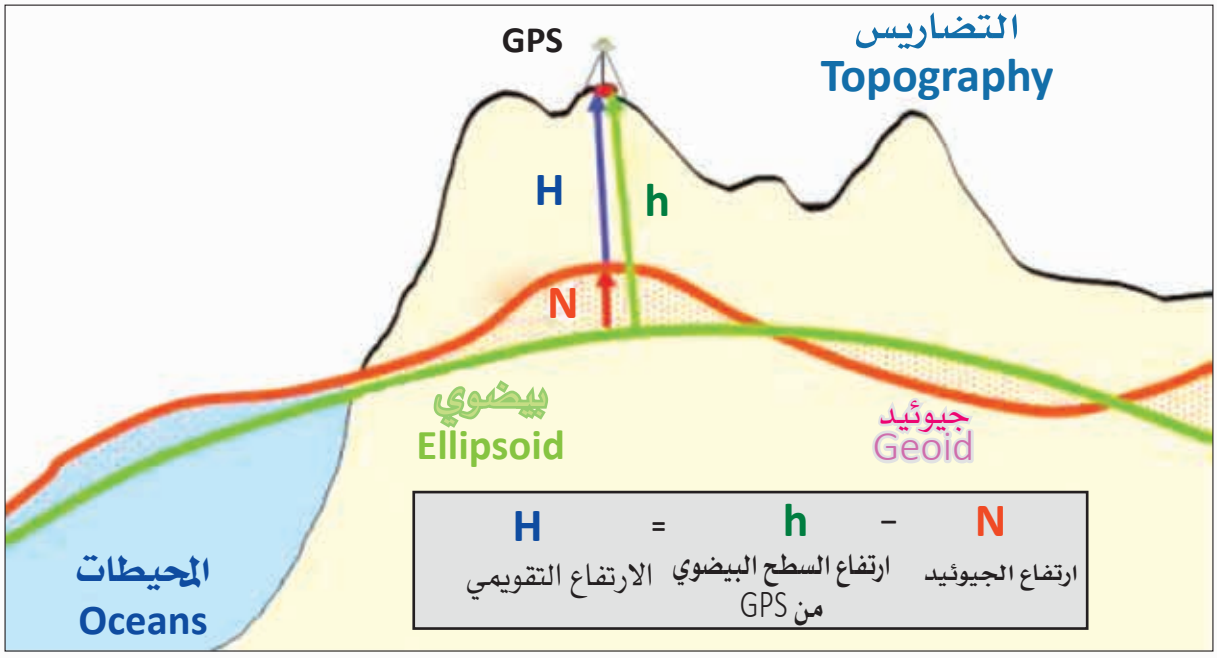
Orthometric Height: ارتفاع سطح الأرض بالنسبة لسطح الجيوئيد.

Geoid Height: هـي ارتفـــاع ســـــطح Geoid بالنسـبة لسـطح Spheroid أو Ellipsoid أي يعكـس تموجـات وتعرجـات سـطح الجيوئيـد(Geoid Undulations) .



علاقة سطح الجيوئيد بالارتفاعات

إذا كلما حددنا قيمة Geoid Height أو التموج في سطح Geoid بدقة كلما أمكننا تحديد قيمة Orthometric Height بدقة أيضاً وهذا هو الغرض من مسوحات الجاذبية الخاصة بالجيوئيد.



تحديد قيمة Orthometric Height

محيـط الأرض وقطـرها

لقد دفع الإقرار بكروية الأرض بالعلماء للتعامل مع الأرض على أساس أنها كرة مثالية وتامّة التكوّر، وبالتالي فإنّ مسقط هذه الكرة هو دائرة يمكن تطبيق كل المعارف والقوانين الهندسية النظرية عليها. ومن هنا أمكن حساب محيطها ونصف قطرها، وبالتالي أمكن إجراء الكثير من التطبيقات واسعة النطاق. لذلك يمكننا اعتبار قياس محيط الأرض Earth's Circumference وقطرها إحدى أهم نتائج كروية الأرض. وقد كانت هناك عدة محاولات عبر التاريخ لمعرفة هذه القيمة، لأنها تسهّل على الفلكيين والمسَّاحين الكثير من الحسابات.

أجريت مسوحات جيوديسية دقيقة خلال القرن التاسع عشر في إنجلترا وروسيا والنرويج والسويد وألمانيا والهند والبيرو. وأخيراً، فإن القياسات العابرة للقارات، التي أنجزتها هيئة المسح الجيوديسي والساحلي الأمريكية في عام 1897م، قدمت مساهمة أبعد وأكثر أهمية في معرفتنا بحجم وشكل الأرض. ومن الواضح أن القوس الموازي لخط العرض قد يضيف إضافات إلى هذه المعرفة، بالإضافة إلى قوس من خط الزوال. ففي الحالة الأولى، تكمن المشكلة الفلكية في إيجاد الفرق في خط الطول بين أطراف القوس المقاس؛ أما في الأخير فإنّ الاختلاف المقابل يكون في خط العرض.

العمليات الجيوديسية المناسبة، أي معرفة عدد الأميال والقدم والبوصة لمحطة من محطة أخرى تُجرى بواسطة نظام من القياسات غير المباشرة يسمى (التثليث Triangulation) وهي طريقة مخصصة لتحديد الأجزاء المجهولة للمثلثات من مثلثات معلومة. إذْ عندما تُعرف قيمة ضلع واحد وزاويتان في

نهايته، يمكننا معرفة قيمة الأضلاع الأخرى، بغض النظر عن النسب النسبية لهذه الأضلاع. من الواضح إذاً أنه إذا جرى قياس طول ضلع قصير، فيمكن العثور على طول الضلع الطويل من خلال عملية حسابية رياضياتية أبسط بكثير وأقل ملالاً وأكثر دقة. إذاً التثليث هو عملية إيجاد المسافة الدقيقة بين نقطتين بعيدتين عن طريق توصيلهما بسلسلة أو شبكة من المثلثات. يسمى الضلع القصير من المثلث الأساسي، الذي يجري قياسه بالفعل، قدماً إثرَ قدم، بالقاعدة. ورغبة بالحصول على دقة كبيرة، غالباً ما يجري قياس القاعدة عدة مرات. بعد ذلك يجب فقط قياس الزوايا الأفقية في الغالب؛ ويتم هذا الجزء من العمل بآلة التلسكوب السمتي الارتفاعي Altazimuth

ونتيجةً لمثل هذه الأعمال، وجد أن طول أقصر قطر للأرض، أو المسافة بين القطبين، هو 12640 كيلو متراً. أما في مستوى خط الاستواء، يبلغ قطر الكرة الأرضية 12683.2 كيلو متراً، أو أكبر بنحو 300 جزء من القطر بين القطبين. هذا الجزء أقل بقليل من انحراف الأرض أو انضغاطها القطبي. وتشير القياسات الأخيرة إلى أن خط الاستواء نفسه بيضوي الشكل قليلاً. لذلك يمكن اعتبار شكل الأرض بمثابة شكل بيضوي بثلاثة أقطار أو محاور غير متساوية. ومن خلال معرفة أطوال هذه الأقطار، أمكن حساب حجم الأرض ووجد أنه يبلغ 260 مليار ميل مكعب.

من الناحية التاريخية فقد يعود الفضل إلى **الكلدانيين** في إجراء التقدير الأول لمحيط الأرض (38400 كيلومتراً)، لكن من الموثّق لدينا أن الهنود واليونانيين والعرب والأوروبيين قد بذلوا جهوداً مهمة أيضاً.

لقد تغيّرت قيمة محيط الأرض بين اليونانيين الذي حسبوا قيمتها بين القرنين الرابع قبل الميلاد والثاني بعد الميلاد نجملها في الجدول الآتي، علماً أن محيط الأرض الحالي الوسطي (40033 كيلو متراً)، ونصف قطرها (6372 كيلو متراً):

العالم	المحيط (بوحدة كيلومتر)	نصف القطر (بوحدة كيلومتر)
أرسطو	70796	11267
أرخميدس	523800	83251
إيراتوستنيس	42895	6827
بوسيدنيوس وبطليموس	25750	7066

طبعاً كانت وحدة القياس المستخدمة عند اليونانيين هي (الستاد أو ستاديون كما يكتبها البعض)، التي ترجمها العرب بلفظ (غُلْوَة). ونظراً لكون وحدة الستاد اليونانية غير ثابتة القيمة عبر العصور، فقد أدى ذلك لاختلاف قيمة المحيط ونصف القطر سواء عند اليونانيين أو عند من أخذ عنهم من العرب والمسلمين لاحقاً. وهو أمر يلقي بالضوء على مشكلة عدم توحيد الوحدات والمقاييس في تلك العصور. ويُعتقد أن القيمة التي حصل عليها إيراتوستنيس هي الأقرب للقيمة الحالية. إذْ كان كل 1 ستاد يعادل 600 قدم يوناني (582 = قدم إنكليزي = 174.6 متر).

لقد كان حساب محيط الأرض الذي يُعزى إلى هرمس Hermes معروفاً لدى إبراهيم بن حبيب الفزاري (توفي حوالي 180هـ /796م)، وقد قدّر هذا المحيط

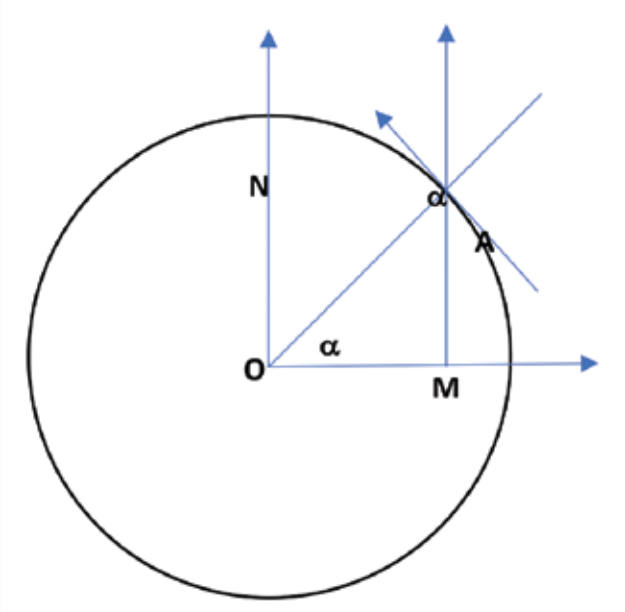
بـ (9000 فرسـخ)، وبلـغ طـول درجـة علـى خـط الاسـتواء 25 فرسـخاً، حيـث إن الفرسـخ الواحـد يعـادل 3 أميـال أو 5919 مترا، وبالتالـي فـإن قيمـة محيـط الأرض عنـد هرمـس هـي (53271 كيلومتـراً). يبـدو أن الفـزاري قـد اعتمـد علـى مصـادر فارسـية حتـى حصـل علـى هـذه المعلومـات.

وقـد ذكـر الإدريسـي أن هرمـس قـدر محيـط الأرض بالقيمـة (36 ألـف فرسـخ = 213084 كيلومتـراً)، وهـي تعـادل أربعـة أضعـاف القيمـة التـي وردت عنـد الفـزاري. حيـث قـال: «وأمـا هرمـس فإنـه قـدر إحاطـة الأرض وجعـل لـكل جـزء مائـة ميـل (فـ) تكـون بذلـك سـتة وثلاثـين ألـف ميـل، وتكـون مـن الفراسـخ اثنـي عشـر ألـف فرسـخ وبـين خـط الاسـتواء وكل واحـد مـن القطبـين تسـعون درجـة واسـتدارتها عرضـاً مثـل ذلـك». وقبـل الإدريسـي سـبق أن أكّـد لنـا البيرونـي علـى قيمـة (9000 فرسـخ) المنسـوبة إلـى هرمـس، إذ قـال: «وأمـا الفـزاري فذكـر في زيجـه، أن دور الأرض عنـد الهنـد سـتة آلاف وسـتمائة فرسـخ، علـى أن الفرسـخ سـتة عشـر ألـف ذراع. وأنـه عنـد هرمـس تسـعة آلاف فرسـخ، علـى أن الفرسـخ اثنـا عشـر ألـف ذراع. فتكـون حصـة الجـزء الواحـد مـن ثلاثمائـة وسـتين – بحسـب قـول الهنـد- مـن الفراسـخ ثمانيـة عشـر وثلـث، فـإن كان كل واحـد منهـا ثلاثـة أميـال كانـت للجـزء الواحـد خمسـة وخمسـين ميـلاً، وكل ميـل خمسـة آلاف وثلاثمائـة وثلاثـة وثلاثـين ذراعـاً وثلـث. وبحسـب قـول هرمـس خمسـة وعشـرين فرسـخاً، تكـون خمسـة وسـبعين ميـلاً، كل واحـد أربعـة آلاف ذراع. ثـم زعـم الفـزاري أن بعـض الحكمـاء قـدّر لـكل جـزءٍ مائـة ميـل، فصـارت اسـتدارة الأرض اثنـي عشـر ألـف فرسـخ».

مـع التوصـل إلـى توافـق بـين رأيـي فيثاغـورس وأرسـطو بشـأن شـكل الأرض علـى أنـه كـروي، تحـول التركيـز إلـى تقديـر حجمهـا. وأفـاد أرسـطو أن الجهـود قـد

بذلت بالفعل لحساب المحيط - ربما من خلال المواضع المختلفة للنجوم عند النظر إليها من خطوط عرض مختلفة - وقدم لنا أحد أقدم تقدير موجود وهو (400000 ستاد). وإذا اعتبرنا أن قيمة الستاد نحو 500 قدم (كما ذكرنا هذه نقطة خلافية لأن القياسات لم تكن موحدة)، سنحصل على القيمة 39000 أو 40000 ميل (64000 -62400 كيلومتراً) عند خط الاستواء.

ويمكن تلخيص طريقة أرسطو في حسابه لمحيط الأرض كما يأتي: بفرض أن كوكب الأرض كرة تامّة التكوّر، وأن النجوم تدور حولها على بُعد كبير عنها حول محور يمرّ في كل من نجم القطب الشمالي الثابت، ومركز الأرض الثابت، عندها فإن الزاوية التي يصنعها تقاطع هذين المحورين عند نقطةٍ ما على سطح الأرض (النقطة A) هي:

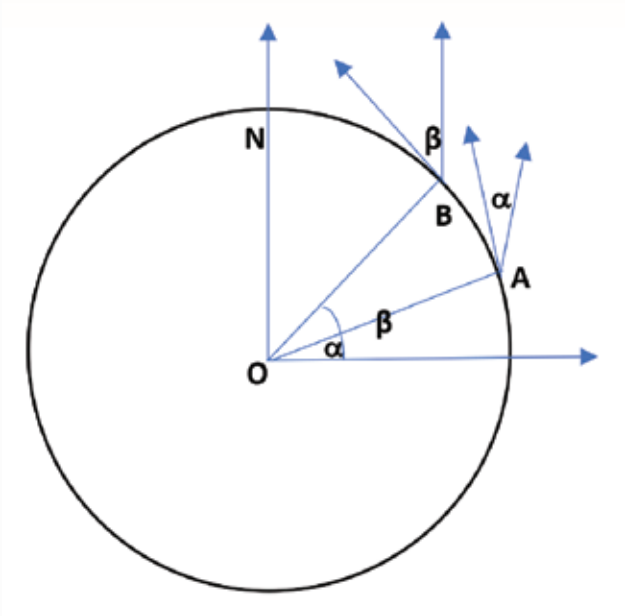


$$\alpha + \angle MAO = 90^\circ$$

$$\angle AOM + \angle MAO = 90^\circ$$

$$\angle AOM = \alpha$$

وإذا نظرنـا إلـى النقطتـين (A, B) علـى خـط طـول واحـد علـى سـطح الأرض، وبقيـاس الزاويتـين اللتـين يصنعهمـا نجـم القطـب مـع الأفـق عنـد هاتـين النقطتـين.



$$\theta = \beta - \alpha$$

$$\frac{AB}{C} = \frac{\theta}{2\pi}$$

$$C = \frac{2\pi(AB)}{\beta - \alpha}$$

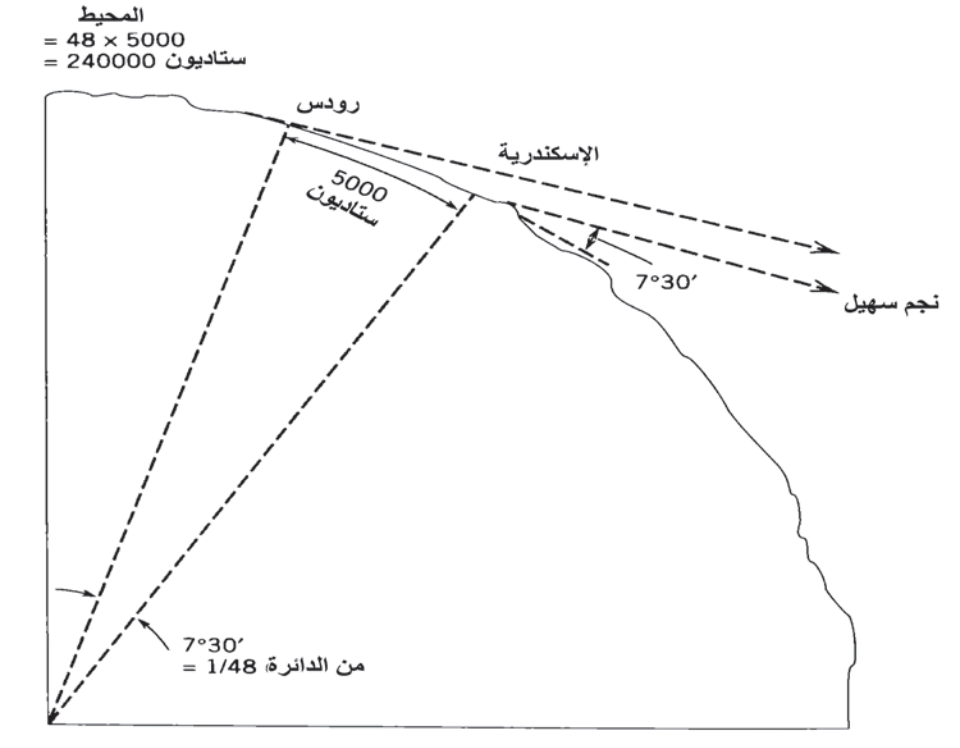
حيث:

C محيط الأرض.

θ الزاوية التي يقطعها المسافر من النقطة A إلى النقطة B.

وبذلـك وصـل أرسـطو إلـى أن نصـف قطـر الأرض هـو (400000 سـتاد)، في حـين قـدره أرخميـدس بالقيمـة (300000 سـتاد).

بعـــد قـرن مـن قيـــاس إيراتوستيـــس قـام بوسـيدينوس Poseidonius (تـوفي 51 ق.م) بإجـراء قيـاس آخـر لنصـف قطـر الأرض. لكنـه اسـتخدم أسـلوباً مختلفـاً وجيـداً مفترضـاً بالتأكيـد أن الأرض كرويـة للحصـول علـى قيمـة قريبـة مـن (240 ألـف سـتاد). فقـد لاحـظ أن نجـم سـهيل Canopus كان في الأفـق عنـد مشـاهدته مـن جزيـرة رودس، بينمـا كان ارتفاعـه في الإسـكندرية 48/1 مـن الدائـرة (7° ‘30). حيـث قـدرت المسـافة بـين المدينتـين بـ (5000 سـتاد)، ولكـن بمـا أن الميـاه تفصـل بينهمـا، فقـد يكـون هـذا ناتجـاً فقـط عـن تقديـرات البحـارة. كمـا هـو الحـال مـع إيراتوسـثنيس، كانـت الزاويـة التـي اسـتخدمها بوسـيدونيوس خاطئـة بشـكل كبيـر، في الواقـع بنسـبة 2، وكانـت المسـافة بعيـدة بنحـو 30% إلـى 40%. ومـع ذلـك، كانـت الأخطـاء تعويضيـة، أي جُمِـعَ بـين الزاويـة الصغيـرة جـداً والمسـافة الطويلـة جـداً لإعطـاء نتيجـة مقبولـة بالصدفـة. ويـروي سـترابون أن نتيجـة قيـاس بوسـيدونيوس كانـت (180 ألـف سـتاد)، أي أقـل ممـا ذكـر أعـلاه.



اعتمد بوسيدونيوس على نجم سهيل بدلاً من الشمس في قياسه لمحيط وقطر الأرض

نظـــراً لاعتقاد العالم الهنـــدي **براهما ســـيدهانتا** أو براهمـــا جوبتـــا Brahma Siddhanta (توفي نحو 668م) بكروية الأرض، فقد قدّر أن محيطها هو (5000 يوجانا)، وتعادل اليوجانا Oyojana الواحدة (7.2 كيلو متراً)، أي أن قيمة محيط الأرض وفق حساباته هي (36000 كيلو متراً) ومن ذلك يمكن حساب اختلاف المنظر الأفقي للقمر والمسافة من الأرض، فالأخير هو (51566 يوجانا ≅ حوالي 404800 كيلو متراً)، وهو رقم جيد بشكل ملحوظ مقارنةً بالقيمة الحالية.

مـن الناحيـة الهندسـية البحتـة، فقـد خـصّ العلمـاء العـرب دراسـة الأشـكال المختلفـة للكـرة بعلـم قائـم بذاتـه هـو (علـم الأكـر)، وقـد لاحظـت أن العلمـاء العـرب والمسـلمين كانـوا يسـتخدمون في كل كتاباتهـم مصطلـح (دور الأرض) ليعبّـروا بـه عـن مصطلـح (محيـط الأرض) المتـداول حاليـاً.

حسـب تقديـرات معظـم المؤرخـين الـذي درسـوا بدقـة مـا قـام بـه العلمـاء العـرب والمسـلمين في قيـاس محيـط وقطـر الأرض، فـإن العـرب نجحـوا إلـى حـدٍ بعيـد باسـتخدام تقنياتهـم الرصديـة وطرائقهـم الحسـابية بشـكلٍ أفضـل مـن أسـلافهم الفـرس والهنـود واليونانيـين. ويـرى بعـض الباحثـين أن القياسـات العربيـة لمحيـط الأرض كانـت أدق مـن القياسـات اليونانيـة، فقـد زاد تقديرهـم لدرجـة العـرض عـن الحقيقـة بنحـو 877 متـراً، في حـين زاد قيـاس إيراتوسـثنيس لدرجـة العـرض عـن الحقيقـة بنحـو 1575 متـراً.

ويعتقـد بعـض الباحثـين أن جميـع العلمـاء العـرب اعتمـدوا الطريقـة الجيوديسـية التـي تتلخـص بتعيـين طـول قـوس مـن خـط الطـول في عـروض مختلفـة. والتـي اسـتبدلت لاحقـاً مـن قِبـل الأوروبيـين فيمـا بعـد بطريقـة (التثليـث) أي حسـاب المثلثـات غيـر المباشـرة، التـي وضعهـا عالـم الفلـك والفيزيائـي الفرنسـي جـان بيـكار J. Picard (تـوفي 1682م). ومـن ثـم أدخلـت طريقـة الجاذبيـة التـي تعتمـد علـى حسـاب فروقـات الجاذبيـة بـين مختلـف الأماكـن علـى سـطح الأرض لكـن البحـوث الحديثـة أثبتـت أن البيرونـي كان علـى معرفـة تامـة بطريقـة (التثليـث)، وقـد طبقهـا عمليـاً بـين بغـداد وغزنـة.

يعـدّ تقديـر قطـر الأرض عنـد يعقـوب بـن طـارق (تـوفي 179هـ /796م) مـن أوائـل التقديـرات العربيـة التـي وصلتنـا قبـل بعثـة فريـق المأمـون بأكثـر مـن عشـرين سـنة.

حيث إنه افترض أن قطرها (21000 فرسخ)، ومحيطها (6597 فرسخاً). على اعتبار أن طول الفرسخ (16000 ذراع) أي نحو (8 كيلومترات) (سزكين - تاريخ التراث العربي).

نعلم جميعاً أن المأمون (توفي 218هـ/ 833م)، قد قام باستكمال مسيرة العلم وتطبيقاته التي سبق وأن بدأها عمه الخليفة أبو جعفر المنصور (توفي 158هـ / 775م) ووالده هارون الرشيد (توفي 193هـ / 809م)، ولكن بزخم أكبر مما كان عليه الحال في عهدهما. ذكرنا سابقاً أن تقديرات محيط الأرض وقطرها كانت معروفة في الحضارات السابقة وحتى عند بعض العلماء العرب مثل يعقوب بن طارق. حتى إن عم المأمون جعفر المنصور، قد سبق وأن قام بتجربة لقياس الدرجة الأرضية والاستفادة منها في تحديد حجم الأرض ومحيطها (عفيفي 1977). لكن أخبار هذه التجربة وفريق العمل الذي قام بها والقيمة التي توصلوا إليها غير معروفة بالوثائق بالنسبة لنا.

ذات يوم رغب المأمون أن تجري عملية القياس لمحيط الأرض وقطرها. ويبدو أن الدوافع الكامنة وراء تلك الرغبة كانت:

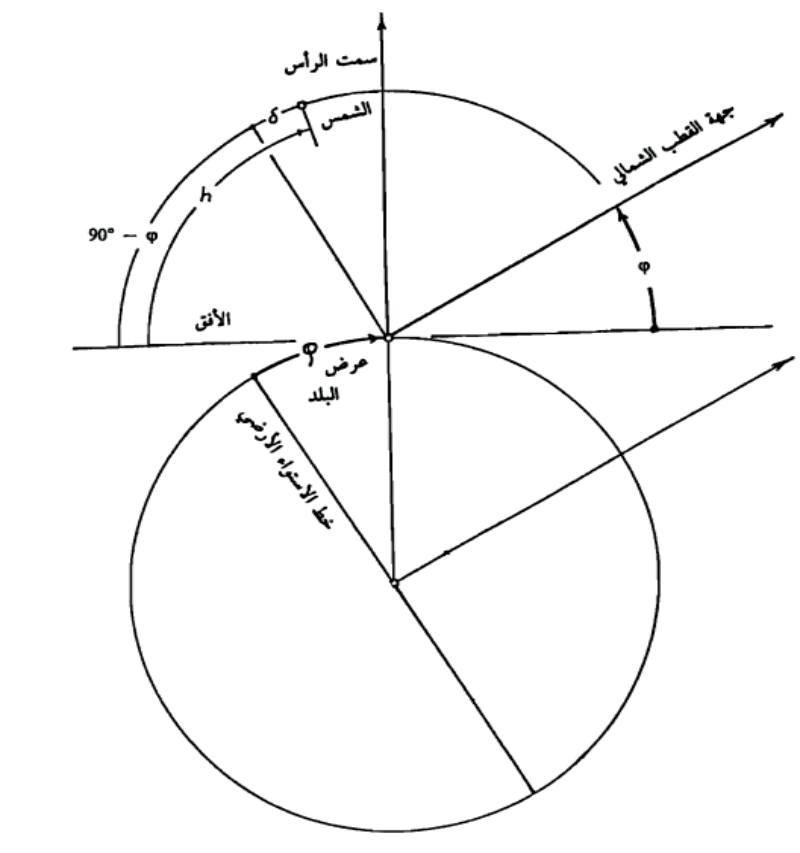
- **التحقق من قيمة خط الطول المقابل لدرجة واحدة التي سبق وأن وردت عند اليونانيين.**
- **ضبط قيمة (الستاديا) التي وردت عند أرسطو.**
- **التحقق من كروية الأرض بالقياس.**
- **ومن نتيجة القياسات السابقة حساب المسافة بين مكة وبغداد بشكلٍ دقيق.**

وهـي أهـداف علميـة وتطبيقيـة كمـا نلاحـظ، وهـي تضاهـي - دون مبالغـة - البعثـة الفرنسـية التـي سـتقوم بهـا الأكاديميـة الفرنسـية بعـد عمـل المأمـون بنحـو 900 سـنة.

اشـترك في فريق الإشـراف محمد بن موسـى الخوارزمي (توفي 232هـ/ 846م)، مؤسـس علم الجبـر الشـهير. وقـد أكـد البيرونـي مشـاركة الخوارزمـي ضمـن فريـق الرصـد الـذي شـكله المأمـون، إضافـة لأبنـاء موسـى بـن شـاكر (البيرونـي 1992). طبعـاً بـدأت عمليـة القيـاس بالانطـلاق مـن نقطـة مركزيـة، حيـث اتجهـت المجموعـة الأولـى نحـو الشـمال واتجهـت المجموعـة الثانيـة نحـو الجنـوب وبذلك تغيـرت الزوايا الرأسـية للنجـم القطبـي بمقـدار 1°. وقـد جـرى قيـاس المسـافات باسـتخدام حبـال طويلـة معقـودة، ويشـير مؤرخـون آخـرون إلـى قيـاس المسـافة التـي قطعهـا الفرسـان في وقـت معـين. وقـد جـرى قيـاس المسـافات بالأميـال العربيـة بنتيجـة مقبولـة تبلـغ 56 أميـال عربيـة لـ 1°، والمكافـئ لذلـك (111073 كيلومتـراً) أي أن محيـط الأرض وفقـاً لقياسـاتهم بآلاتهـم العلميـة في ذلـك الوقـت قـد بلـغ (39986 كيلـو متـراً)، وهـي قريبـة جـداً مـن القيمـة الحاليـة (40000 كيلـو متـراً) بفـارق بسـيط جـداً قـدره (14 كيلـو متـراً فقـط).

ويـرى بعـض المؤرخـين أن كريسـتوف كولومبـوس قـد اسـتخدم نتيجـة فريـق بعثـة المأمـون لكنـه افتـرض أنـه أخذهـا بالأميـال الإيطاليـة (الرومانيـة) وليـس بالأميـال العربيـة، لأن الفـرق بينهمـا حوالـي 25% وهـو صغيـر جـداً. وبالتالـي، فـإن الإبحـار غربـاً مـن أوروبـا نحـو أمريكا باسـتخدام أرقامـه سـيتطلب السـفر فقـط 60° خـط طـول و 2750 ميـلاً، بينمـا كان ينبغـي أن يكـون 220° و 12000 ميـل. يمكـن وضـع العديـد مـن السـيناريوهات الأخـرى، لكنهـا تشـير ضمنـاً إلـى أن المسـافة المتجهـة

غربـاً كانـت أقصـر بكثيـر بينمـا كانـت في الواقـع أطـول بكثيـر. مـن المحتمـل أن كولومبـوس لـم يقلـل مـن حجـم الأرض فحسـب، بـل بالـغ أيضـاً في تقديـر حجـم المنطقـة المعروفـة باسـم العالـم الصالـح للسـكن (Smith1997).



يساوي ارتفاع نقطة الأوج في دائرة الاستواء السماوي تمام ارتفاع القطب الشمالي، وارتفاع القطب الشمالي يساوي عرض البلد. ولتحديد خط العرض φ يجب أن نعلم h ارتفاع الشمس الزوالي (أي ارتفاع الشمس عند مرورها فوق خط زوال مكان الراصد في يوم معين)، وكذلك يجب أن نعلم ميل الشمس δ في لحظة الرصد، ومن ثمَّ يُحسب خط العرض من المعادلة الآتية التي تتحقق في مناطق الكرة الشمالية من الأرض $\varphi = 90° - (h - \delta)$

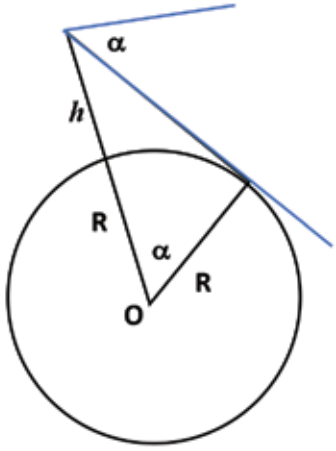
في الواقع، لقد طلب المأمون من فريق البعثة قياس عدة خطوط (ربما 4 خطوط) حول بغداد والرقة. ويرى الباحث أنور العقاد أن سبب طلب المأمون القيام بأكثر من قياس هو اعتقاده بأن «الأرض كرة غير منتظمة»، مخالفاً بذلك اعتقاد إيراتوستينيس الذي قال بأن الأرض كرة نموذجية (العقاد 1983). وإذا كان المأمون يقصد بها حالة التفلطح فعلاً، فإنه سيكون بهذا الافتراض قد سبق إسحق نيوتن، كما سبقه ثابت بن قرة أيضاً، مع فارق تحديد السبب بينهما؛ فقد قال نيوتن: «إن مادة الأرض لا تتأثر بالجاذبية نحو مركزها فحسب، وإنما تتأثر أيضاً بالقوة الطاردة المركزية الناشئة عن دورانها حول نفسها، وهذا القوة تبلغ ذروتها عند خط الاستواء».

قدّر محمد بن أحمد الخوارزمي (توفي نحو 387هـ/ 997م) أنّ «قطر الأرض سبعة آلاف فرسخ». أي (41433 كيلومتراً)، في حين أن قطر الأرض وفق بعثة فريق المأمون هو (12734.3949 كيلومتر) وهي كما نلاحظ أنه يزيد بـ (3.25 مرة). أيضاً لا نجد مبرراً لعدم اعتماد الخوارزمي لقيمتهم التي حسبوها لمحيط الأرض، وإنما اعتمد قيمة أرخميدس (7036 فرسخاً).

قال إخوان الصفا: «وبعد الأرض من السّماء من جميع جهاتها متساو، وأعظم دائرة في بسيط الأرض (25455 ميلاً و6855 فرسخاً)، وقطر هذه الدّائرة هو قطر الأرض (6551 ميلاً و2167 فرسخاً) بالتقريب». وهذا يعني أن إخوان الصفا قد قدروا قيمة قطر الأرض بـ (12826.473 كيلو متراً) وهي قريبة من القيمة الحديثة (12668 كيلو متراً)، وقريبة من قيمة بعثة المأمون.

مع كل الجهود الكبيرة التي قام بها فريق بعثة المأمون في قياس محيط الأرض، فإن أبا الريحان البيروني (توفي 440هـ/ 1048م) لم يكن راضٍ عنها.

فقد اطلع على كل الروايات التي تحدثت عن جهود فريق البيروني، وقارن فيما بينها وحاول أن يتحقق منها ووصل إلى نتيجةٍ مفادها أنهم غير متفقين على رأي واحد. ولعل هذا هو السبب الذي دفع البيروني لوضع طريقته (التي تسمى حالياً طريقة انحطاط الأفق المرئي Horizon Depression Method) (السويسي 1985). لقياس نصف قطر الأرض في كتابه (تحديد نهايات الأماكن لتصحيح مسافات المساكن) ويقصد بالانحطاط: الزاوية التي تقع تحت خط الأفق. وقد اختار وقت قياسها عند مغيب الشمس، حيث تكون حدّة أشعة الشمس مكسورة تماماً، إضافةً لتجنب أخطاء الرصد الناجمة عن انكسار أشعة الضوء في الغلاف الجوي للأرض. وقد افترض وجود جبلٍ بمحاذاة البحر، وعندما تغيب الشمس يمكن للمرء قياس الزاوية التي يصنعها رأس الجبل مع خط الأفق (α). ثم يقيس الارتفاع العمودي للجبل (h)، ومنه يستخرج نصف قطر الأرض كما يأتي:



$$cos\alpha = \frac{R}{R+h}$$

$$R.cos\alpha + h.cos\alpha = R$$

$$R = \frac{h.cos\alpha}{1-cos\alpha}$$

وبعد إجراء تطبيق عملي حصل البيروني على القيمة: 25000 ميل، وهي قيمة قريبة من القيمة الحالية (غصيب) لأن البيروني اعتبر أن كوكب الأرض كرة مثالية، في حين أنها بيضوية الشكل وليست تامة الكروية.

وقد اكتشف الباحث رايموند ميرسر أن البيروني ما كان لينجح في حساباته لمحيط الأرض لولا أنه طبّق طريقة التثليث – التي ستُنسب إلى الفرنسي جان بيكارد لاحقاً – عندما أراد تحديد خط طول مدينة غزنة، معتمداً على معرفته لقيمة خط العرض والمسافات التي قدمها له المسافرون. فقد تمكّن البيروني من القيام بالتحويل المثلثاتي للمسافات التي قدمها له المسافرون إلى إحداثيات حقيقية .

ان المَعْلَمْ الحقيقي في تطوير طريقة التثليث كان التقنية التي استخدمها ويلبرد سنيل W. Snellius (توفي 1626م) في عشرينيات القرن السادس عشر. وقد لاحظ سنيل أن بين بيرخن أوب زووم وألكمار في هولندا، مخطط تثليث مع خمسة خطوط أساسية في محيط ليدن. انحرفت هذه التقنية عن جميع المقاييس القوسية السابقة حيث يمكننا تحديد المسافة بين النقاط الطرفية بشكل غير مباشر وليس بشكل مباشر. أي بدلاً من قياس أكثر من 100 كيلو متراً بواسطة شريط أو حبل، كل ما هو مطلوب هو قياس خط واحد على الأقل بدقة شديدة (في حالة سنيل، متوسط الخطوط 1300 متر) لحساب طول قوس يبلغ نحو 130 كيلو متراً .

بحلول نهاية القرن السادس عشر وأوائل القرن السابع عشر، جرت العديد من القياسات والحسابات المتضاربة فيما يتعلق بشكل الأرض في أوروبا، وقد أثر هذا التضارب بدوره على تقديرات حجم الأرض. بالتزامن مع تأسيس

الجمعيـة الملكيـة في لنـدن والأكاديميـة الملكيـة للعلـوم في باريـس، توجهـت البعثـات الأوروبيـة إلـى الخـارج. كان لهـا اختصاصـات واسـعة، مثـل ملاحظـات اهتـزازات الرّقّـاص (البنـدول) علـى ارتفاعـات مختلفـة وفي خطـوط عـرض مختلفـة، والتغيـر في سـرعة الصـوت وتغيـر الضغـط الجـوي مـع الارتفـاع. اقترحـت هـذه الملاحظـات، جنبـاً إلـى جنـب مـع نظريـات إسـحاق نيوتـن، أن الأرض يجـب أن تكـون مسـطّحة عنـد القطبـين ومنتفخـة عنـد خـط الاسـتواء. بالتـوازي مـع هـذه الأنشـطة تقريبـاً، جـرى قيـاس العديـد مـن الأقـواس الطويلـة في فرنسـا. اقترحـت جميـع قياسـات القـوس الفرنسـي تسـطيحاً اسـتوائياً بـدلاً مـن التسـطيح عنـد القطبـين.

مفهوم شكل الأرض عند العلماء العرب والمسلمون

بخصوص كروية الأرض أو تسطيحها، فإنني لم أتوصل لوثيقة أو نص (شعري أو نثري) يدلّنا على معرفة أو مناقشة العرب قبل الإسلام لهذا الموضوع، ويبدو أنّه لم يكن هذا الأمر يعنيهم كثيراً، وإنما كان يهمهم البحث عن أماكن يتوفر المطر فيها ومياه الشرب والمرعى الذي يؤمن لهم سبل الحياة بأبسط أشكالها، في حين أننا سنجد أن الحال قد تغيّر بعد الإسلام مع المسلمين الأوائل الذين أدركوا أهمية شكل الأرض بالنسبة لهم كونه يؤثر في إقامة شعائر الإسلام من صلاة وحج وصيام. لذلك ومنذ السنوات الأولى لنزول القرآن الكريم فهم المسلمون من قوله تعالى ﴿يُكَوِّرُ ٱلَّيۡلَ عَلَى ٱلنَّهَارِ وَيُكَوِّرُ ٱلنَّهَارَ عَلَى ٱلَّيۡلِ﴾ [سورة الزمر، الآية 5]، أنّ اتخاذ الليل أو النهار شكلهما الكروي دلالةً على أنهما يسقطان على سطح كروي وليس على أي مجسم فراغي آخر، وقد جاء في (المنتخب من التفسير) الذي أصدره المجلس الأعلى للشؤون الإسلامية بالقاهرة: «تشير هذه الآية الكريمة إلى أن الأرض كروية وتدور حول نفسها، لأن مادة التكوير معناها لفّ الشيء على سبيل التتابع، ولو كانت الأرض غير كروية – مسطّحة مثلاً- لخيّم الليل أو النهار على جميع أجزائها دفعةً واحدةً». وقد كانت العرب تقول «كوَّرَ فلانٌ عمامتهُ على رأسهِ» أي أنّ الرأس شكله كروي، واستمدت العمامة كرويتها من الرأس. فالتَّكوير يعني الاستدارة، ولا معنى لاستدارة الليل والذي هو الظّلمة لولا كرويّة الأرض حيث تستدير الظّلمة حول الوجه المستدبر للشّمس، ويستدير الضّوء حول الوجه المستقبل للشّمس، ولأنّ الأرض في حالة دوران حول نفسها اقتضى ذلك أن يتحوّل الضوء من جهة إلى جهة أخرى فيكون في الموقع الذي كانت الظلمة تغشاه، وبذلك يُصبح

الموقـع الـذي كان الضّـوء يغشـاه مظلمًـا، فليـس لموقـع الضّـوء ثبـات كمـا أنّـه ليـس لموقـع الظّلمـة ثبـات، بـل كلٌّ مـن الليـل والنّهـار يتعاقبـان علـى كلٍّ مـن وجهَـي الأرض (العمـري و بصمـه جـي 2021).

صحيـح أن مـدى رؤيـة العـين محـدود جـداً، مقارنـة بسـعة الأرض، أي إن تقـوس الأرض لا يظهـر للرائـي علـى الإطـلاق بالعـين، وذكـر التسـطح لسـهولة تمييـزه، وفي ﴿ وَٱلۡأَرۡضَ مَدَدۡنَٰهَا وَأَلۡقَيۡنَا فِيهَا رَوَٰسِيَ وَأَنۢبَتۡنَا فِيهَا مِن كُلِّ شَيۡءٖ مَّوۡزُونٖ ﴾ [سورة الحجر، الآية 19]، مددناهـا بمعنـى بسـطناها، ونحـن نـرى الأرض مبسـوطة أمامنـا فـلا تناقـض بـين القـرآن الكـريم وبـين الظاهـر الموجـود. فالأرض أمامك مبسـوطة... فهـي مبسـوطة أمـام البشـر جميعـاً في كل موقـع يوجـدون فيـه... وهـذا لا يمكـن أن يحـدث إلا إذا كانـت الأرض كرويـة، فلـو كانـت الأرض مسـطحة أو مربعـة أو مثلثـة في أي شـكل مـن الأشـكال لوصلنـا فيهـا إلـى حافـة، وحيـث إنـه لا يمكـن أن تصـل فيـه إلـى حافـة فالشـكل الوحيـد الـذي تـراه مبسـوطاً أمامـك، ولا يمكـن أن تصـل فيـه إلـى حافـة هـو أن تكـون الأرض كرويـة.

ومـن الإشـارات القرآنيـة الواضحـة علـى كرويـة الأرض إشـارة القـرآن إلـى تعـدد المشـارق والمغـارب في قولـه تعالـى: ﴿بِرَبِّ ٱلۡمَشَٰرِقِ وَٱلۡمَغَٰرِبِ﴾ [سورة المعارج ، الآية 40]، فـلا يحصـل هـذا التعـدد إلا بكرويـة الأرض، إذ تشـرق وتغـرب في كل وقـت علـى أماكـن مختلفـة بصفـة مسـتمرة ومتكـررة.

وكمـا ورد في القـرآن الكـريم أيضـا لفـظُ «دَحَاهَـا» وهـو أبلـغ لفـظ لوصـف حالـة الفلطحـة أو الشـكل الإهليجـي الحقيقـي الـذي هـو عليـه شـكل الأرض، مـع أن قواميـس اللغـة تفسّـر كلمـة «دحاهـا» بمعنيـين الأول: سـطّحها، والثانـي: كورهـا؛ لكـن المعنـى الـذي يعبّـر عـن حقيقتهـا الفعليـة هـو أنهـا كمثريـة الشـكل (علـى شـكل إجاصـة)، أو لهـا شـكل إجاصـة مفلطحـة، وليسـت كرويـة تمامـاً.

فالعرب أدركوا منذ نزول القرآن الكريم عليهم كروية الأرض، أي قبل عصر الترجمة بمائة سنة على الأقل، كما أننا سنجد أنّ بعضهم بقي متمسكاً بفكرة الأرض المسطحة الوافدة من اليونانية ولم يتخلَّ عنها حتى بعد نقل أدلة كروية الأرض عن فيثاغورس وأرسطو وبطليموس وشيوعها.

في الواقع وجدنا أنه ظهر اتجاهان لدى العلماء العرب المسلمين:

الاتجاه الأول: هو قولهم بالأرض المسطحة، وهو ما نجده عند قلّةٍ قليلةٍ من علماء الكلام أمثال أبو علي الجبائي وتلميذه أبو رشيد النيسابوري، وقد لاحظنا أن هذا الاتجاه قد أفل نجمه لأكثر من 700 سنة، ثم عاد للظهور مع نشر كتاب جلال الدين السيوطي (الهيئة السَّنِية في الهيئة السُّنِّية) وشروحات أتباعه عليه، أمثال مرعي بن يوسف الكرمي المقدسي (توفي 1033هـ/ 1623م) في كتابه (بهجة الناظرين وآيات المستدلين)، وإبراهيم القرماني الآمدي (كان حياً عام 1046هـ/ 1654م) في كتابه (علم الهيئة على اعتقاد أهل السنة والجماعة دون الفلاسفة)، إذْ كان حينها الإنتاج العلمي العربي في علم الفلك النظري والرصدي قد تراجع بشكل جاد، ليحلّ البديل النقلي عنه، بحيث يمكن للأجيال الجديدة فهم الكون وأسراره من خلاله.

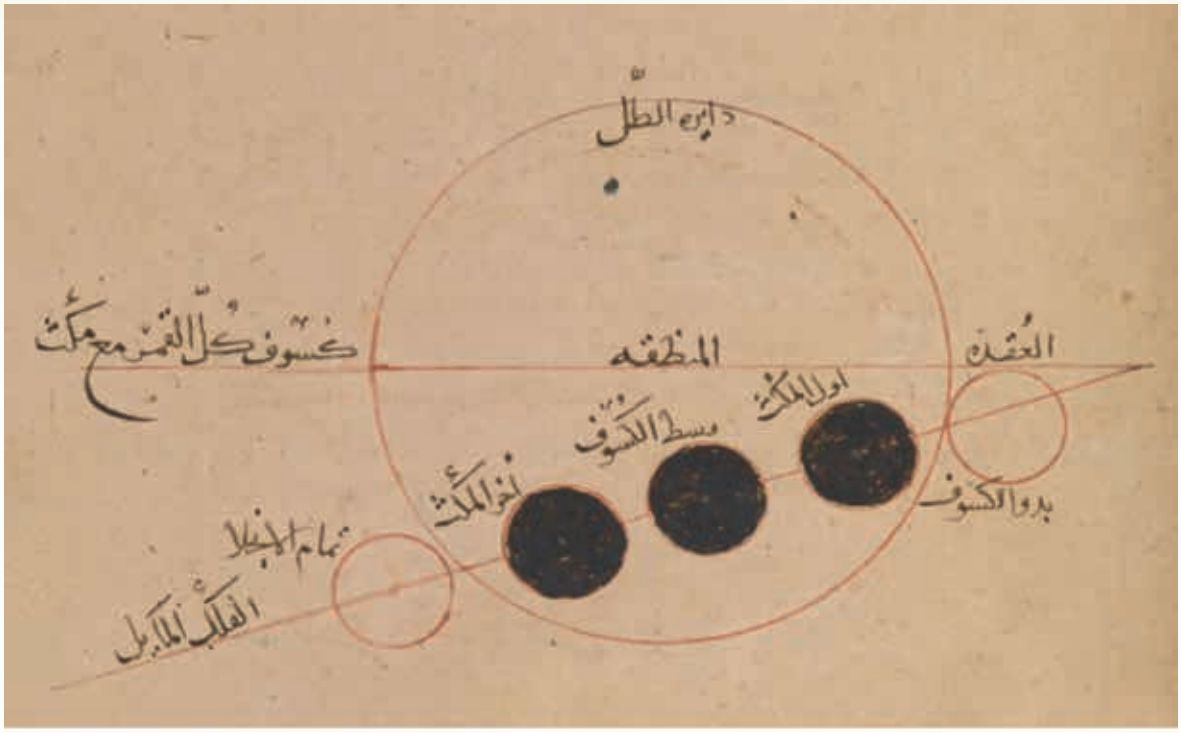
أما الاتجاه الثاني: فهو الذي اعتمد كروية الأرض وساق كل الأدلة العلمية والواقعية الممكنة على حقيقتها، وهو الاتجاه الذي تبناه السواد الأعظم من علماء الفلك والجغرافيا والطبيعة وحتى علماء الدين الذين لم يقتنعوا بتوجهات علماء الكلام أو السيوطي وأتباعه، وذلك بدءاً من القرن 8م وحتى أواخر القرن 19م. وسنقوم باختصار بتقديم كل ما وصلنا من آراء للعلماء العرب والمسلمين مع النصوص التراثية القصيرة حول كروية الأرض.

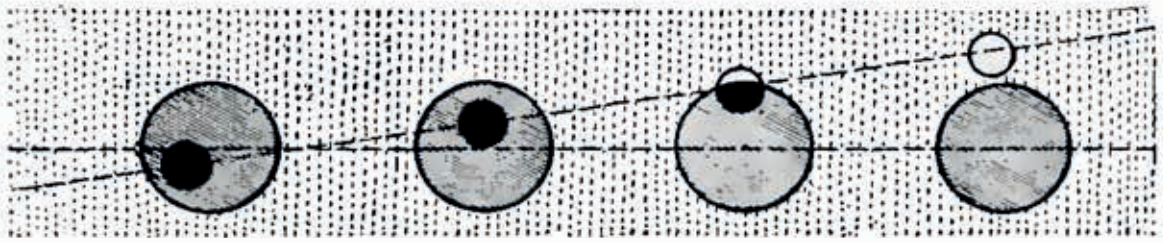
ناقش أبو إسحق الكندي (توفي 252هـ/ 866م) موضوع كروية الأرض في ثلاث رسائل الأولى: (كتاب الكندي في الصناعة العظمى)، والثانية: هي (رسالة الكندي إلى أحمد بن المعتصم في أنّ العناصر والجرم الأقصى كروية الشكل)، والثالثة: هي (رسالة في أن سطح ماء البحر كروي) (ابن النديم، 1997م). بينما تناول أبو بكر الرازي (توفي 311هـ/ 923م) موضوع كروية الأرض في كتابه (هيئة العالم) (ابن أبي أصيبعة، 1965م)، كما توصّل في كتابه (سبب تحرّك الفلك على استدارة) إلى كروية الأرض وأنّ الأرض تفوق بحجمها القمر، في حين أن حجمها يقلّ كثيراً عن حجم الشمس.

قرر أبو القاسم عبيد الله بن أحمد بن خرداذبة (توفي نحو 280 هـ / نحو 893م) أن «صفة الأرض أنها مدوّرة كتدوير الكرة، موضوعة في جوف الفلك كالمحّة في جوف البيضة والنسيم حول الأرض وهو جاذب لها من جميع جوانبها إلى الفلك». لكنه لم يورد في كتابه أي دليل على كروية الأرض.

وثّق لنا الإمام فخر الدين الرازي (توفي 606هـ / 1210م) مناقشة علمية دقيقة منسوبة إلى ثابت بن قرة (توفي 288هـ / 901م) تتعلق بكروية الأرض. إذْ مضى ثابت بشكل أعمق من الآخرين، سواء منهم السابقين أو اللاحقين، حول منشأ كروية الأرض أصلاً، وليس البحث في أدلة كرويتها. وقد توصل بعد تفكير منطقي أن الجاذبية هي المسؤول الأول عن تكوّرها. وهذا تقدم قوي في نظرية كروية الأرض؛ إذْ لم يسبق لأحد أن أشار بشكل مباشر إلى دور قوة الجاذبية في تكوّر الأرض، وهو الدور الذي سيعود له نيوتن لاحقاً ليبرزه مرة أخرى في القرن 18م.

اقتنع **ابن الحائك الهمداني** (توفي 334هـ /945م) بأن الأرض كروية، قال الهمداني: «اعلم أن الأرض ليست بمنسطحة، ولا ببساط مستوي الوسط والأطراف، ولكنها مقببة، وذلك التقبيب لا يبين مع السعة، إنما يبين تقبيبها بقياساتها إلى أجزاء الفلك، فيقطع منها أفق كل قوم على خلاف ما يقطع عليه أفق الآخرين طولاً وعرضاً في جميع العمران، ولذلك يظهر على أهل الجنوب كواكب لا يراها أهل الشمال، ويظهر على أهل الشمال ما لا يراه أهل الجنوب ويكون عند هؤلاء نجوم أبدية الظهور والمسير حول القطب، وهي عند أولئك تظهر وتغيب، وسأضع لك في ذلك مقياساً بيناً للعامة، من ذلك أن ارتفاع سهيل بصنعاء وما سامتها إذا حلق، زيادة على عشرين درجة، وارتفاعه بالحجاز قرب العشر، وهو بالعراق لا يُرى إلا على خط الأفق، ولا يُرى بأرض الشمال، وهناك لا تغيب بنات نعش، وهي تغيب على المواضع التي يُرى فيها **سهيل**، فهذه شهادة العرض. وأما شهادة الطول فتفاوت أوقات بدء الكسوفات ووسطها وانجلائها على خط فيما بين المشرق والمغرب، فمن كان بلده أقرب إلى المشرق كانت ساعات هذه الأوقات من أول الليل والنهار أكثر؛ ومن كان بلده أقرب إلى المغرب كانت ساعات هذه الأوقات من آخر الليل وآخر النهار منكوسا إلى أولهما أكثر، فذلك دليل على تدوير موضع المساكن والأرض، وأن دوائر الأفق متخالفة في جميع بقاع العامر، ولو كان سطح الأرض صفيحة، لكان منظر **سهيل** وبنات نعش واحداً».





استدل الهمداني وغيره من العلماء العرب والمسلمين على كروية الأرض من خلال سقوط ظل القمر عند الخسوف على الأرض (هي حجة سبق وأن طرحها فيثاغورس وأرسطو من قبل)، حيث يبدو الظل قرصاً دائرياً طبعاً يحدث خسوف القمر فقط عند اكتمال القمر، عندما يظهر القمر في مواجهة الشمس في السماء. في حين أن اكتمال القمر هو شرط ضروري لخسوف القمر، إلا أنه ليس شرطًا كافياً، لأن خسوف القمر لا يحدث عند كل اكتمال للقمر. لماذا هذا؟ يميل المستوى المداري للقمر بما يزيد قليلاً على خمس درجات إلى مستوى مدار الأرض حول الشمس (نسمي المستوي المداري للأرض مسار الشمس (The ecliptic) (Faulkner, D.

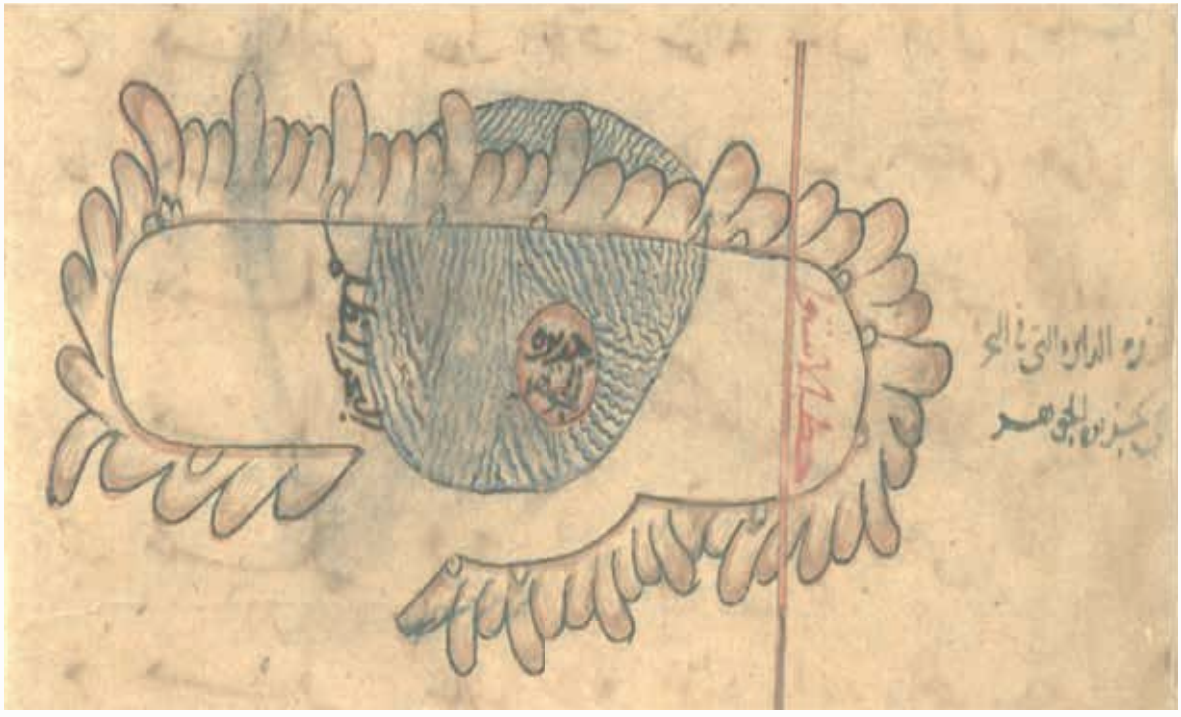
اعتمد أبو نصر محمد الفارابي (توفي عام 339 هـ/950م) في إثباته لكروية الأرض على كروية العناصر الأربعة (التراب، الماء، الهواء، النار) التي تقع بين كرة الأرض وكرة القمر؛ حيث قال: «وشكل كلّ واحدٍ من الأربعة على شكل كرةٍ»، ويتابع:» والعالم يركّب من بسائط صائرة كرة واحدة».

اقتنع ابن الحائك الهمداني (توفي 334هـ /945م) بأنّ الأرض كروية، وقد ساق الأدلة المعروفة في ذلك، لكنه حاول تطبيقها في حالة البلدان العربية بدلاً من إطلاق الأدلة بشكل عام. بينما قال الهمداني: «اعلم أنّ الأرض ليست بمنسطحة، ولا ببساط مستوي الوسط والأطراف، ولكنها مقببة، وذلك التقبيب لا يبين مع السعة، إنما يبين تقبيبها بقياساتها إلى أجزاء الفلك، فيقطع منها أفق كل قوم على خلاف ما يقطع عليه أفق الآخرين طولاً وعرضاً في جميع العمران، ولذلك يظهر على أهل الجنوب كواكب لا يراها أهل الشمال، ويظهر على أهل الشمال ما لا يراه أهل الجنوب ويكون عند هؤلاء نجومٌ أبديةُ الظهور والمسير حول القطب، وهي عند أولئك تظهر وتغيب،

تعرفنا على رأي محمد بن أحمد الخوارزمي (توفي نحو 387هـ/ 997م) عن كروية الأرض من خلال ما كتبه عنه تقي الدين المقريزي (توفي 845هـ/ 1442م) إذْ قال: «وقال محمد بن أحمد الخوارزمي: الأرض في وسط السماء، والوسط هو السفلي بالحقيقة، وهي مدوّرةٌ مضرسةٌ من جهة الجبال البارزة والوهاد الغائرة، وذلك لا يخرجها عن الكريّة إذا اعتبرت جملتها لأن مقادير الجبال وإن شمخت يسيرة بالقياس إلى كرة الأرض، فإن الكرة التي قطرها ذراع، أو ذراعان مثلاً إذا أنتأ منها شيء أو غار فيها لا يخرجها عن الكرية، ولا هذه التضاريس لإحاطة الماء بها من جميع جوانبها وغمرها، بحيث لا يظهر منها شيء» (المقريزي، 1997م).

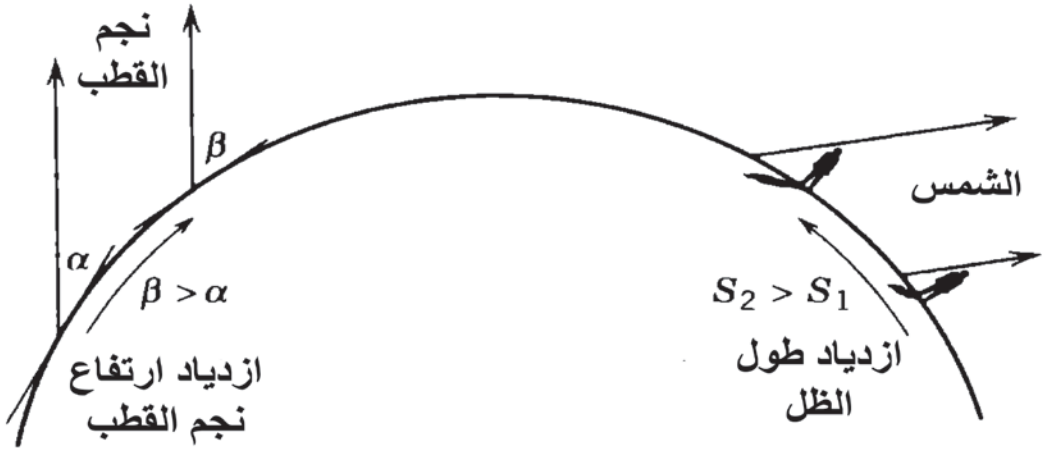
ويشـير هنـا الخوارزمـي إشـارةً مهمـةً وهـي أنّ التضاريـس والمعالـم الطبيعيـة المنتشـرة علـى سـطح الأرض لا تمنـع أنْ تجعـل الأرض كرويّـة الهيئـة، ويسـتعين لتأكيـد هـذه الفكـرة بتشـبيه مبسّـط هـو أنّ الكـرة التـي قطرهـا نحـو 50 سـنتيمتراً لـن تؤثـر النتـوءات التـي تنتشـر علـى سـطحها في كرويتهـا في شـيء.

كان محمـد بـن موسـى الخوارزمـي (تـوفي 232هـ/ 846م) يقـرّ بكرويـة الأرض، وإن لـم أعثـر علـى نـص صريـح لـه بذلـك، لكننـي اسـتنتجته مـن كتابـه (صـورة الأرض) الـذي اعتمـد فيـه علـى جغرافيـة بطليمـوس. إذْ كثيـراً مـا يكـرر عبـارة (كـرة الأرض) في عناويـن الكتـاب.



هيئة الأرض كما رسمها الخوارزمي في كتابه (صورة الأرض). حيث تحيط البحار باليابسة المدوّرة في الوسط

أورد أحمد بن محمد بن كثير الفرغاني (توفي بعد 237هـ / 851م) عدداً من الأدلة التي أثبت فيها كروية الأرض. وهي أدلة ورد بعضها عند فيثاغورس وأرسطو وبطليموس، لكن الدليل الجديد الذي أضافه الفرغاني ذلك المتعلق بالشهب. حيث إنه وجد أن رصده يختلف بين الراصد الذي يكون في المشرق والآخر الذي يكون في المغرب (الفرغاني 1970).



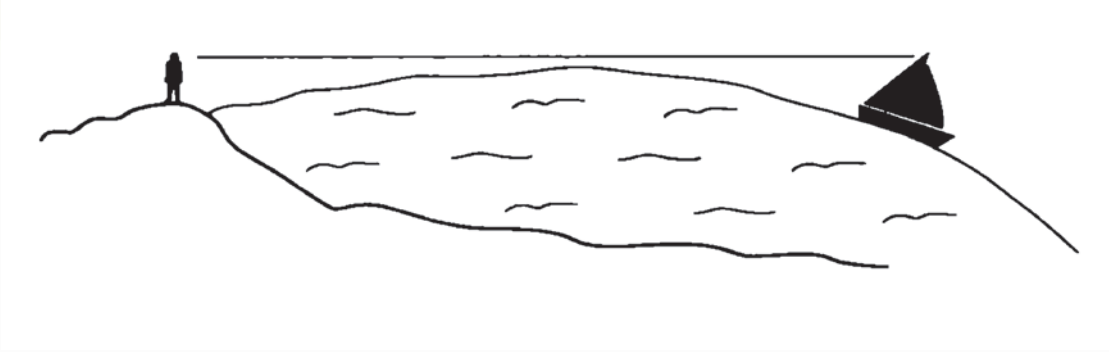
عند السفر نحو الشمال

من الأدلة التي أوردها الفرغاني على كروية الأرض أنه عند السفر نحو الشمال فإن طول ظل الشخص الواقف تحت أشعة الشمس يزداد. ولكن إذا سافر الشخص نحو الشرق أو الغرب فإن نجم القطب سيبقى كما هو على الارتفاع نفسه، لكن لو سافر نحو الشمال فإنه يصبح أكثر أو الجنوب فإنه يصبح أقل (Smith 1997)

استدلّ أبو بكر محمد حسن الكرجي (توفي بعد 406هـ/ 1015م) على كروية الأرض عملياً من خلال البحار، وقد برهن على ذلك منطقياً من خلال موازاة سطح البحر لسطح اليابسة ولم يكن هناك أي جريان أو تدفق للمياه نحو اليابسة. ثم قدم لنا الكرجي رده على أنّ تكوّر الأرض يقتضي حركتها بشكل أبدي، وبالتالي فإن الماء الموزع على سطحها يتحرك أيضاً بشكل أبدي. حيث قال: إن تضرّس سطح الأرض هو السبب في سكونها وعدم حركتها. لكن ووجدنا أن الخوارزمي لم يُعر أية أهمية لمسألة التضاريس وتأثيرها في شكل كروية أو سكونها وحركتها.

قام الحسن بن الهيثم (توفي نحو 430هـ / نحو 1038م) بتكرار الرأي نفسه حول كرويّة الأرض وانتشار التضاريس على سطحها وسكونها في مركز العالم، حيث قال: «وشكل الأرض بكلّيتها وجميع أجزائها شبيه بالكرة، لكن سطحها ليس بصحيح الاستدارة بل فيه تضاريس ليس للذي يعرض فيه من تأثيرات الأجرام السماوية، إلا أنّ ذلك ليس بمبطلٍ لكرويتها ولا يخرجها عن شكلها، بل هي بالإضافة إلى جملتها كالخشونة العارضة في سطح بعض الأكر الصغار؛ فالأرض بجملتها كرةٌ مستديرةٌ مركزها مركز العالم وهي مستقرّة في وسطه، ثابتةٌ فيه غير منتقلةٍ إلى جهةٍ من الجهات، ولا متحركة بضربٍ من ضروب الحركات بل هي دائمة السكون.

قرّر ابن سينا (توفي 428هـ / 1037م) كرويّة الأرض، لأنّ «الأجسام الفلكية تعمّها جميعاً الجسمية والشكل المستدير والحركة على الاستدارة، وإنّ فعالها بالطبيعة لا بالقصد، فإن ما يقع عنها إنّما يقع من طبيعة حركاتها وقواها، إلا أنها عالمة بما يقع من حركاتها وشكلها بأشكالها المختلفة وممازجاتها.



أعاد ابن سينا حجة أرسطو في اختفاء السفينة بعد خط الأفق عندما ينظر إليه مراقب من الشاطئ وهي تبحر مبتعدةً عنه (Smith 1997)

بينما ردّ أبو الريحان البيروني (توفي 440هـ/ 1048م) على من يقول إنّ شكل الأرض أسطوانياً، سواءٌ من الهنود أو اليونانيين، وقال بأنّ هذا غير ممكنٍ، وإلا لبرز الربع الجنوبي المقاطر للربع الشمالي عن الماء (البيروني، تحديد نهايات الأماكن لتصحيح مسافات المساكن، 1962م)، وهو ما لم نشاهده في الواقع، ثم أورد البيروني أدلّة بطليموس في إثبات كروية الأرض، ويبدو أنّه كان مقتنعاً بها نظراً لمنطقها العقلي السليم، فهو لم يقدم أي اعتراض عليها (البيروني، القانون المسعودي، 1954م). كما أننا نلاحظ أنّ البيروني قد تبنى رأي محمد بن أحمد الخوارزمي في شكل الأرض وتوزع المعالم الجغرافية عليها.

أشار البيروني أيضاً إلى حالات التقعُّر والتحدّب والاستقامة التي يُستدلّ من خلالها على كروية الأرض، وقد أثبت أن الامتداد في اتجاهات الشرق والغرب والجنوب والشمال محدّب الشكل وليس مستقيماً ولا مقعّراً. إذْ لو كان الامتداد

مـن الشـرق إلـى الغـرب مستقيماً لشـاهد جميـع سـكان البـلاد القاطنـين في هـذا الاتجـاه شـروق الأجـرام السـماوية في الوقـت نفسـه، ولـو كان الامتـداد مقعـراً، أي منحنيـاً إلـى الداخـل لاختلفـت أوقـات الشـروق بشـكل فعلـي بـين بلـدٍ وآخـر، ولـكان سـكان البـلاد الغربيـة سيشـاهدون شـروقها قبـل البـلاد الشـرقية؛ وفي حـال التحديـب الشـبيه بسـطح كـرة فـإن مـا يحـدث هـو مشـاهدة سـكان البـلاد الشـرقية للأجـرام قبـل الغربيـة (أحمـد، 1960م).

قـدم لنـا محمـد بـن أبـي بكـر الزهـري الغرناطـي (تـوفي بعـد 541هـ/ 1154م) أدلـة كرويـة الأرض، سـواء النقلـي منهـا أو العقلـي. وهـي بمجملهـا تكـرار لمـا سـبق وأن طرحـه العلمـاء السـابقون.

قـال الزهـري الغرناطـي: «لأن الأرض كرويـة، والجغرافية بسـيطة، لكنهم بسـطوا الإسـطرلاب، وكمـا بسـطوا هيئـات الكسـوف في دواوينهـم، ليعلـم الناظـر فيهـا جميـع أجزائهـا وأصقاعهـا وحدودهـا وأقاليمهـا وبحارهـا وأنهارهـا وجبالهـا ومعمورهـا وقفرهـا وحيـث تقـع كل مدينـة مـن مدائنهـا في شـرقها وغربهـا وبنظـر الناظـر مكان أعاجيبهـا ومـا في كل جـزء مـن الأعاجيـب المشـهورة والمبانـي الموصوفـة بالقـدم في أقطارهـا». وقـد «اختلـف النـاس ممـن سـلف وخلـف أن الأرض كرويـة. ومنهـم مـن قـال إنهـا سـطح. فأمـا مـن قـال إنهـا سـطح فـلا يقـوم لـه بُرهـان، غيـر أنـه تعلّـق بقولـه تعالـى: ﴿وَٱلۡأَرۡضَ بَعۡدَ ذَٰلِكَ دَحَىٰهَآ﴾ [سـورة النازعـات، الآيـة 30]، تأويـل هـذه الآيـة لا يفقهـه إلا أهـل العلـم. ولـو أن اللّه تعالـى دحـى الأرض لمـا اسـتقر عليهـا أحـد. وهـو قولـه عـز وجـل: ﴿لِّتَسۡلُكُواْ مِنۡهَا سُبُلٗا فِجَاجٗا﴾ [سـورة نـوح، الآيـة 20]،، وأمـا مـن قـال إنهـا كرويـة فلـه في ذلـك البراهـين الواضحـة والدلائـل البينـة منهـا:

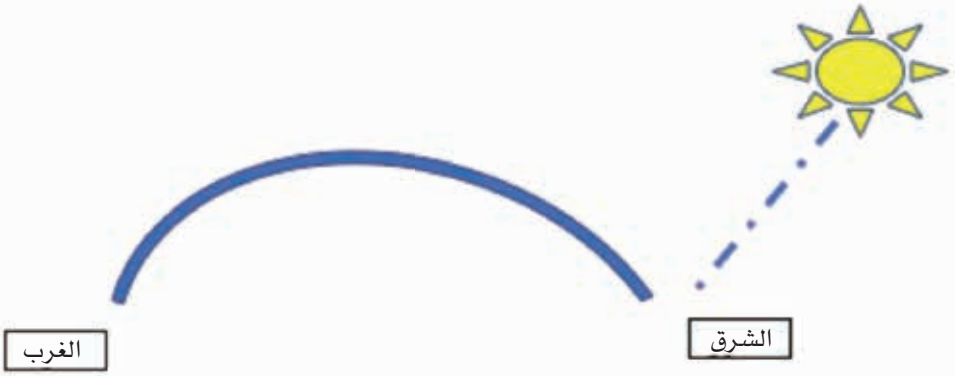
- جري الماء على الأرض،
- واختلاف النظر في الفلك،
- وقِصر الظلّ،
- وقصر الليل وطول النهار وإيلاج بعضها في بعض،
- واختلاف درج المطالع،

ولو كانت الأرض سطحية لم يكن في الفلك من هذا كله شيء ولكان الليل والنهار على حدٍّ واحد طول الدهر. واختصرنا الكلام في هذا إذ هذا موضعه»

لخص الجغرافي البارز محمد بن محمد بن عبد الله بن إدريس الإدريسي (توفي 560هـ / 1165م) أقوال السابقين حول كروية الأرض دون أن يقدم لنا الجديد، وقال: «إنّ الذي تحصّل من كلام الفلاسفة وجلّة العلماء وأهل النظر في علم الهيئة أن الأرض مدوّرة كتدوير الكرة والماءُ لاصقٌ بها وراكد عليها ركوداً طبيعياً لا يفارقها والأرض والماء مستقران في جوف الفلك كالمحة في جوف البيضة ووضعهما وضع متوسطٍ والنسيمُ محيطٌ بهما من جميع جهاتهما وهو لهما جاذب إلى جهة الفلك أو دافع لهما والله أعلم بحقيقة ذلك» (الإدريسي، 1989م).

في حال كانت الأرضُ مسطحةً فإن جميع السكان يشاهدون الشروق في الوقت نفسه

لو كانت الأرضُ مقعرة الشّكل لشاهد سكان البلاد الغربية الشروق قبل سكان البلاد الشرقية



باعتبار أن الأرض محدّبة الشكل فإن سكان الشرق يشاهدون الشروق قبل سكان الغرب

أورد الجغرافي الشهير ياقوت الحموي (توفي 626هـ / 1229م) آراء من سبقه حول شكل الأرض، سواءٌ من اليونانيين أو العلماء العرب والمسلمين وعلى مختلف فرقهم: فلاسفة ومتكلمين؛ لكنه يميل لتبني رأي محمد بن أحمد الخوارزمي فقط، وهو أنّ الأرض كروية تنتشر عليها التضاريس والمعالم الصخرية المختلفة التي تسمح بتوزع الماء بشكلٍ مختلف على سطحها (الحموي، 1995م).

ناقش قطب الدين الشيرازي (توفي 710هـ / 1310م) كروية الأرض وما يحيط بها من الماء بشكل موسّع ومفصّل في كتابه (نهاية الإدراك في دراية الأفلاك). لكنه في البداية انطلق من فرضيات أنها غير مكوّرة، ثمّ نقضها، ثم بين أنها كروية. وقد كان عرضه أفضل من عرض الكثيرين الذين سبقوه؛ لأنه اعتمد البرهان بطريقة نقض الفرض، وهي طريقة منطقية تجعل من الحجة قوية.

كان محمد بن إبراهيم بن يحيى بن علي الأنصاري الكتبي، المعروف بالوطواط (توفي 718هـ / 1318م) مقتنعاً بكروية الأرض والسماء وكل الأجرام السماوية، وقد استقى براهينه من العلماء السابقين. فقد ركّز على مثالي تأخر رؤية الخسوف بين الراصد المشرق والمغربي، واختلاف منظر النجوم المرصودة في المكان نفسه.

أقرّ الشيخ شمس الدين أبو عبد الله محمد بن أبي طالب الأنصاري الدمشقي المعروف بشيخ الربوة (توفي 727هـ/ 1327م) بأن الأرض كروية فهي «كروية الشكل بالكلية، مضرّسة بالجزئية من جهة الجبال البارزة والوهدات الغائرة، ولا يخرجها ذلك من الكروية» (شيخ الربوة 1865). وأثر الخوارزمي واضح في طروحاته. ثم أورد أدلة كرويتها حسب ما وصله ممن سبقه: قالوا

والدليل على أنّ الأرض كروية الشكل مستديرة أن الشمس والقمر وسائر الكواكب لا يوجد طلوعها ولا غروبها على جميع النواحي في وقتٍ واحد، بل يُرى طلوعها في النواحي المشرقية من الأرض قبل طلوعها على النواحي المغربية، وغيبوبتها عن المغربية.

انضم أبو الفداء إسماعيل بن علي أبو الفداء (توفي 732هـ / 1331م) إلى القائلين بكروية الأرض، وقد ثبت له ذلك «بعدّة أدلّة منها: أن تقدّم طلوع الكواكب، وتقدّم غروبها للمشرقيّين على طلوعها وغروبها للمغربيّين يدلّ على استدارتها شرقا وغرباً، وارتفاع القطب والكواكب الشماليّة وانحطاط الجنوبية للواغلين في الشمال، وارتفاع القطب والكواكب الجنوبية وانحطاط الشمالية للواغلين في الجنوب.

أشار الفلكي محمود بن محمد بن عمر الجغميني (توفي 745هـ/ 1345م) إشارة مهمة تتعلق بكروية الأشياء عموماً، وكروية الأرض خصوصاً. وقد استنتج الجغميني أن الأرض كرة كاملة الاستدارة، لكنها مضرّسة بشكل جزئي بسبب الوهاد والجبال، لكن هذا التضريس لا يخرجها من كونها كروية نظراً لصغر الجبال مهما ارتفعت، فهي لن تكون أكثر من حبة شعير على بيضة.

انطلاقاً من ثقة عبد الرحمن بن خلدون (توفي 808هـ / 1406م) بآراء علماء الطبيعة نراه يُقرّ بكروية الأرض، ويحاول أن يصحح فكرة انتشار الماء على سطحها الخارجي تحديداً وليس تحتها. قال ابن خلدون: «اعلم أنّه تبين في كتب الحكماء الناظرين في أحوال العالم أن شكل الأرض كرويّ وأنّها محفوفةٌ بعنصر الماء كأنّها عنّبةٌ طافيةٌ عليه فانحسر الماء عن بعض جوانبها لما أراد

اللّه من تكوين الحيوانات فيها وعمرانها بالنوع البشري الذي له الخلافة على سائرها، وقد يتوهم من ذلك أنّ الماء تحت الأرض وليس بصحيح وإنّما التحت الطبيعي قلبٌ بالأرض ووسط كرتها الذي هو مركزها والكل يطلبه بما فيه من الثقل وما عدا ذلك من جوانبها، وأمّا الماء المحيط بها فهو فوق الأرض وإنْ قيل في شيء منها إنه تحت الأرض فبالإضافة إلى جهة أخرى منه» (ابن خلدون، 2004م).

تأرجح رأي أحمد بن علي بن عبد القادر المقريزي (توفي 845هـ/ 1441م) بين أن تكون الأرض كروية الأرض وقد لا تكون كروية، ولم يستقر على رأي محدد، لكنه يقرّ بأنها واقفة في مركز العالم. قال المقريزي: إن الأرض «جسمٌ مستدير كالكرة، وقيل: ليست بكروية الشكل وهي واقفة في الهواء بجميع جبالها وبحارها وعامرها وغامرها، والهواء محيط بها من جميع جهاتها كالمح في جوف البيضة وبعدها من السماء متساو من جميع الجهات وأسفل الأرض ما تحقيقه هو عمق باطنها مما يلي مركزها من أي جانب كان. ذهب الجمهور إلى أن الأرض كالكرة موضوعة في جوف الفلك كالمح في البيضة، وأنها في الوسط وبعدها في الفلك من جميع الجهات على التساوي» (المقريزي1997).

مفهـــوم شـكل الأرض عنـــد الأوروبيـين

لقـد رسـم كوسـماس إنديكوبليوتـس Cosmas Indicopleustes (تـوفي 550م)، وهـو يونانـي مـن الإسـكندرية، الأرض كمسـتطيل، أي أنّ طولهـا (شـرقاً وغربـاً) ضعف عرضها (شمالاً وجنوباً)، وهـي الفكرة التي نشأ منها مفهوم خط الطول (الطـول) وخـط العـرض (العـرض)؛ ومـن الزوايـا الأربـع لهـذه الأرض المسـتطيلة نشـأت أعمـدة وردية لدعـم قبـة السـماء. ربمـا اسـتوحى ذلـك مـن المعتقـدات المصريـة القديمـة القائمـة علـى الفكـرة نفسـها.

أعلـن بيـدي المكـرّم The Venerable Bede (تـوفي 735م) عـام 700م أنّ الأرض علـى شـكل بيضـة تطفـو في المـاء ومحاطـة بالنـار في كل مـكان. وفي كتابـه (حـول حسـاب الوقـت)، علّـم بيـدي بوضـوح عـن الأرض كرويـة.

اختلـف جوانـز إكسـارخ Joannes Exarch (تـوفي في القـرن 10م) بشـكل جـذري مـع وجهـة النظـر التوراتيـة حـول شـكل الأرض. وقـد قبـل وجهـة نظـر أرسـطو بـأن الأرض كرويـة. عـلاوة علـى ذلـك، جـادل مؤلفـين مثـل كوسـماس إنديكوبليوتـس الـذي كان يؤكـد أن الأرض مسـطحة، كمـا وجدنـا سـابقاً.

كـــان الكـون عند الفلكي البولنـــدي نيكـــولاس كوبرنيكوس N. Copernicus (تـوفي 1543م)، كلـه كـروي وليسـت الأرض فقـط، «لأن كل شـيءٍ يتجـه في العالـم نحـو التقيّـد بهـذا الشـكل، كمـا يتضـح في حالـة قطـرات الميـاه وغيرهـا مـن الأجسـام السـائلة، عندمـا تتحـدد ذاتيـاً».

لقـد بـات النقـاش مركّـزاً، منـذ منتصـف القـرن السـادس عشـر، علـى المواضـع والحـركات المفترضـة للكـرة الأرضيـة. كان محـور هـذا التطور هو عمـل كوبرنيكوس،

الـذي نشـر كتابـاً (حـول دوران الأجـرام السـماوية Revolution Bus) عـام 1543م. وبشـكل مثيـر للصدمـة، تحـدى الكتـاب الرؤيـة البطلميـة الأرسـطية لكـون (مركـزه الأرض)، وهـي الفكـرة التـي سـيطرت علـى علـم الفلـك حوالـي 1500 سـنة. وكبديـل لذلـك، افتـرض كوبرنيكـوس وجـود نظـام (مركـزه الشـمس)، حيـث أصبحـت الأرض مجـرد كوكـب آخـر في مـدار حـول الشـمس، بـدلاً مـن أن تكـون المركـز الثابـت للكـون كموضـوع لخلـق اللّه الخـاص.

في عام 1616م، وإدراكاً منها للتأثير المحتمل في تفسير الكتاب المقدس، حظرت الكنيسـة الكاثوليكيـة الكتـب التـي جادلـت لصالـح حركـة الأرض. ومـع ذلـك، جـرى استكشـاف أطروحـة كوبرنيكـوس وتوسـيعها مـن قبـل عالـم الرياضيـات الألمانـي يوهانـس كيبلـر J. Kepler (تـوفي 1630م)، الـذي اكتشـف أن الكواكـب لا تتبـع مسـاراً دائريـاً حـول الشـمس، كمـا كان يعتقـد كوبرنيكـوس، ولكنهـا تتحـرك علـى مسـار قطـع ناقـص. في هـذه الأثنـاء، في إيطاليـا، كان غاليليـو غاليليـه يسـتخدم التلسـكوب لإجـراء عـدد مـن الاكتشـافات التـي تتناقـض مـع النظـام الأرسـطي ومـع الدليـل التجريبـي علـى أنّ كـون كوبرنيكـوس شمسـي المركـز.

بعدهـا أشـار مارتـن لوثـر M. Luther (تـوفي 1546م) في تعليقـه علـى سـفر التكويـن، مؤكـداً أن الأرض كرويـة. كمـا أنـه كثيـراً مـا أشـار إلـى أرسـطو في تعليقـه. حيـث أكّـد أرسـطو بوضـوح أن الأرض كرويـة،

يخلـط أصحـاب الأرض المسـطحة باسـتمرار بـين مركزيـة الشـمس وكرويـة الأرض، ويدمجونهـا مـع الأسـاطير التـي نسـجت حـول كولومبـوس مـع قضيـة غاليليـو غاليليـه بعـد أكثـر مـن قـرن بقليـل. ففـي عـام 1543م، بعـد نصـف قـرن مـن رحلـة كولومبـوس، نشـر نيكـولاس كوبرنيكـوس كتابـه (حـول دوران الأجـرام السـماوية)،

الـذي روج فيـه لنظريـة مركزيـة الشـمس. وعلـى عكس الاعتقـاد الخاطـئ الشـائع، لـم يُحظـر علـى الفـور مـن قبـل الكنيسـة الكاثوليكيـة الرومانيـة. وإنمـا قُـرِأَ عمـل كوبرنيكوس علـى نطـاق واسـع وأثـار الكثيـر مـن النقـاش. كان غاليليـو غاليليـه أحـد الذيـن تحولـوا إلـى نظريـة مركزيـة الشـمس. في عـام 1610م، نشـر غاليليـو كتابـه (الرسـول النجمـي The Starry Messenger)، حيـث شـارك بأرصـاده التلسـكوبية عـن أطـوار كوكـب الزهـرة والأقمـار الأربعـة التـي تـدور حـول كوكـب المشـتري، التـي دعمـت نمـوذج مركزيـة الشـمس ودحضـت النمـوذج البطلمـي المتمركـز حـول الأرض، جنبـاً إلـى جنـب مـع الجوانـب ذات الصلـة بالفيزيـاء الأرسـطية المهيمنـة. أثـار هـذا الكتـاب، مـع تعليـم غاليليـو المسـتمر لنظريـة مركزيـة الشـمس، بعـض المعارضـة، ولكـن ليـس مـن قبـل اللاهوتيـين، كمـا يعتقـد معظـم النـاس. وإنمـا كان مـن قبـل العلمـاء الآخريـن المعارضـين لغاليليـو، لأنـه إذا كان نمـوذج مركزيـة الشـمس صحيحـاً، فإنـه سـيقلب النمـوذج البطلمـي، وهـو علـم الكونيـات السـائد لمـدة 15 قرنـاً.

نشـر غاليليـو كتابـه (حـوار حـول نظامـين) روج هـذا الكتـاب مـرة أخـرى لمركزيـة الشـمس، وهـذه المـرة علـى شـكل نقـاش بـين ثلاثـة أشـخاص، اثنـان مـن دعـاة النمـوذج الكوبرنيكـي، وواحـد مدافـع عـن النمـوذج البطلمـي. حصـل غاليليـو علـى إذن مـن المسـؤولين الكاثوليك الرومان لنشـر الكتاب. باللغة الإيطالية للوصول إلى جمهور أكبر. وعلـى الفـور، لقـي الكتـاب رواجـاً كبيـراً، لكنـه اسـتجلب معارضـة سـريعة جـداً مـن قـادة الكنيسـة. أُديـن غاليليـو بتهمـة تعليـم عقيـدة هرطقيّـة، وحُكـم عليـه بالإقامـة الجبريـة لبقيـة حياتـه. كمـا أُجبـر علـى التراجـع ومُنـع مـرة أخـرى مـن تدريـس مركزيـة الشـمس.

بعـد أن وضـع إسـحاق نيوتـن I. Newton (تـوفي 1727م) قانـون الجاذبيـة العـام، شـرع في تتبـع بعـض نتائجـه علـى أرض الواقـع. فقـد رأى أن شـكل الأرض يعتمـد

جزئياً على الجاذبية المتبادلة بين أجزائها، وجزئياً على ميل الطرد المركزي بسبب دوران الأرض، ومن شأن هذه الأفعال أن تتسبب في تسطيح القطبين. وقد دفعه ذلك لاختراع طريقة رياضياتية استخدمها لحساب نسبة القطر القطبي إلى القطر الاستوائي. ولاحظ أن ما يترتب على ذلك من انتفاخ للمادة عند خط الاستواء سوف يجذبها القمر بشكل غير متساوٍ، فالأجزاء الأقرب أكثر انجذاباً؛ وبذلك يعمل القمر على إمالة الأرض عندما يكون في بعض أجزاء مداره؛ وتفعل الشمس ذلك أيضاً بدرجة أقل بسبب بعدها الكبير عن الأرض. ثم أثبت أن التأثير يجب أن يكون دوراناً لمحور الأرض على سطح مخروطي في الفضاء، تماماً كما يرسم محور القمة مخروطاً. وقد حسب المقدار بالفعل؛ وبذلك تمكن من تفسير سبب بداية الاعتدال الذي اكتشفه هيبارخوس حوالي عام 150 قبل الميلاد (Forbes, 1909).

كما وجد نيوتن أن دوران الأرض يولد قوة طرد مركزية تتسبب في انتفاخ خط الاستواء قليلاً، بحيث بلغ قطر الأرض حوالي (6374.4 كيلو متراً) عند خط الاستواء، وفقط (6345.6 كيلو متراً) عبر القطبين؛ بعبارة أخرى، فقد حدثت تسوية عند القطبين بمقدار (230/1). قوة الطرد المركزي هذه، التي تعمل عكس جاذبية الأرض، ستؤدي أيضاً إلى أن تكون الجاذبية الفعالة أصغر بشكل يمكن قياسه عند خط الاستواء، كما أوضح ريتشر. وقد استقبل زملاء نيوتن في الجمعية الملكية على الفور الفلسفة المبنية على الرياضيات المتأصلة في العمل، مع أنهم كانوا غالباً محبطين في فهم الصيغ. لكن اعتنق العلماء البريطانيون بشكل خاص مفهوم الجذب كدليل للدراسة العامة للمادة. ومن خلال العمل بإصرار على تعقيدات الرياضيات الكثيفة لنيوتن، سعوا لإيجاد تطبيقات عملية لقوانين الجاذبية. وعلى النقيض من ذلك، كان الكثير من

المجتمع العلمي في القارة الأوروبية متشككاً جداً في ادعاءات نيوتن، لا سيما في فرنسا. فقد جد العلماء هناك هذا المفهوم الجديد للجاذبية، والنتيجة الطبيعية للأرض المسطحة ذات الجاذبية المتغيرة، والتي تتعارض تماماً مع نموذج المنطق الذي تبناه قبل نصف قرن تقريباً مواطنهم رينيه ديكارت René Des-cartes (توفي 1650م). إذْ وفقاً لعمل ديكارت الضخم (مبادئ الفلسفة Princip-ia Philosophiae، 1644)، فإن الأرض والقمر والكواكب والنجوم مغمورة في سائل هائل غير مرئي سماه «الأثير»، والذي وضعه الله – كما يدعي- بحركة دائرية عند الخليقة ودواماته العظيمة تستمر في الدوران.

لكن نيوتن هو من حظي بالثناء على نطاق واسع في الخيال الشعبي اللاحق، حيث دعمت أعماله الكلاسيكية، مثل كتاب (المبادئ Principia 1687) و (البصريات Opticks 1709)، الجمع بين الرياضيات وعلم الفلك. وقد أكدت البعثات الفرنسية خلال القرن الثامن عشر النتيجة التي توصل إليها (في الكتاب الثالث من كتاب المبادئ) بأن الأرض ليست كروية مثالية وإنما كروية مفلطحة تنتفخ عند خط الاستواء بسبب دورانها.

كان الفلاسفة الفرنسيون مثل فولتير مستحوذين على الاحتمالات التي تَعِدُ بها. حيث ظهرت الطبيعة وكأنه يمكن استيعابها بالعقل، وأنها تعمل بالقوانين التي كانت تنتظر أن يكتشفها الراصد العقلاني. وبذلك فقد افترض المفكرون أن الإنسان، كجزء من الطبيعة، يجب أن يكون نتاج مبادئ مماثلة. افترض بعض الفلاسفة أن تداعيات ذلك كانت مذهلة؛ لأنه إذا كان من الممكن اكتشاف قوانين شاملة في العالم الخارجي من حولنا، فلماذا لا يحدث ذلك في البشر والمجتمع ككل؟ وبدافع من تفسيرهم لعمل نيوتن، ترجمت محاولتهم لإيجاد قوانين أساسية

من الرياضيات وعلم الفلك إلى الفضائل والأخلاق، بينما كان يُعتقد أن الطريق إلى هذا الاكتشاف هو العقل.

هذه العقلانية الأوربية المتأخرة للطبيعة كان جابر بن حيان قد سبقهم إليها منذ القرن التاسع الميلادي. فقد وجد من خلال تأسيسه (علم الميزان) أن يمكننا «تخليق أو تصنيع المواد» وليس انتظار الطبيعة حتى تصنعها، ثم عمم هذه الفكرة بجرأة أكبر ليشمل كل الكائنات الحية. فلو كانت الظروف والإمكانيات البحثية في عصره متاحة لوجدناه يصنّع مختلف المواد الكيميائية التي نصنعها اليوم، ولا أستبعد أبداً من إمكانية وصوله لعمليات الاستنساخ والهندسة الوراثية (العمري وبصمه جي 2021).

وإذا نظرنا إلى الوراء، يمكننا أن نرى في عمل نيوتن عن شكل الأرض بدايات نظرية مرضية. ومع ذلك، كان من الصعب متابعة تفسيراته، التي اعتمدت على العديد من الافتراضات التي لم تذكر بوضوح ولم تكن واضحة على الإطلاق. نعم لقد كانت نظرية نيوتن عن شكل الأرض - بالنسبة لمعظم قراء كتاب (المبادئ) - غير مفهومة إلى حد كبير (Linton, 2007).

للأسف بعد قرونٍ من الجهود العلمية والتقنية الكبيرة التي بُذلت لإثبات كروية الأرض، نجد حدوث انتكاسة في هذا القرن مع عودة ظهور التيار الداعم لنظرية الأرض المسطحة.

درس الفلكيون القدامى حركة القمر والكواكب لكن هذه الحركة لم تفسر بشكل صحيح إلا في أواخر القرن السابع عشر عندما أوضح العالم الإنجليزي أسحاق نيوتن (1642 - 1727م) أن هناك ارتباطاً بين القوى الجاذبة للأجسام نحو الأرض وأسلوب حركة الكواكب. بنى نيوتن دراسته على الدراسة الدقيقة

لحركة الكواكب والتي قام بها اثنان من الفلكيين في أواخر القرن السادس عشر الميلادي وهما تيخو براهي الدنماركي ويوهان كيبلر الألماني. ومن القوانين الثلاثة التي اكتشفها كيبلر أوضح نيوتن كيف أن قوة الجذب للشمس لابد أن تقل بزيادة المسافة، وافترض أن جذب الأرض لابد أن تسلك ذات السلوك فتمكن من حساب القوة التي تجذب القمر إلى الأرض عند سطحها. أما عالم الطبيعة الإيطالي غاليليو غاليلي (1564- 1642م) فقد قدم مساهمات جيدة في مراقبة الأجسام الساقطة تجاه الأرض، واستنتج أن معدل السرعة المتزايد (عجلة الجاذبية الأرضية) ثابتة بالنسبة لكل الأجسام، وأن سرعة الجسم الساقط تساوي في الثانية الأولى نصف قيمة عجلة الجاذبية في مكان سقوطه إلى سطح الأرض.

الفصل التاســع

باطــن الأرض

موسوعة العمري في الأرض والفضاء
Alamri's Encyclopedia of Earth and Space

مُقَدِّمَة

كوكب الأرض هو ثالث أقرب كوكب من الشمس، ويعد خامس أكبر كوكب في المجموعة الشمسية، وهو الكوكب الوحيد حالياً المعروف بأنه يحتوي على الحياة، ويتكون كوكب الأرض من حوالي 71 % من المياه التي تتمثل في المحيطات والبحار والأنهار، ومن حوالي 29 % من اليابسة التي تتكون من القارات الكبيرة والجرز والجبال، كما يغطي الجليد والثلج الكثير من المناطق القطبية للأرض، وبسبب كمية المياه الكبيرة على سطح الأرض، يبدو الكوكب من بعيد باللون الأزرق، ولذلك سُمي بـ (الكوكب الأزرق)، ويحتوي هذا الكوكب على غلاف جوي ساعد على تكوين الحياة على سطحه، حيث يتكون الغلاف الجوي للأرض في الغالب من النيتروجين والأكسجين.

حتى الآن لم يجد العلماء طريقة لتحديد العمر الدقيق للأرض مباشرة من صخور الأرض، لأن أقدم صخور الأرض قد أعيد تدويرها وتدميرها من خلال عملية الصفائح التكتونية. إذا كان هناك أي من صخور الأرض البدائية بقيت في حالتها الأصلية، فلم يتم العثور عليها بعد. ومع ذلك، فقد تمكن العلماء من تحديد العمر المحتمل للنظام الشمسي وحساب عمر الأرض بافتراض أن الأرض وبقية الأجسام الصلبة في النظام الشمسي تشكلت في الوقت نفسه، وبالتالي فهي من نفس العمر.

تشـكلت الأرض منـذ مـا بـين 4.5 و 4.6 مليـار سـنة، في الوقـت نفسـه الـذي كانـت فيـه الكواكـب الأخـرى في النظـام الشمسـي تتشـكل. كيـف لنـا أن نعـرف هـذا؟ مـن خـلال قيـاس عمـر أقـدم الصخـور والمعـادن علـى الأرض، والأرض ككل، والنظـام الشمسـي ككل، والقمـر. تتقـارب كل هـذه الأعمـار في عمـر الأرض، والنظـام الشمسـي، بـين 4.5 و 4.6 مليـار سـنة. تم قيـاس كل هـذه الأعمـار مـن خـلال تحليـل النظائـر الإشـعاعية مثـل U-Pb و Sm-Nd في عينـات مـن الصخـور والمعـادن – باسـتثناء عمـر الشـمس، الـذي يعتمـد علـى نمـاذج نظريـة لكيفيـة تشـكل النجـوم وتطورهـا والمسـتمدة مـن قوانـين الفيزيـاء.

سـنأخذك عزيـزي القـارئ في هـذا العمـل برحلةٍ يبلـغ طولهـا 6400 كـم، وعبـر زمـانٍ يمتـد لأكثـر مـن 4.5 بليـون سـنة، تغـوص فيهـا إلـى مركـز الأرض، لكنـك بالتأكيـد لـن تشـاهد هنـاك أيّ نـوعٍ مـن الحيـاة علـى غِـرار قصـة جـول فيـرن الخياليـة العلميـة (رحلـة إلـى مركـز الأرضً)، وإنمـا سـترى أعمـاق الأرض علـى حقيقتهـا بصخورهـا ومصهورهـا.

سنسـاعدك في عمليـة الغـوص الخياليـة هـذه باسـتخدام آلـة الزمـن ومصعـد ينتقـل بـك مـن طبقـةٍ إلـى أخـرى، سـنمضي برحلتنـا حتـى تصـل إلـى مكانٍ تبلـغ فيـه درجـة الحـرارة أكثـر مـن 6000 درجـة مئويـة.

عُمـــــر الأرض

كما ذكرنا في الفصل السابع يميز علماء الجيولوجيا اليوم نوعين من عمر الأرض:

العمرُ المطلقُ: وهو الزمن الذي مضى منذ نشوء كوكب الأرض حتى اليوم، ويحدده العلماء باستخدام الطرائق الإشعاعية. يتم قياس أعمار صخور الأرض والقمر والنيازك من خلال اضمحلال النظائر المشعة طويلة العمر للعناصر التي تحدث بشكل طبيعي في الصخور والمعادن والتي تتحلل بنصف عمر يتراوح بين 700 مليون إلى أكثر من 100 مليار سنة إلى نظائر مستقرة أخرى.

العمرُ النسبيُ: وهو مجموع الأحقاب الجيولوجية التي مرت على الكرة الأرضية أو ما يسمى بـ (التاريخ الجيولوجي للأرض) والتي أدت إلى تكون القشرة الأرضية بالشكل الذي يُرى اليوم بعد تكون كوكب الأرض، ويحدد باستخدام الطرائق التي تعتمد على التغيرات المتتالية في ظروف التعرية والترسيب التي مرت بها الأرض في تاريخها الجيولوجي، مثل: الطريقة المغناطيسية القديمة والطريقة الجيولوجية الحيوية والطريقة الجيولوجية الترسيبية. وقد أفرد العلماء اليوم لهذا الموضوع علماً خاصاً أطلق عليه علم دراسة عمر الأرض Geochronology.

في ستينيات القرن السادس عشر، صاغ نيكولاس ستينو N. Steno (توفي 1686م) مفاهيمنا الحديثة لترسب الطبقات الأفقية، لقد استنتج أنه عندما لا تكون الطبقات أفقية، يجب أن تكون مائلةً منذ ترسبها ولاحظ أن الطبقات المختلفة تحوي على أنواع مختلفة من الأحافير. اقترح روبرت هوك R. Hooke (توفي 1703م)، بعد فترة ليست بالطويلة، بأنّ سجل الحفريات سيشكل أساساً

لتسلسل زمني من شأنه أن «يعود إلى ما قبل .. حتى الأهرامات ذاتها» (Braterman, 2013).

وبحسب الباحث الفرنسي هوبير كريفين H. Krivine فقد اقترح 17 عمر للأرض بين سنتي 1860م و1909م، التي تتراوح قيمها بين 3526 سنة و1526 ملايين من السنين. ناهيك عن الأعمار التي جرى اقتراحها منذ القرن 17م. والتي قد تبدأ من الفلكي يوهانس كيبلر J. Kepler (توفي 1630م) الذي قدّر عمر الأرض بـ (3993 سنة قبل الميلاد)، ثم لدينا تقدير رئيس أساقفة الأنكليكان في أيرلندا جيمس أوشر J. Ussher (توفي 1656م) وهو مُوَقّت الكتاب المقدس الذي يُستشهد به كثيراً، وقد اقترح عام 1654م أنّ عمر الأرض يجب أن يكون 4004 سنة قبل الميلاد، معتمداً في ذلك على أعمار البطاركة والشخصيات التوراتية (رونن، 1990م)، ابتداءً من المسيح عودة إلى آدام، وقد حدد أن لحظة الخلق حدثت الساعة 9 صباحاً بتوقيت ما بين النهرين يوم 26 أكتوبر، عام 4004 ق.م، حسب التقويم اليولياني، وهو كما نلاحظ مبني على الخيال أكثر منه على قاعدة علمية سواء في الحساب أو الرصد والمشاهدة (جريبين، 2008م). وقد نُشر هذا الرقم في نسخ الكتاب المقدس الإنجليزية التي سُمح بقراءتها حتى بداية القرن العشرين الميلادي.

لقد طرح الفرنسي جورج لكليرك، أو الكونت دي بوفون Comte de Buffon (توفي 1788م) فقد فكرةً شاملةً تربط بين عمر الأرض والنماذج الكونية التي قدمها كلٌ من إيمانويل كانط I. Kant (توفي 1804م) وبيير سيمون لابلاس P. S. Laplace (توفي 1827م) حول تشكل الأرض والشمس وغيرهما من أجرام المجموعة الشمسية، وقد كان بوفون مقتنعاً أنّ الأرض كانت عبارةً عن

كتلةٍ منصهرةٍ وحارةٍ بشكلٍ كبيرٍ، ثم أخذت بالتبريد بشكلٍ تدريجي سمح بظهور التضاريس الأرضية، وهنا حاول بوفون أن يضع مقياساً زمنياً لهذه المراحل، فقد اعتقد أنّ التبريد الأولي امتد لفترة زمنية مقدارها 3000 سنة، أما فترة تكون الفجوات والمنخفضات فقد استغرقت عشرة أضعاف هذا الوقت، بعد ذلك استغرق تبريد المحيط الأولي وتكوين الرواسب الطينية وظهور الحياة البدائية في البحر نحو 25000 سنة. يضاف إلى ذلك فترة 10000 سنة فترة تصريف جزءٍ من ماء المحيط وظهور النباتات، وفترة انفصال القارات الذي استغرق 5000 سنة، وظهور الإنسان 5000 سنة، فيصبح المجموع 78 ألف سنة (رونن، 1990م).

بتأثّر من كتاب الفيزيائي البريطاني إسحق نيوتن I. Newton (توفي 1727م) (المبادئ) الذي أشار إلى أن كرة حديدٍ بحجم كوكب الأرض قد تستغرق 50 ألف سنة حتى تبرد، قام بوفون بإجراء تجارب على كُرات من الحديد ومواد أخرى بأحجامٍ مختلفة، ورُصد الزمن الذي تستغرقه كل منها حتى تبرد من درجة التوهّجٍ. وهذا ما جعله يقترح أن عمر الأرض 78 ألف سنة. ويبدو أن هذه القيمة لم تعجب الفيزيائي الفرنسي جان فورييه J. Fourier (توفي 1830م) الذي انتقل إلى مستوى آخر في حساب قيمة عمر الأرض، فقد حاول فوررييه تطوير المعادلات الرياضياتية والقوانين المتعلقة بتوصيف معدّل تشرّب الحرارة من جسم ما، واستخدم هذه المعادلات لحساب الزمن الذي يمكن أن تكون فيه الأرض قدً استغرقته حتى تبرد. وفي عام 1820م كتب فوررييه معادلة عمر الأرض تعتمد على هذه الفكرة، وقد استنتج أن عمر الأرض 100 مليون سنة (جريبين، 2008م).

بحلول الوقت الذي نُشر فيه كتاب (المبادئ) الذي حظي بترحيب كبير وشعبية لتشارلز لايل Ch. Lyell (توفي 1875م) في ثلاثينيات القرن التاسع عشر، اختفت إلى حد كبير النظرية النبتونية Neptunism [النظرية الخاطئة التي تقول إنّ الصخور مثل الغرانيت تشكلت عن طريق التبلور من مياه المحيط البدائي، وقد كان المدافع الرئيس عن هذه النظرية هو أبراهام جوتلوب ويرنر A. G. Werner (توفي 1817م)] بصفتها نظرية جيولوجية قابلة للتطبيق. ومع ذلك، بعد ذلك بوقت قصير، نشأ جدل جديد قوي بين الفيزيائي الشهير وعالم الرياضيات اللورد كلفن (وليام طومسون) وأتباع لايل، بمن فيهم تشارلز داروين.

اعتقد هؤلاء الجيولوجيون وعلماء الأحياء البارزون، كما فعل جيمس هوتون، أن العمليات الجارية اليوم يمكن أن تفسر تطور الأرض دون التسبب في أحداث أكثر كثافة أو كارثية – طالما كان هناك وقت كافٍ. وقد اتهم العديد من أتباع هوتون بالاعتراف بوقت غير محدود جزئياً بناءً على الجملة الأخيرة من ورقته البحثية عام 1788م حيث قال: «لا توجد بقايا بداية ولا أمل في النهاية».

أما في مقالته (حول التبريد العالمي للأرض) عام 1864م، استخدم كلفن قوانين الفرنسي جوزيف فورييه J. Fourier (توفي 1830م) للتوصيل الحراري لحساب أن عمر الأرض يتراوح بين 20 مليون و 400 مليون سنة؛ كان النطاق العمري الكبير بسبب نقص المعلومات حول الخصائص الحرارية للصخور في أعماق الأرض في ذلك الوقت. كان كلفن قد قام في وقت سابق بحساب عمر الشمس، بافتراض (غير صحيح) أن طاقتها جاءت من تراكم الجاذبية، ووصلت إلى عمر نحو 20 مليون سنة. في حين أن طاقة الشمس تأتي من الاندماج النووي، ولكن لم يتعرّف على ذلك حتى ثلاثينيات القرن العشرين.

كان الاتفاق بين عمر كلفن للشمس والأرض (بالنسبة للفئة العمرية الأدنى) محض صدفة، لكنه أنتج أحد أكثر الخلافات العلمية سخونة في القرن التاسع عشر. استند تقدير كلفن لعمر الأرض (والشمس معها) إلى رياضيات أنيقة وقدمها أكثر علماء الفيزياء موثوقية في عصره، وكان له تأثير عميق على الجيولوجيا. عندها كان لدى الجيولوجيين مشكلتان كبيرتان، عدم وجود وقت كافٍ لحساب السجل الرسوبي، وأن عقيدة لايل في الوتيرة الواحدة Uniformitarian تناقض القانون الثاني للديناميكا الحرارية (O'Hara, 2018).

كان خلاف كلفن مع مدرسة لايل عن الوتيرة الواحدة في النصف الأخير من القرن التاسع عشر حول كيفية تعارض القانون الثاني للديناميكا الحرارية مع الوتيرة الواحدة للعمليات الجيولوجية كما كان حول عمر الأرض.

يشير الجزء الأول من ورقة كلفن لعام 1864م إلى أن حلول فوريه «الجميلة» لقوانين تدفق الحرارة أظهرت أن الحرارة تتبدد وتصبح درجات الحرارة موحدة مع مرور الوقت. من بين بيانات القانون الثاني للديناميكا الحرارية، وفقاً للعالم الفرنسي رودولف كلوسيوس R. Clausius (توفي 1888م)، أن الحرارة تتدفق من الأجسام الساخنة إلى الباردة.

بناءً على هذا البيان، يجب أن تفقد الأرض الحرارة؛ لأن درجة الحرارة في الأرض تزداد مع العمق؛ وبالتالي، يجب أن يكون تدفق الحرارة إلى الخارج في الفضاء، بافتراض عدم وجود مصدر حرارة داخلي كيميائي، وهو ما اعتقد كلفن أنه غير محتمل؛ لذلك يجب أن يكون النشاط الجوفي والبركاني في الماضي أكثر نشاطًا بدلاً من أن يكون موحدًا طوال الوقت. في ورقة عام 1864م، أخذ كلفن تشارلز لايل مهمة لشرح الحرارة الجوفية والعمل الجوفي بواسطة فرضية

كيميائية: «عندما تتحد المواد معاً، يمكن فصلها كهربائيا مرة أخرى بواسطة التيارات الحرارية الكيميائية بسبب الحرارة الناتجة عن توليفها، وبالتالي يستمر العمل الكيميائي وحرارتها في دورة لا نهاية لها، ينتهك مبادئ الفلسفة الطبيعية».

بعد ثلاثة وثلاثين عاماً، كرر كلفن هذا النقد نفسه حرفياً في ورقته الثانية عام 1897م عن عمر الأرض، مشيراً إلى أنه، في رأيه، لم يتغير الكثير بين الجيولوجيين. صاغ كلفن بيانه الخاص بالقانون الثاني للديناميكا الحرارية (يعادل ذلك الذي وضعه كلوسيوس)، أي: لا يمكن امتصاص الحرارة من الخزان الساخن وتحويله بالكامل إلى العمل دون فقدان بعض الحرارة إلى خزان أكثر برودة (البيئة على سبيل المثال).

يوضح بيان القانون هذا أن آلات الحركة الدائمة مستحيلة لأن بعضاً من الطاقة يضيع دائماً. على الرغم من أن القانون الأول للديناميكا الحرارية ينص على أن الحرارة والعمل متكافئان ويمكن تحويلهما من أحدهما إلى الآخر، فإن القانون الثاني يفرض تحذيراً أو قيداً على القانون الأول الذي يحد من تحويل الحرارة إلى العمل. هذا النشاط الإشعاعي (مع أنه لم يكتشف بعد في وقت طرح هذه الحجج) قدم مصدراً داخلياً للحرارة للأرض لا يبطل القانون الثاني، لكنه يغير التحليل الكمي بشكل كبير (O'Hara, 2018).

كلفـــــن وعُمـــــــر الأرض

في حين أشار الجزء الأول من ورقة كلفن المهمة لعام 1864م إلى تناقض وجهة النظر عن الوتيرة الواحدة مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية، ركز الجزء الثاني على حل فوريه لمعادلة التدفق الحراري لحساب عمر الأرض. وفقاً لنظرية غوتفريد فيلهلم لايبنيز G. W. Leibniz (توفي 1716م) السابقة بأن الأرض كانت في البداية عبارة عن كرة متوهجة ساخنة جرى تبريدها لتشكيل قشرة بلّورية، قام كلفن بحساب الوقت اللازم لقشرة الأرض للوصول إلى التدرج الحراري الأرضي الحالي. عندما تبرد الأرض، سينخفض التدرج الحراري الأرضي تدريجياً للوصول إلى قيمته الحالية؛ قدّر كلفن الوقت اللازم لحدوث ذلك، بافتراض عدم وجود مصدر حرارة داخلي.

احتاج كلفن إلى ثلاثة مقادير لحسابها: درجة الحرارة الأولية للأرض. الموصلية الحرارية والسعة الحرارية للصخور، وكيف يمكن أن تختلف كدالة للعمق؛ والتدرج الحراري الأرضي. بالنسبة للتدرج الحراري الأرضي، اختار 1 درجة فهرنهايت لكل 50 قدماً (نحو 35 درجة مئوية / كم) بناءً على قياسات القشرة القارية (هذا الرقم لا ينطبق على قشرة المحيط، التي لم يكن معروفاً عنها إلا القليل في ذلك الوقت).

لقد أجرى قياساته الخاصة في وقت سابق على التوصيل الحراري للصخور واستخدم متوسط القيمة 400 قدم مربع / سنة (1.2×10^{-6} متر مربع / ثانية) والذي لا يزال يستخدمه الباحثون الحديثون للصخور المتوسطة. كان تقديره لدرجة الحرارة الأولية للأرض 7000 درجة فهرنهايت (3870 درجة مئوية)، وقد كانت مرتفعة جداً. أدى النطاق الكبير المحتمل في هذه المتغيرات إلى اتخاذ

كلفـن نهجـاً متحفظـاً، وخلـص في النهايـة إلـى أن الأرض كانـت في نطـاق واسـع يتـراوح مـن 20 مليـون إلـى 400 مليـون سـنة.

كمـا لوحـظ بالفعـل، تزامـن الحـد الأدنـى أيضـاً مـع تقديـره السـابق لعمـر الشـمس. مـن الواضـح أن الأرض لا يمكـن أن تكـون أقـدم مـن الشـمس، لذلـك وضـع هـذا الحـد الأقصـى للعمـر 20 مليـون سـنة علـى الأرض. في كتابـه أصـل الأنـواع (1859)، قـدر داروين أن تعريـة التكوينـات في جنـوب إنجلتـرا تطلـب 300 مليـون سـنة، لكنـه أزال هـذا الحسـاب لاحقـاً مـن طبعتـه الثانيـة. وضـع عمـل كلفـن كلاً مـن الجيولوجيـين وعلمـاء الأحيـاء في مـأزق حيـث احتـاج داروين أيضـاً إلـى الكثيـر مـن الوقـت لنظريتـه الخاصـة عـن الانتقـاء الطبيعـي.

أجـــري تقديـر ثـانٍ لعمـر الأرض بوسـاطة عالـم جيولوجـي أمريكـي، لقـد تأسسـت هيئـة المسـح الجيولوجـي الأمريكيـــة في عـام 1878م، وكان أول مديـر لهـا هـو كلارنـس كينـغ C. King (تـوفي 1901م)، الـذي كانـت فتـرة عملـه في هيئـة المسـح الجيولوجـي قصيـرة لأن العمـل الإداري لـم يكـن يرضيـه. تـرك المسـح بعـد ثـلاث سـنوات في عـام 1881م واتجـه إلـى مشـاريع التعديـن والأعمـال الاستشـارية. ومـع ذلـك، كان جيولوجيـاً يحظـى باحتـرام كبيـر وانتُخـب في الأكاديميـة الوطنيـة للعلـوم في عـام 1876م. وأثنـاء عملـه في المسـح، أنشـأ مختبـر جيوفيزيائـي لإجـراء قياسـات الضغـط ودرجـة الحـرارة علـى عينـات الصخـور.

يبـدو أن كينـغ كان لديـه خطـة محـددة تمامـاً، فقـد كان مهتمـاً بتقييـد النطـاق العمـري الواسـع الـذي اقترحـه كلفـن لـلأرض في ورقتـه البحثيـة عـام 1864م، لكـن كينـغ كان يعلـم أنـه يحتـاج إلـى بيانـات إضافيـة حـول سـلوك الصخـور المصهـورة في

أعماق الأرض لإحراز مزيد من التقدم. وظف كينغ خريج دكتوراه حديث العهد هو كارل باروس C. Barus (توفي 1935م)، لإجراء تجارب الصخور، واتفقا على أن ينشر باروس النتائج بشكل مستقل بينما سيفسر كينغ الأهمية الجيولوجية للبيانات.

نشر باروس بيانات عن خصائص انصهار الديباز Diabase، وهي صخرة ذات تكوين بازلتي، يُعتقد أنها تمثل باطن الأرض في ذلك الوقت. أنهى إحدى مساهماته في البيانات المنشورة بالتعليق التالي: «إن التأثير الفوري لكل هذا على الفرضية الجيولوجية للسيد كلارنس كينغ قد حان حالياً للإعلان عنه».

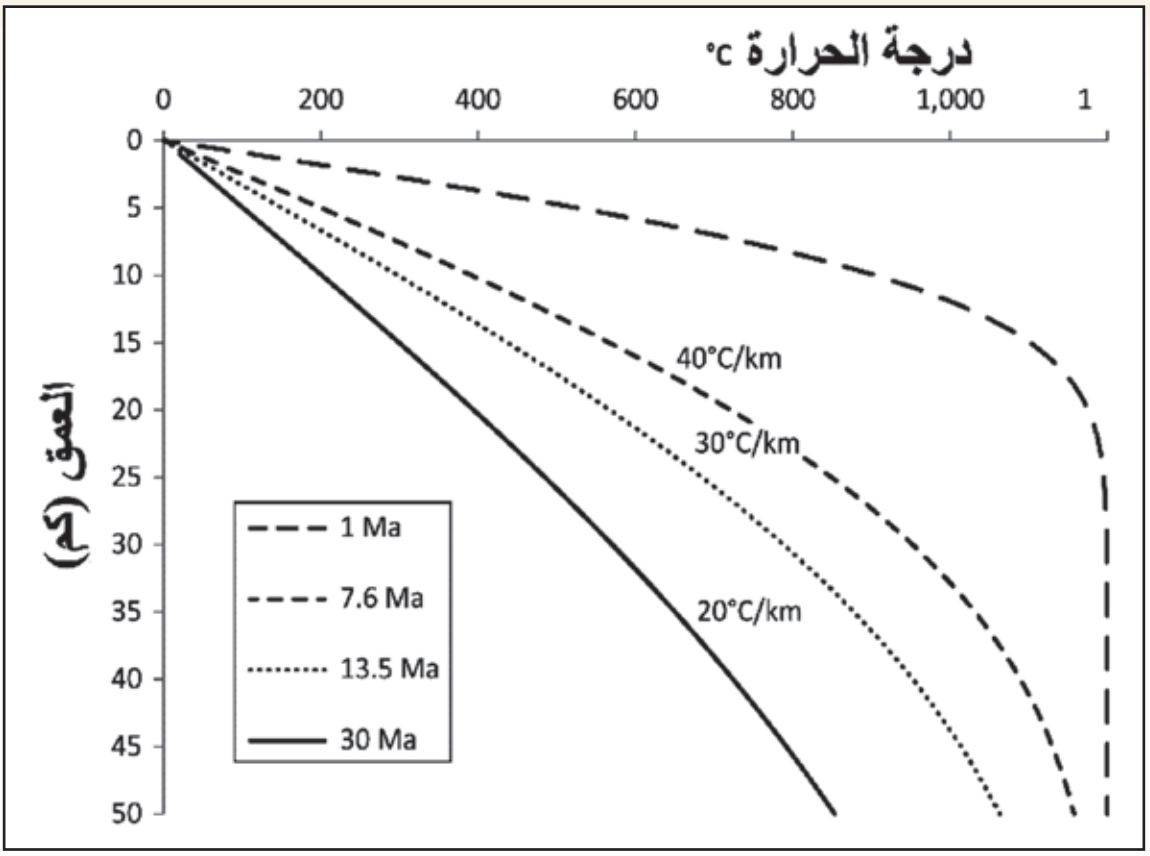
لقد تابع كينغ بالفعل بورقة بعنوان (عمر الأرض)، مستخدماً بيانات باروس الجديدة في عام 1893م. وكانت نقطة انطلاقه في الورقة هي استنتاج كلفن، وآخرون قبله، أن الأرض تتمتع بصلابة عالية مثل الفولاذ، وبالتالي منع وجود كمية كبيرة من السائل في العمق. استخدم بيانات باروس حول سلوك انصهار صخر الديباز، الذي تبلغ درجة حرارة انصهاره 1200 درجة مئوية على السطح ولكنه يرتفع إلى نحو 4000 درجة مئوية في العمق، وفقاً لحسابات باروس.

أظهر كينغ أن منحنى التبريد لكلفن لمدة 100 مليون عام يقع على الجانب السائل من منحنى انصهار الديباز، الذي كان غير متسق مع الأرض شديدة الصلابة. وخلص إلى أن 24 مليون سنة هو الحد الأقصى لعمر الأرض منذ أن وقع هذا المنحنى على الجانب الصلب لمنحنى انصهار الديباز. وافق كلفن، في ورقته البحثية الثانية عن عمر الأرض، مع حسابات كينغ، وخلص كلفن إلى القول: «لا أختلف كثيراً عن تقديره [كينغ] البالغ 24 مليون سنة سيكون من

غير المستحسن نشر أي تقدير أقرب». بدلاً من أن يكون النطاق من 20 مليون إلى 400 مليون سنة كما في ورقة 1864م، كان الحد الأقصى للعمر حالياً في الطرف الأدنى من هذا النطاق.

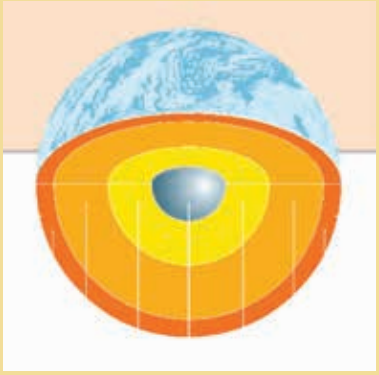
كتوضيح لبعض جوانب نماذج كلفن (1864) وكينغ (1893)، بناءً على حل فوريه، يوضح الشكل ادناه منحنيات تبريد مختلفة لمادة صلبة شبه لا نهائية بدرجة حرارة أولية تبلغ 1200 درجة مئوية (يستخدمها كينغ) وسطح درجة حرارة 0 درجة مئوية. المتغيرات الأخرى هي نفسها التي يستخدمها كلفن.

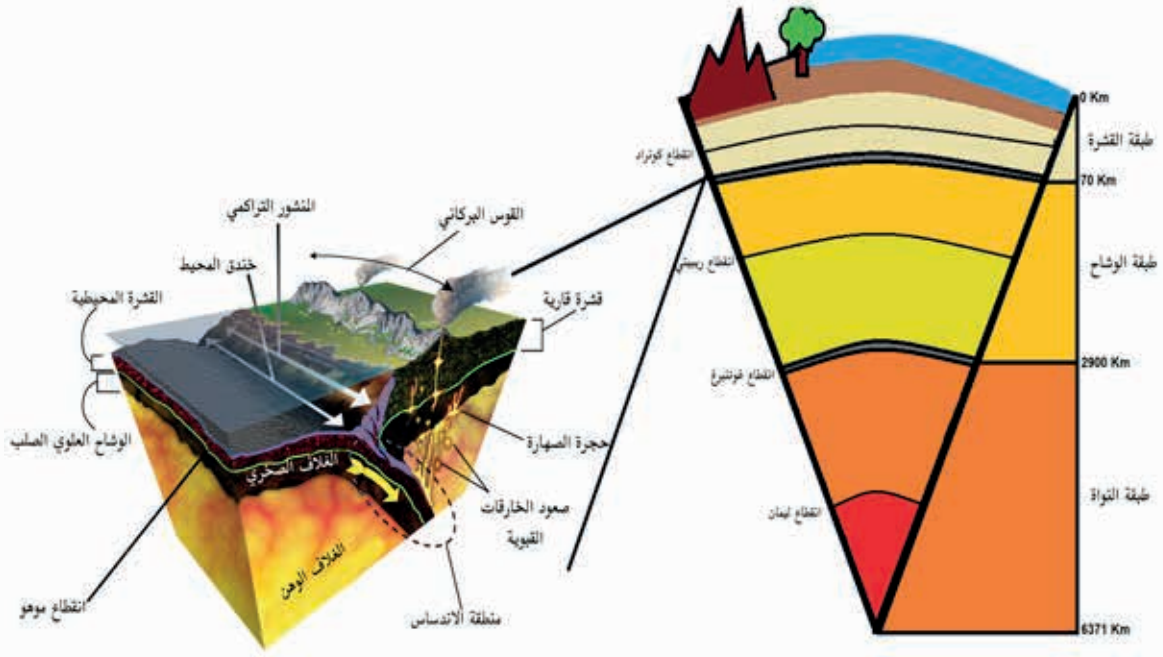
تقابل منحنيات التبريد عند 30 مليون و 13.5 مليون و 7.6 مليون سنة تدرجات حرارة أرضية قريبة من السطح تبلغ 20 و 30 و 40 درجة مئوية / كم، على التوالي. تتوافق التدرجات الحرارية الجوفية بين 20 درجة مئوية / كم و 40 درجة مئوية / كم مع أعمار الأرض من 7.6 إلى 30 مليون سنة، وهو ما يتوافق مع تقدير كلفن وكينغ المتوسط لنحو 24 مليون سنة (O'Hara, 2018).



منحنيات تبريد للأرض بدون مصدر حرارة داخلي يعتمد على تبريد مادة صلبة شبه لانهائية مبدئيًا عند درجة حرارة سطح تبلغ 1200 درجة مئوية و 0 درجة مئوية.

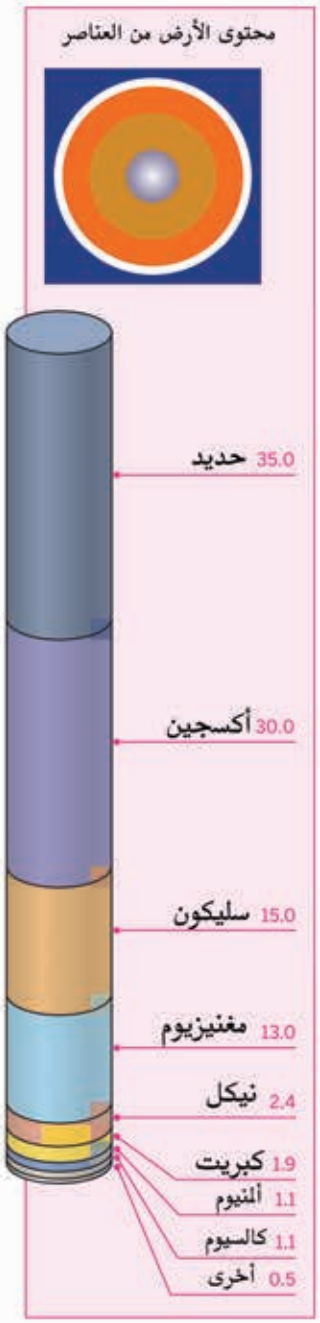
توضح هذه المنحنيات الحسابات التي أجراها كلفن وكينغ في تقديراتهما لعمر الأرض. ينخفض التدرج الحراري الأرضي إلى 40 و 30 و 20 درجة مئوية/كم بعد 7.3 مليون و 13.5 مليون و 30 مليون سنة من التبريد. وضع الأخير مرتين بين قوسين تقدير كلفن وكينغ بـ 24 مليون سنة. وقد أدى اكتشاف النشاط الإشعاعي إلى إبطال هذه النماذج ووفر للجيولوجيين أعماراً أطول لحساب التراكمات الرسوبية (O'Hara, 2018).

حقائق علمية مدهشة	صخـــــور قديمـــة جـــــداً
	اكتشفت إحدى أقدم الصخور حتى الوقت الحالي على الأرض في منطقة جاك هيلز Jack Hills في غرب أستراليا. إذْ يبلغ عمر صخرة جاك هيلز نحو 4.4 بليون سنة. (يبلغ عمر الأرض نفسها نحو 4.6 مليار سنة!).



الخصائـــص الكيميائيـــــة لـــلأرض

تتكـــون الأرض بشـكلٍ عـام في الغالـب مـن الحديـد (32.1 %) والأكسـجين (30.1 %) والسـيليكون (15.1 %) والمغنيسـيوم (13.9 %) والكبريـت (2.9 %) والنيـكل (1.8 %) والكالسـيوم (1.5 %) والألمنيوم (1.4 %)، بينما تتكون النسـبة المتبقيـة البالغـة 1.2 % مـن كميـات ضئيلـة مـن العناصـر الأخـرى. تنقسـم الأرض كيميائيّـاً إلـى ثـلاث طبقات:



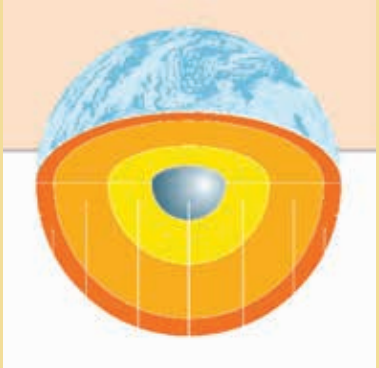
الطبقـة الخارجيـة التـي تسـمى القشـرة الأرضيـة Crust، وتتكـون بالكامـل تقريبـاً مـن مـادة السـيليكات الصخريـة (الأكسـجين والسـيليكون)، مـع الألومنيـوم والحديد والكالسـيوم والمغنيسـيوم والصوديوم والبوتاسيوم والتيتانيوم وآثار 64 عنصراً آخرَ.

الطبقـة الثانيـة هـي الوشـاح: وهـو قسـمين علـوي وسـفلي، حيـث يتكـون الوشـاح العلـوي مـن سـيليكات الحديد والمغنيسـيوم. ويتكون الوشـاح السـفلي من أكاسـيد وأكاسيد السيليكون والمغنيسيوم.

أمـا الطبقـة الثالثـة: النـواة (اللـب)، فهـي تتكـون مـن معـادن الحديـد والنيـكل وآثـار الكبريـت والكربـون والأكسجين والبوتاسيوم.

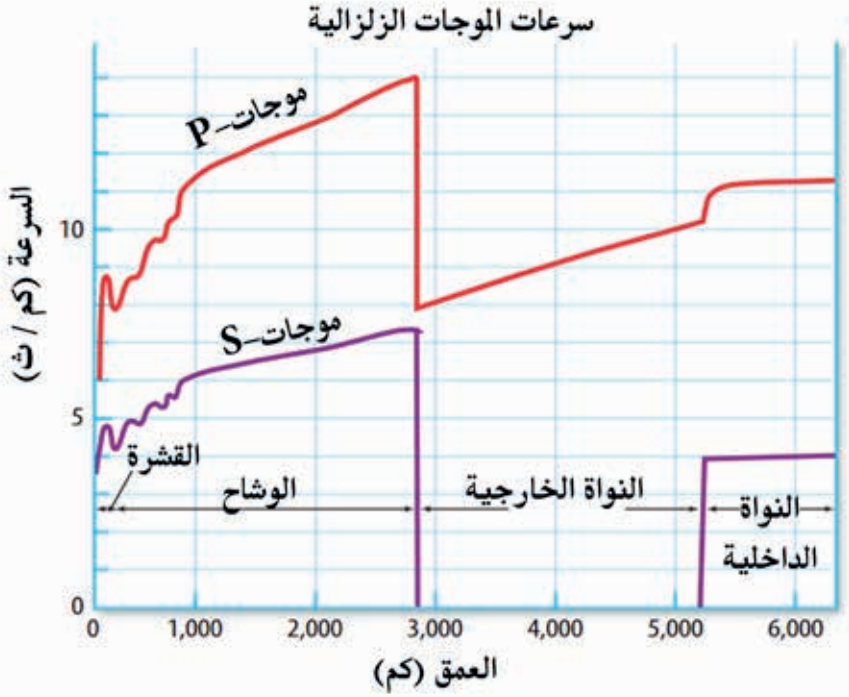
وقد توصل العلماء إلى معرفة كيمياء الأرض من خلال تحليل الكثافات بمساعدة موجات الزلازل ومن خلال دراسة النجوم والنيازك والكواكب الأخرى. من بين كل كيلوغرام من المواد في القشرة القارية للأرض، يوجد 12 عنصراً فقط بكميات أكبر من 1 %، وتمثل العناصر الاثنا عشر الوفيرة 992.3 من 1000 غرام في الكيلوغرام من القشرة القارية للأرض.

تحوي جميع المعادن الشائعة على تركيبات تعتمد على عنصر واحد أو أكثر من هذه العناصر الوفيرة. تشكل العناصر الثمانون المتبقية مجتمعة أقل من 1 % من القشرة بالوزن وأقل من 2 % بالحجم. توجد المعادن المصنوعة من العناصر النادرة بكميات صغيرة فقط، كما أن رواسب خام العناصر النادرة مثل الذهب واليورانيوم والقصدير نادرة ويصعب العثور عليها. ومع ذلك، يمكن استخراج هذه العناصر النادرة واستخدامها بتجميع مجموعة واسعة من المواد في المختبر وفي التصنيع للاستخدام اليومي.

حقائق علمية مدهشة	أنـــدر من النـــادر
	أندر عنصر يحدث بشكل طبيعي على الأرض هو الفرانسيوم. يوجد فقط نحو (25 غرام) من الفرانسيوم على الأرض في أي وقت. إنه شديد النشاط الإشعاعي ويتحول إلى عناصر أخرى بعد دقائق فقط من تكوينه.

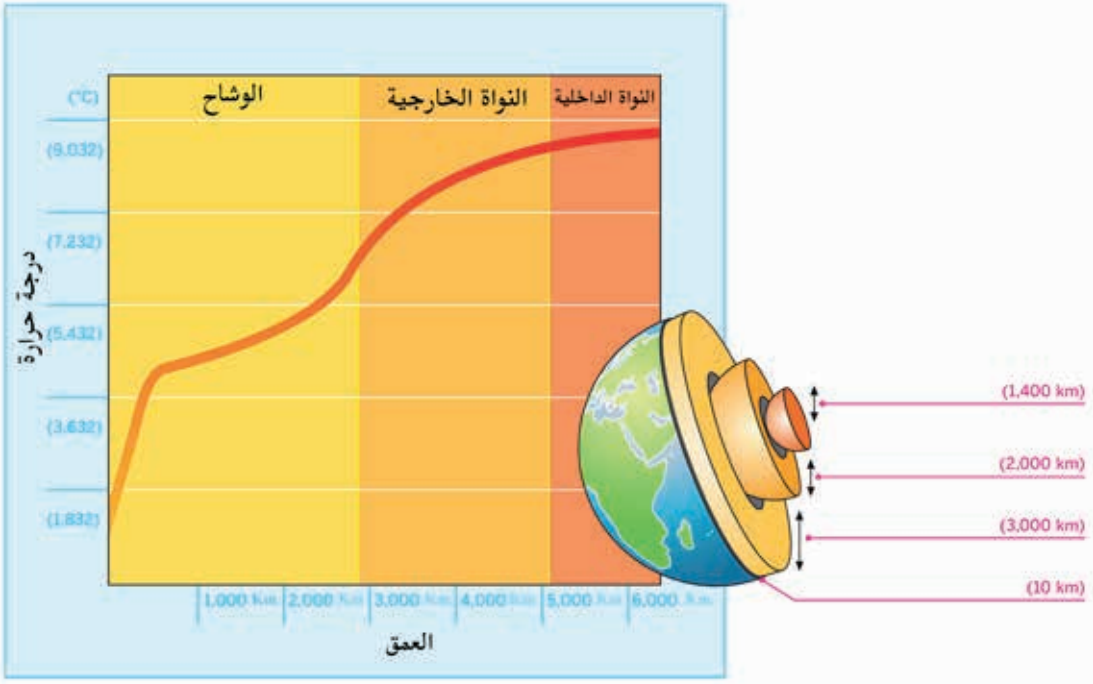
الخصائـــــص الفيزيائيـــــة للأرض

حسناً، أخذنا فكرة عن الخصائص الكيميائية للأرض، فماذا عن خصائصها الفيزيائية؟ باستخدام طرائق جيوفيزيائية غير مباشرة تمكّن العلماء من دراسة الخصائص الفيزيائية للأرض لكن على مستوى أكبر. فهم يرسلون موجات زلزالية مصطنعة كبيرة من إحدى الجهات، ويستقبلون انعكاساتها عن طبقات الأرض من جهة أخرى، وبتحليل هذه الموجات بوساطة الحاسوب تمكنوا من معرفة ما هي درجات الحرارة والكثافة والسماكة والضغط وغيرها من العوامل الفيزيائية.



منحنياتٍ توضح توزيع سرع الموجات الطولية والقصيرة عبر طبقات الأرض

لقد اكتشف العلماء أن درجة الحرارة داخل الأرض تزداد كلما تعمقنا، لتصل إلى أكثر من 5000 درجة مئوية في المركز أو النواة، ويزداد الضغط أيضاً بشكل كبير مع العمق. ويؤدي الجمع بين هذين العاملين إلى نشوء خمس طبقات أو مناطق مميزة داخل الأرض بالتناوب بين الأطوار الصلبة والسائلة وشبه السائلة أو اللدنة.



منحنٍ يوضح تغير درجة الحرارة مع العمق.

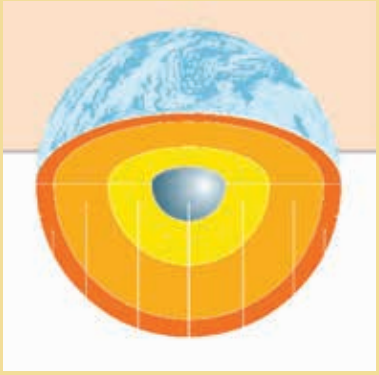
وقد وجد العلماء أن الطبقة الخارجية (الغلاف الصخري) رقيق وبارد وصلب على القشرة وبعض الوشاح، وهو (يطفو) على الغلاف الوهن الأساسي.

الغلاف الوهن أو الموري (أسثينوسفير) Asthenosphere وهو أكثر سخونة وفي حالة شبه سائلة. بدءاً من عمق 80 إلى 100 كيلومتر تقريباً، تتدفق الصخور

الموجودة في الغلاف الوهن ببطء في حالة لدنة تتحرك بحركة دائرية مكونة تيارات حرارية من الصخور الساخنة. هذا ينقل الحرارة من أعماق الوشاح نحو السطح. هذه الحركة هي التي تساعد على تحريك القارات وتشكل البراكين وتدفقات الحمم البركانية.

الطبقة التالية الوشاح السفلي (الميزوسفير) Mesosphere وتتألف من الجزء الداخلي من الوشاح، وهي عبارة عن منطقة من الصخور الصلبة شديدة السخونة. هنا، ومع ارتفاع درجة حرارتها أكثر من الغلاف الوهن، إلا أن الضغط مرتفع جداً بحيث لا يمكن تكوين صخور سائلة.

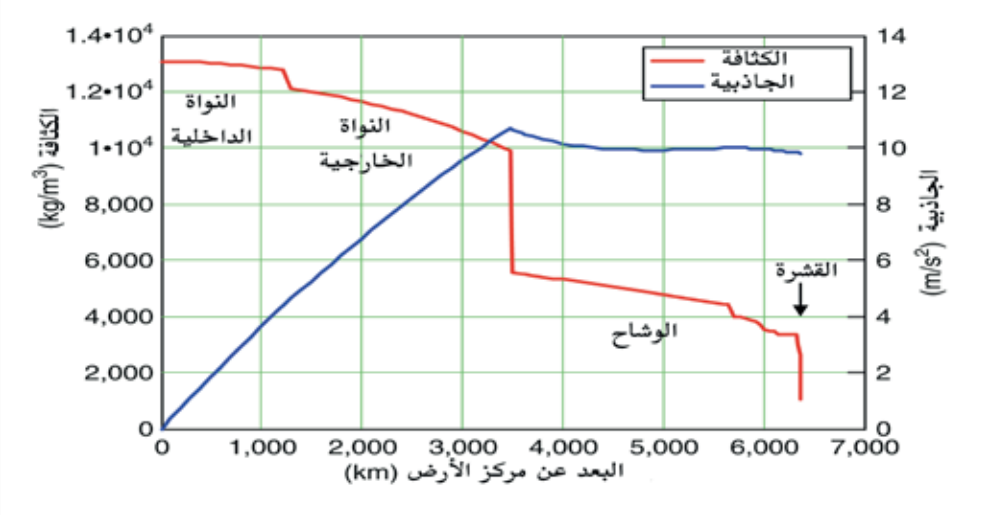
أخيراً؛ تنقسم النواة إلى جزءين النواة الخارجية السائلة، حيث تكسب درجة حرارة بسبب الضغط الزائد، والنواة الداخلية الصلبة حيث يكون الضغط مرتفعاً جدّاً فيتعذر تكوين سائل.

حقائق علمية مدهشة	مناجـــم حـــــارة
	يعد منجما تاوتونا TauTona ومبوننغ Mponeng للذهب في جنوب إفريقيا الأعمق في العالم، حيث ينخفضان نحو 4 كيلومترات تحت سطح الأرض. مع أنها مناجم عميقة، إلا أنها قشرة ضحلة. ومع ذلك، يمكن أن ترتفع درجات الحرارة في قاع المناجم إلى 55 درجة مئوية. يعمل نظام تكييف الهواء المتطور على خفض درجة الحرارة للسماح لعمال المناجم بالعمل.

ما رأيـــك أن نـــــــزن الأرض؟

قال أرخميدس يوماً ما: أعطوني نقطة ارتكاز وعصاً طويلة وأنا سأحرك لكم الأرض. ولكن بعد أكثر من 2000 عام لم يستطع أحد أن يقدم له ذلك المركز ولا تلك العصا الطويلة، لأنها أصلاً فكرة خيالية وتفوق قدرات البشر.

لكنّ عالماً اسمه هنري كافنديش قال له: يا رجل إن أروع الحلول وأجملها هو أبسطها. اسمع أنا لدي فكرة جميلة جدّاً تمكننا من معرفة وزن الأرض باستخدام جهاز اسمه ميزان الالتواء البسيط، الذي يقيس مقدار قوة الالتواء الناتجة عن سحب الجاذبية لكرتين كبيرتين على زوج من كرتين أصغر، ويمكن حساب الجاذبية الضعيفة بين زوجي الكرتين الصغيرتين، ومن خلال مقارنة هذا مع قوة الجاذبية الأرضية، يمكننا حساب كثافة الكوكب (ولما كان حجم الأرض معروفاً بالفعل، أمكننا معرفة كتلته أيضاً).



منحنٍ بياني يعبر عن العلاقة بين حقل الجاذبية الأرضية وكثافة الكتلة داخل الأرض وفقاً لنموذج الأرض المرجعي الأولي (PREM) المتماثل شعاعيّاً

وقـد تمكـن العلمـاء مـن حسـاب وزن الأرض وأنـه يبلـغ 5.9736×10^{24} كـغ، وبالتالـي تبلـغ كثافتهـا 5.514 غـرام/ سـم^3، لكـن رقـم الكثافـة أظهـر أن كوكبنـا يجـب أن يكـون في الغالـب صلبـاً، مـا لـم تكـن هنـاك مـواد غيـر معروفـة كثيفـة جـدّاً في مكان ما في الأعماق.

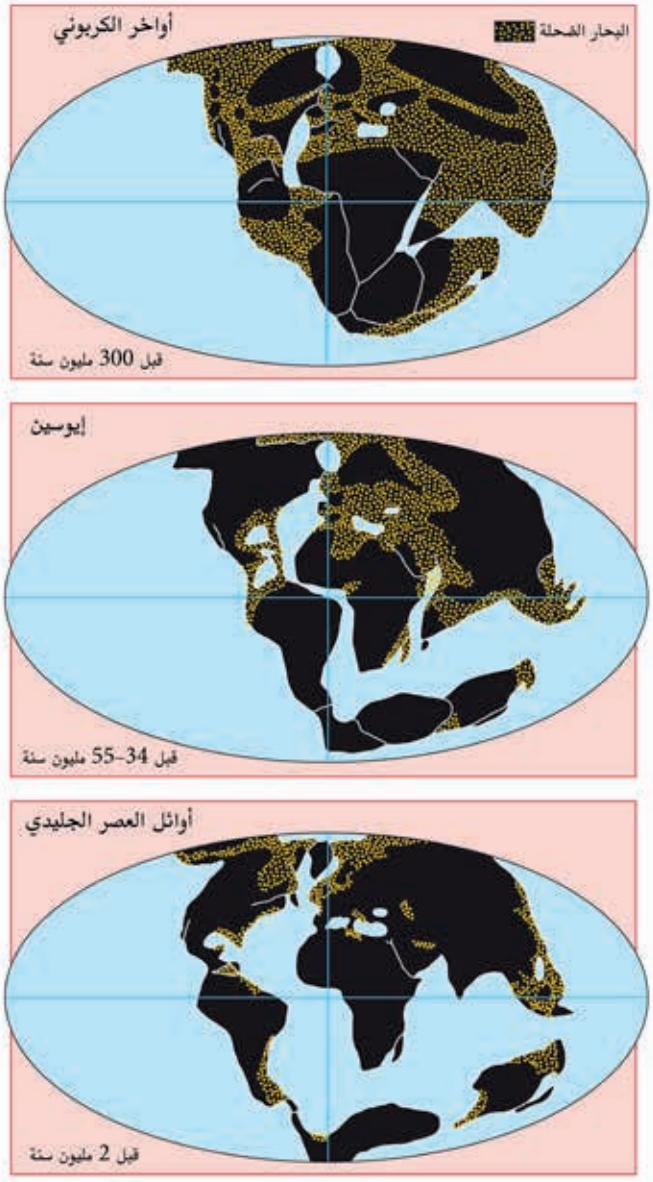
على غرار خيال أرخميدس، لو كان لدينا ميزان عملاق ووضعنا الأرض في إحدى كفتيه، ووضعنا في الكفةَ الأخرى القمر وعطارد والزهرة والمريخ ستجد أنّ وزن الأرض يعادل وزن تلك الأجرام مجتمعة

الزحـــــف القـــــاريّ والصفائـــح التكتونيـــــة

حتى نفهـــم عملية الزحف (الانزيـــــاح) القارّي ونقربها لأذهاننـــا، أخرج بالون أحمر من حقيبة مستلزمات الرحلة، وألصق عليه مجموعة نجوم ملونة تمثل قارات العالم المعروفة حالياً لكن بشكل متقارب جداً، ثم ابدأ بعملية نفخ البالون وتوقف قليلاً وانظر كيف تتغير مواقع النجوم (القارات) كلما زادت عملية النفخ، زاد التباعد بين النجوم (القارات).

أما التوزيع الجغرافي لشكل الأرض فقد استدل عليه عام 1915 من خلال نظرية الانجراف القاري التي تفترض وجود قارة عملاقة قبل حوالي 200 مليون سنة أطلق عليها اسم بانجيا Pangea يحيط بها محيط عظيم أطلق عليه اسم بانثالاسا Panthalassa وتفككت هذه القارة العظيمة إلى:

- **قارة شمالية سميت لاروسيا** Laurasia وتضم حالياً قارات أمريكا الشمالية وأوراسيا (أوروبا وآسيا) ما عدا الهند وجرينلاند.
- **قارة جنوبية أطلق عليها قوندوانالاند** Gondowana land وتضم حالياً قارات أمريكا الجنوبية، وأفريقيا، وأستراليا – الهند، والقارة المتجمدة الجنوبية. ويفصل بين هاتين القارتين بحر كبير يسمى التثيس Tethys ويُعتقد أن قارة القوندوانالاند بدأت تتفكك حيث انفصلت أفريقيا وأمريكا الجنوبية ككتلة واحدة وبدأ بعدها المحيط الأطلسي في التكوين. وخلال تلك المرحلة أيضاً انفصلت أستراليا من القارة المتجمدة الجنوبية.



تتجذر القارات في الصفائح المتحركة للقشرة، التي تحملها ببطء شديد حول الكرة الأرضية. على مدى ملايين السنين، جرى تقسيمها ودفعها معاً في ترتيبات مختلفة. القارات التي نعرفها اليوم هي أجزاء من شبه القارة العملاقة التي كانت موجودة قبل 270 مليون سنة، وانفصلت خلال عصر الديناصورات.

مـع اكتشـاف العلمـاء للحمـل الحـراري في الوشـاح، والدليـل علـى انتشـار قـاع البحـر، صـار مـن السـهل جدّاً رؤيـة أن القـارات قـد تحركـت عبـر الزمـن الجيولوجي بالنسـبة لبعضهـا بعضـاً. لكـن هـذه الأفـكار لـم تكـن مقنعـةً دائمـاً تمامـاً. مـع أنّ أفـكار جيمـس هوتـون حـول بنـاء الجبـال ودورة الصخـور، قـد مـر وقـت طويـل عليهـا قبل أن يجري اقتراح أي آلية أخرى.

بـين عامـي 1910 و 1915، اقتـرح عالـم الجليـد الأمريكـي فرانـك تايلـور وعالـم الأرصـاد الجويـة الألمانـي ألفريـد فيغنـر فرضيـة الانزيـاح (الانجـراف) القـاري. ومـع

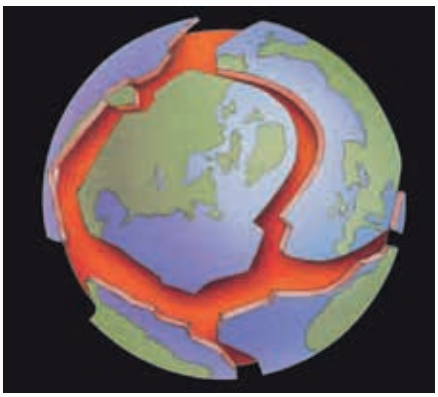
ذلك، لا يمكن لأحد أن يتخيل طريقة يمكن للقارات من خلالها الانزياح مثل السفن في البحر عبر الوشاح الصخري الصلب على ما يبدو.

لما يقرب من نصف قرن، كان مؤيدو نظرية الانزياح القاري يمثلون الأقلية. لكن قلّةً من مؤيدي النظرية كانوا يعملون بجد. حيث كان أليكس دو تويت في جنوب إفريقيا يجمع أدلة على هياكل صخرية مماثلة بين جنوب إفريقيا وأمريكا الجنوبية، بينما اقترح آرثر هولمز، عالم جيوفيزيائي بريطاني، الحمل الحراري Convection في الوشاح كآلية للانزياح. ولم يُسوَّ الجدل بين العلماء إلا في ستينيات القرن العشرين، عندما بدأ علماء المحيطات العمل. حيث اقترح هاري هيس أن الحمل الحراري تحت قشرة المحيط قد يتسبب في انتشار قاع البحر من خلال تلال وسط المحيط، وقد قدم فريد فاين ودرم ماثيوز الدليل المغناطيسي لانتشار قاع البحر. كما كانت أوراق توزو ويلسون في كندا، وجيسون مورغان في برينستون، ودان ماكنزي في كامبريدج هي التي جمعت الأدلة معاً في نظرية الصفائح التكتونية.

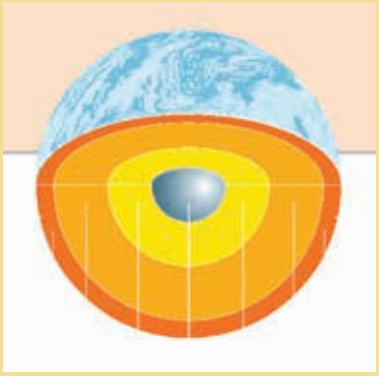
تفسّر لنا نظرية الصفائح التكتونية سطح الأرض من ناحية حركات عدد صغير من الصفائح الصلبة التي تتحرك بالنسبة لبعضها بعضاً، وكيف تتفاعل وتتشوه على طول حدودها. لا يعني ذلك أن القارات تنزاح بحرية وإنما تُحمل على صفائح تمتد أعمق بكثير لتشمل الغلاف الصخري والوشاح، الذي يبلغ سمكه عادةً 100 كيلومتر. لا تقتصر الصفائح على القارات اليابسة، لكنها تشمل أيضاً صفائح قاع المحيط.

يوجد حالياً سبع صفائح رئيسية: الصفائح الأفريقية، والأوروبية الآسيوية، وأمريكا الشمالية، وأمريكا الجنوبية، والمحيط الهادئ، والهندو الأسترالية،

والقارة القطبية الجنوبية. كما يوجد أيضاً عدد من الصفائح الصغيرة، بما في ذلك ثلاث صفائح كبيرة جدّاً حول المحيط الهادئ، بالإضافة إلى بعض الأجزاء الأكثر تعقيداً حيث تنضم صفائح أخرى.



تحوي كل صفيحة تكتونية على طبقة سفلية من الصخور الصلبة وطبقة عُليا تسمى القشرة. تركب الصفائح فوق الأرض التي تتحرك ببطء، ومعظمها من الوشاح الصلب. عندما تكون القشرة رقيقة، يكون سطح الأرض منخفضاً ومغطىً بالبحار والمحيطات. تتشكل القارات حيث تكون القشرة أكثر سمكاً. عندما تتحرك الصفائح التكتونية، تحمل القارات معها وتغير المحيطات شكلها.

حقائق علمية مدهشة	اصطـــدام ســـــكاي وارد
	أدى تصادم شبه القارة الهندية والقارة الآسيوية إلى إنشاء سلسلة جبال الهيمالايا، موطناً لأعلى قمم الجبال في العالم، بما في ذلك تلك التي يزيد ارتفاعها عن 7300 متر. لأن الانزياح القاري لا يزال يدفع الهند إلى آسيا، فإن جبال الهيمالايا لا تزال تنمو.

الأدلة العلمية على صحة نظرية الصفائح التكتونية

منذ نحو 225 مليون سنة، بدأت التضاريس بالتحرك شمالاً بسرعة 10 سنتيمترات في السنة. استمر هذا لمدة 135 مليون سنة، وعندها بدأت أحافير أمريكا الشمالية في الظهور عندما وصلت التضاريس إلى خط العرض الحالي واصطدمت بألاسكا. من المحتمل أيضاً أنها تجاوزت ساحل كاليفورنيا في طريقها، وكشطت المواد من الحزام الذهبي لولاية كاليفورنيا (ماذر لود). إذا كان هذا صحيحاً، فربما يكون اندفاع الذهب في ألاسكا على الصخور نفسها مثل اندفاع الذهب في كاليفورنيا، لكنه انحرف 2400 كيلومتر إلى الشمال.

طبعاً لا يقبل العلماء أية نظرية تُطرح هكذا، وإنما لا بُدَّ أن تدعمها إثباتات علمية حقيقية تبرهن على صحتها، وسنورد فيما يأتي عدداً من هذه الأدلة.

دليـــــل جغرافـــي: التـــــلاؤم القـــــاري

عندما اقترح عالم الأرصاد الجوية الألماني ألفريد فيغنر في عام 1915 أن القارات قد انزاحت حول العالم، كان أحد الأدلة التي اعتمدها هو الملاءمة القارية: أمريكا الجنوبية وأفريقيا تكاد تتلاءم معاً على طول الحواف المغمورة للأرفف القارية. إنها مثل قطع أحجية الصور المقطوعة العملاقة، يبدو أيضاً أن معظم القارات وجزءاً من آسيا تتلاءم معاً. وقد عزز هذا الاعتقاد بأن القارات هي أجزاء من قارةٍ واحدة عملاقة في عصور ما قبل التاريخ أطلق عليها اسم بانجيا.

قد تتشابك سواحل بعض القارات تقريباً إذا جرى إعادة ترتيبها مثل قطع أحجية ذات صور مقطوعة. على سبيل المثال، أمريكا الجنوبية تتلاءم مع إفريقيا.

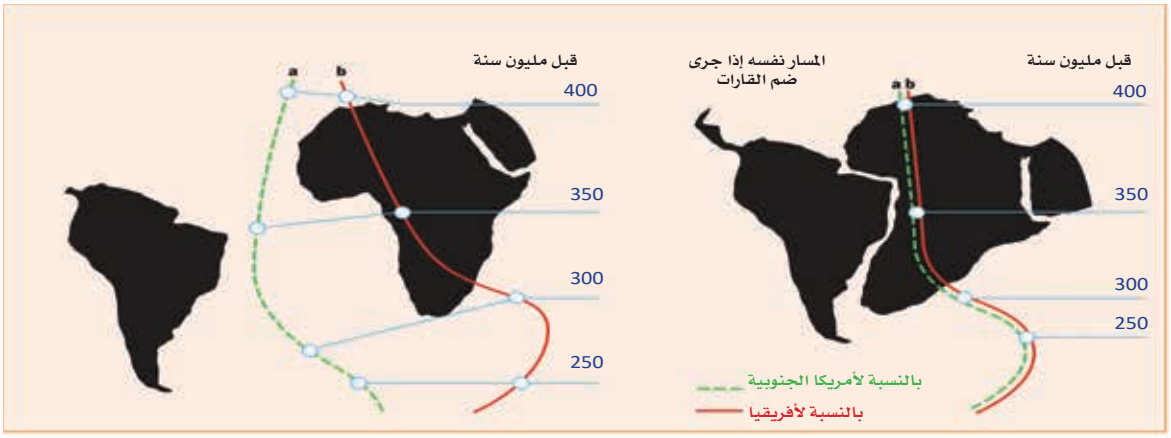
دليل جيوفيزيائي تغير مسار القطب المغناطيسي الشمالي

يوجد دليل آخر على حدوث الانزياح القاري يكمن في الأدلة المغناطيسية القديمة. إذ تحوي بعض الصخور على حبيبات مغناطيسية تتماشى مع مواضع الأقطاب المغناطيسية عند تشكل تلك الصخور. وتظهر الدراسات التي أجريت على مثل هذه المحاذاة أن القطب المغناطيسي الشمالي تجول على ما يبدو عبر شمال المحيط الهادئ على مدار 250 مليون سنة الماضية.

لقد أظهرت الاختبارات التجريبية المغناطيسية أن القارات قد تجولت في الماضي.

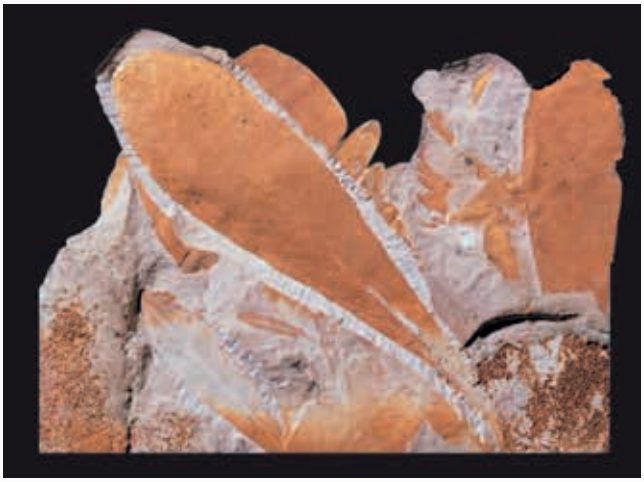
دليل جيوفيزيـــائي تغير مسار القطب المغناطيسي الجنوبـي

تكشـف الدراسـات المغناطيسـية القديمـة في قـارات مختلفـة عـن مسـارين ظاهرين للتجول القطبي، وليس مساراً واحداً. وتظهر صخور أمريكا الجنوبية مساراً قطبيّاً مختلفاً عن المسار الذي تظهره صخور إفريقيا. وإذا جرى ضم القارتين، فسيظهر مسار تجول واحد، مما يشير إلى أن القارتين قد جرى ضمهما مرة واحدة لكنهما تباعدتا عن بعضهما منذ ذلك الحين.

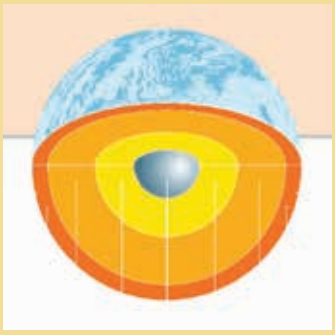


دليل من علـــم الأحياء انتشـــــار السرخـس اللسانـــي

ظهرت نباتات وحيوانات برية أحفورية تنتمي إلى العصر البرمي متطابقة في القارات الجنوبية، التي يفصلها البحر حالياً على نطاق واسع.



عندما صرح العالم الألماني ألفريد فيغنر في عام 1915 بأن قارات اليوم كانت ذات يوم جزءاً من كتلة واحدة، سخر الناس منه، لكن فيغنر كان على حق، وقال إنه مع وجود حفريات نباتية قديمة، مثل السرخس اللساني Glossopteris fern (في الصورة أعلاه) في قارات متباعدة على نطاق واسع، وأنها لا يمكن أن تأتي إلا من قارة أصلية واحدة. يتفق الجيولوجيون اليوم مع فيغنر على أن القارات قد تباعدت عن بعضها بالفعل.

حقائق علمية مدهشة	قـــارة أوركونتينينتس Urkontinent
	كان الاسم الأصلي الذي اقترحه الفريد فيغنر للقارة القديمة المقترحة هو أوركونتينينتس (Urkontinent) – معناها (الأول أو الأصلي)، و kontinent تعني (القارة) في لغة فيغنر الأصلية الألمانية. الاسم الأكثر شيوعاً لهذه الكتلة الأرضية القديمة الضخمة حالياً هو بانجيا Pangea، الذي يعني (جميع الأراضي) باللغة اليونانية.

البحـــث عن القـــــارات المفقـــودة

إذا كانت البقايا القارية قد تراكمت على سطح الكوكب في معظم تاريخها، فمتى بدأت؟ وأين هي القارة الأولى؟ ليس من السهل الإجابة على ذلك. لقد جرى إعادة صياغة الصخور القارية القديمة، وطيها، وتكسيرها، ودفنها، وصهرها جزئيّاً، وثنيها، وتكسيرها مرة أخرى، وإطلاقها من خلال عمليات الاقتحام الأصغر عمراً، بحيث يصعب فهمها. إنها تشبه محاولة التعرف على بقايا سيارة فردية داخل الخردة المضغوطة من ساحة الخردة.

لكن البحث عن أقدم الصخور على الأرض قد يقترب من نهايته. فقد ظهر بعض المتنافسين الأوائل من حزام باربرتون غرينستون في جنوب إفريقيا. عمر صخورها أكثر من 3.5 بليون سنة، لكنها بقايا حمم وجزر المحيط، وليست قارات. جرى اكتشاف صخور مماثلة حالياً في منطقة بيلبارا في غرب أستراليا، وهناك صخور في جنوب غرب غرينلاند تعطي تواريخ تصل إلى 3.75 بليون سنة، لكنها مرة أخرى صخور بركانية في المحيط.

يقع أفضل مرشح للقارة الأولى في قلب شمال كندا. في الأراضي القاحلة غير المأهولة على بعد نحو 250 كيلومتراً شمال يلونايف، بالقُرْب من نهر أكستا، توجد سقيفة منعزلة مليئة بالمطارق الجيولوجية ومعدات التخييم. فوق الباب توجد لافتة خشنة مكتوب عليها (Acasta City Hall)، التي تأسست قبل 4 بليونات سنة) . بعض الصخور الموجودة هناك يزيد عمرها على 4 بليونات سنة.

لقد تخلت عن أسرارها بفضل حبيبات الزركون المعدنية، التي تحبس داخل ذرات اليورانيوم الشبكية، والتي تتحلل إلى رصاص. يمكن أن تتعطل الحبيبات

من خلال إعادة الانصهار، والنمو اللاحق، وتلف الأشعة الكونية، ولكن ثمة أداة جرى تطويرها في أستراليا تُعرف باسم SHRIMP (مسبار أيوني دقيق حسَّاس عالي الدقة) تستخدم شعاعاً ضيقاً من أيونات الأكسجين لتفجير الذرات لأجزاء صغيرة. من الزركون يمكن تحليل مناطق مختلفة من الحبيبات بشكل فردي. أعطت مراكز بعض الحبيبات عمراً يصل إلى 4.055 بليون سنة، مما يجعلها من أقدم الصخور على الأرض، ودليل على وجود قارات عمرها أقل من 500 مليون سنة من تكوين الأرض.

في عام 2008، عُثر على بعض الصخور بالقُرْب من إينوكجواك Inukjuak، في خليج هدسون، كندا، يرجع تاريخها إلى 4.28 بليون سنة، مما يجعلها من أقدم الصخور في العالم. تظهر شريحة عبر إحدى التكوينات الصخرية أعلاه. يعطي عمرها فكرة عن الوقت الذي بدأ فيه سطح الأرض يصبح أكثر استقراراً. يعتقد الجيولوجيون أن الصخور تشكلت في الأصل على شكل حمم بركانية في قاع المحيط. ومنذ ذلك الوقت تحولت بشكل كبير (تغيرت بسبب الحرارة والضغط).

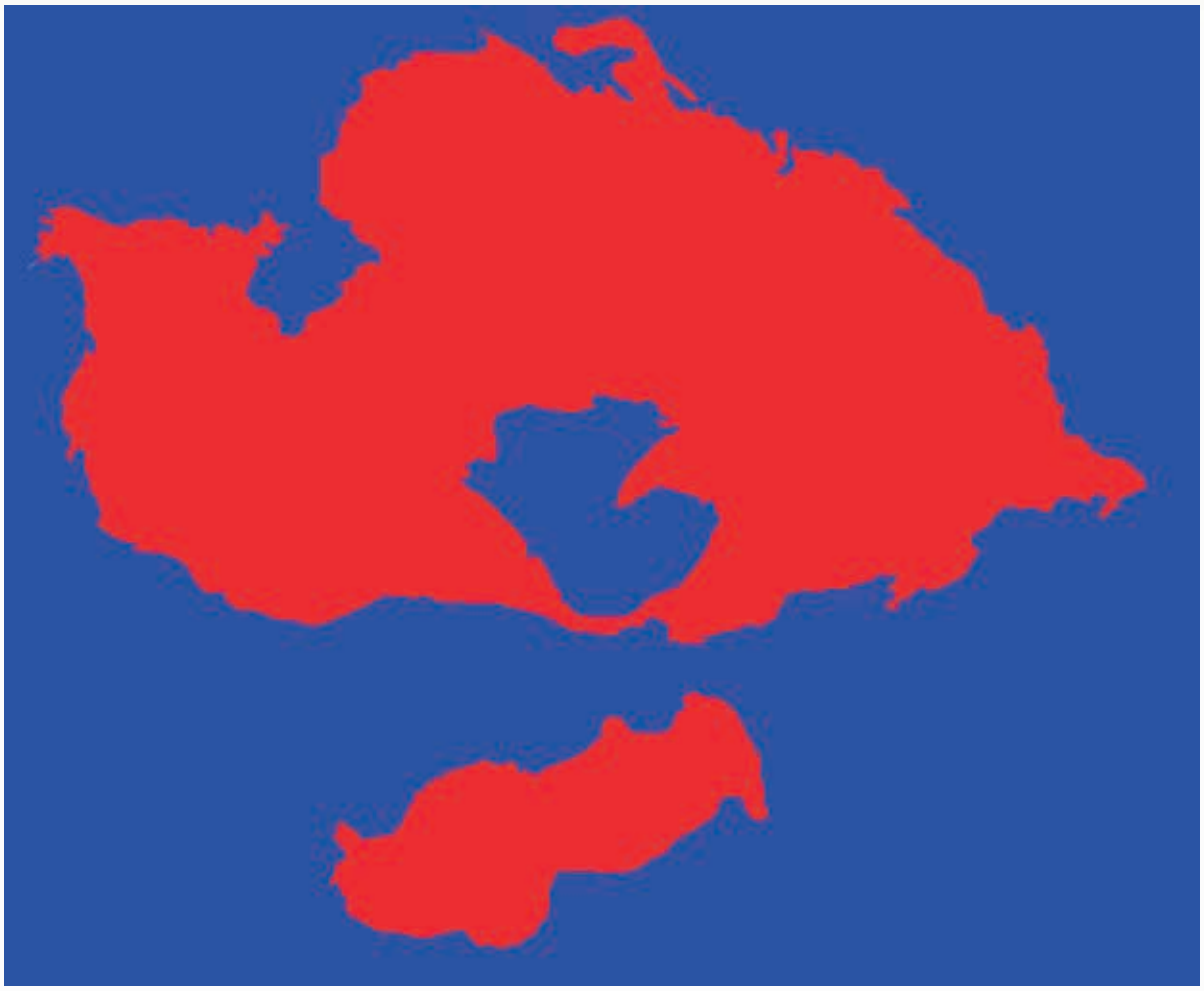
قـــــارات المســـــتقبل الفائقـــــة

لقد أمضينا معظم الوقت ننظر إلى الوراء، في الوقت المناسب على الحركة القارية في الماضي. لكن القارات لا تزال تتحرك، فكيف ستبدو خريطة العالم بعد 50 مليون سنة أو 100 مليون سنة أو أكثر؟

في البداية، من المعقول أن نفترض أن الأمور ستستمر في اتجاهاتها الحالية. حيث إنّ المحيط الأطلسي سيستمر في الاتساع، أما المحيط الهادئ فإنه سينكمش. ستستمر العملية التي أغلقت محيط تيثيس، مع المزيد من الزلازل وارتفاعات الجبال في البلد الخطر بين جبال الألب وجبال الهيمالايا.

ستستمر أستراليا بالصعود شمالاً، لتلحق ببورنيو وتدور حولها لتتصادم مع الصين. في المستقبل، قد تنعكس بعض الحركات. نحن نعلم سلفاً أنّ المحيط الأطلسي انفتح وأغلق في الماضي، ومن المحتمل أن تبرد قشرة المحيط الأطلسي في النهاية وتتقلص وتبدأ في الغرق مرة أخرى، وربما تنخفض تحت الساحل الشرقي للأمريكيتين. ثم سوف تتجمع القارات مرة أخرى.

يتوقع كريستوفر سكوتيز من جامعة تكساس في أرلينغتون أنه بعد 300 مليون سنة في المستقبل، ستكون هناك قارة عملاقة جديدة، أطلق عليها اسم بانجيا ألتيما Pangaea Ultima أو بانجيا بروكسيما Pangaea Proxima، ربما ببحر داخلي، كل ذلك سيبقى من المحيط الأطلسي الذي كان يوماً ما عظيماً.



بعد 300 مليون سنة هكذا سيصير حال القارات التي نعرفها اليوم. محيط كبير وقارتين فقط تحتجز الكبيرة منهما بداخلها بحر.

القشرة الأرضية Earth Crust

قشرة الأرض عبارة عن طبقة رقيقة على سطح الأرض، تساهم بنسبة 1.1 – 0.2 % من العمق الكلي. إنها مكونة من العديد من أنواع الصخور المختلفة، معظمها خفيف نسبيّاً وغني بالسيليكون، بمتوسط كثافة (2.7–3 غرام لكل متر مكعب). تنقسم القشرة الأرضية إلى نوعين رئيسين: إحداهما تسمى بالقارية، والأخرى تسمى بالمحيطية. تتكون القشرة القارية في الغالب من صخور منخفضة الكثافة، مثل الغرانيت. أما القشرة المحيطية الرقيقة فهي تتكون أساساً من صخور عالية الكثافة نسبيّاً، مثل البازلت. وتسمى المنطقة الانتقالية بين هذين النوعين من القشرة أحياناً بانقطاع كونراد Conrad Discontinuity.

سنتعرف معاً على نوعي القشرة الأرضية كلٍ على حدة وأهم الفروقات فيما بينهما.

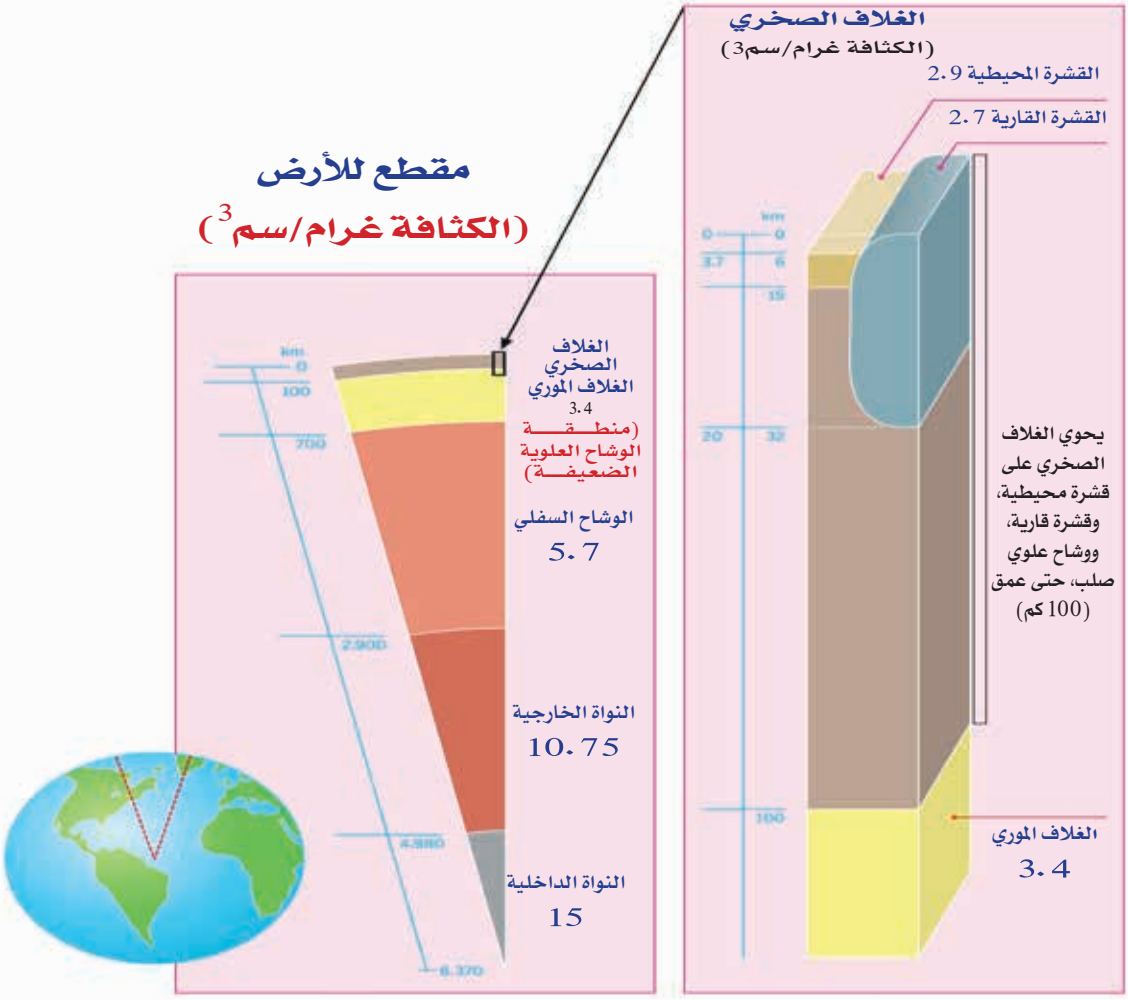
القشرة القارية Continental Crust

يستخدم مصطلح الغلاف الصخري (ليثوسفير) Lithosphere لوصف الجزء الخارجي الصلب من الأرض، الذي يتكون من القشرة القارية والقشرة المحيطية والجزء العلوي من الوشاح. لقد تسبب الانصهار الجزئي للمواد المتطايرة في النواة الخارجية والوشاح بإطلاق الغازات على السطح أثناء تكوين الكوكب. وقد أدى هذا إلى تكوين القشرة الأولى، الذي أدى –من خلال عملية إعادة التدوير– إلى إعادة تكوين قشرة أكثر سمكاً اليوم.

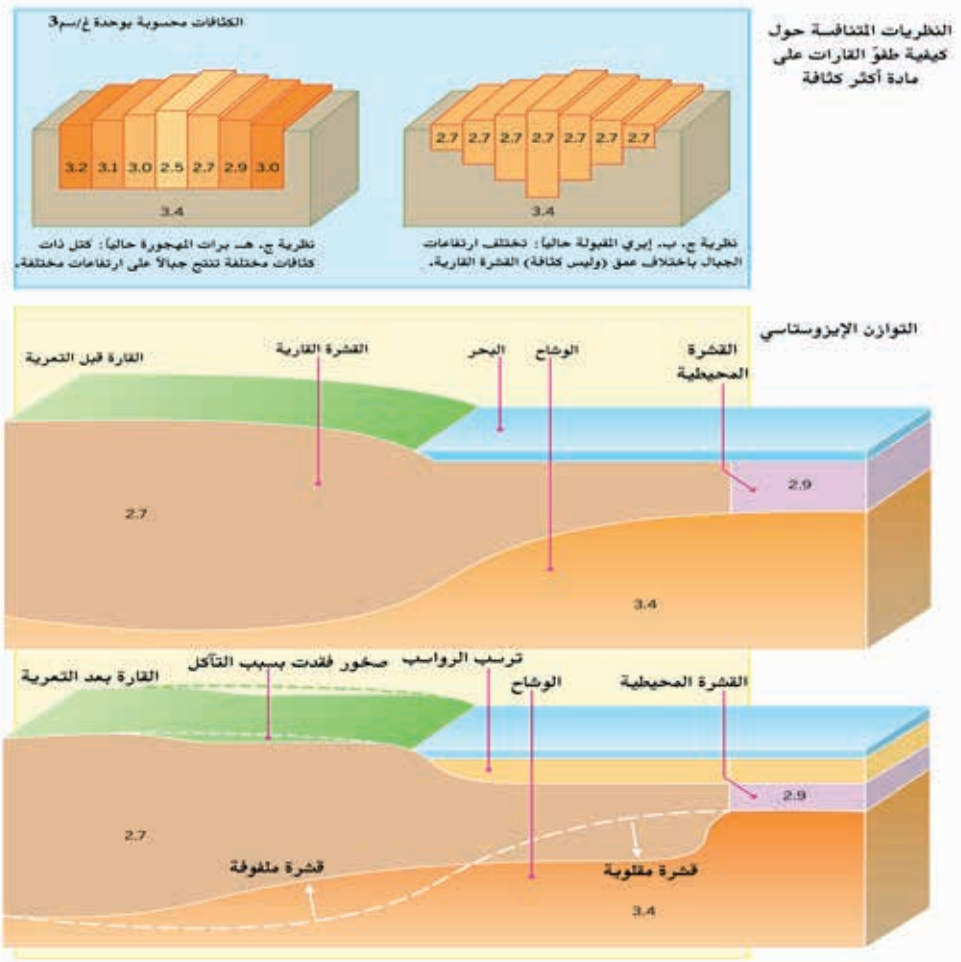
ومقارنةً مع طبقات الأرض الأخرى، فإنّ الغلاف الصخري عبارة عن قشرة صلبة وباردة نسبيّاً يبلغ متوسط سمكها نحو (100 كم)، ولكن قد يكون سمكها نحو (250 كم) أو أكثر تحت الأجزاء القديمة من القارات. لكن قد يختلف سمك القشرة الأرضية من مكانٍ إلى آخر، حيث يبلغ سمكها أكثر من 60 كم في بعض

المناطق الجبلية وأقل من 5 كيلومترات تحت بعض أجزاء المحيطات. بالمقارنة مع الوشاح، تحوي القشرة على قدر أكبر من السيليكون والألمنيوم وكمية أقل من المغنيسيوم والحديد. تكون قشرة الأرض عموماً أقل كثافة من الوشاح تحتها.

يفصل بين قشرة الأرض والطبقات الداخلية طبقة تسمى انقطاع موهوروفيتش (أو موهو) Moho Discontinuity، وهي طبقة تنعكس وتتكسر عندها الموجات الزلزالية بسرعة أعلى، ربما نتيجة لتغير في تكوين الصخور الكثيفة للوشاح تحتها.



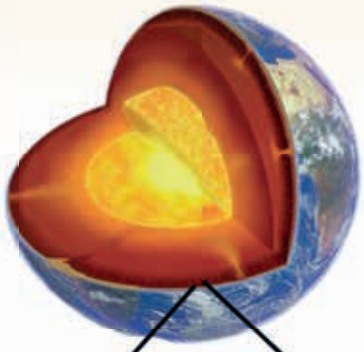
يصف مصطلح التوازن المتساوي السكون (الإيزوستاسي) Isostasy الاختلافات الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية بين الوشاح والقشرة التي تسمح للقشرة بأن (تطفو) على الوشاح الأكثر مرونة. ليست كل مناطق الأرض متوازنة بشكلٍ متساوي السكون. يعتمد التوازن المتساوي السكون على كثافة وسمك القشرة والقوى الديناميكية المؤثرة في الوشاح.



الإيزوستاسي هو حالة توازن القشرة الأرضية التي تطفو على المادة الأكثر كثافة في الوشاح. (الأرقام داخل الشكل تشير إلى الكثافة بوحدة غرام/ سم^3).

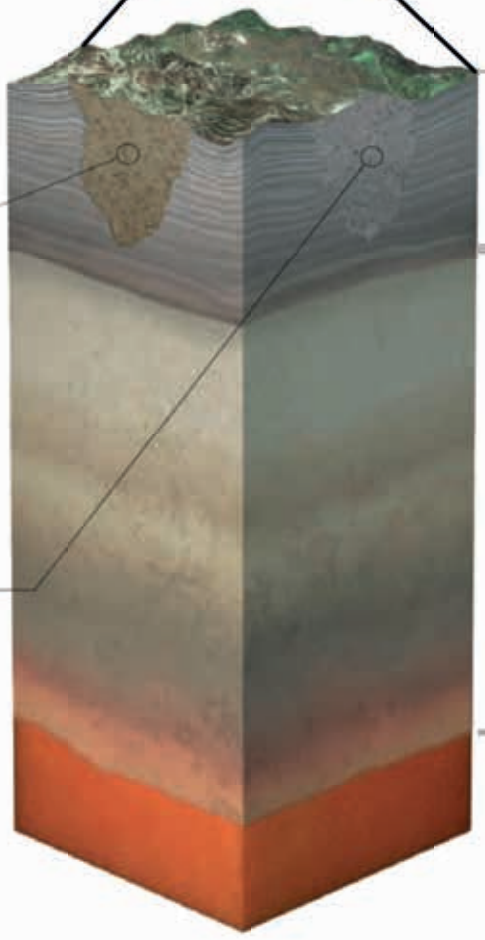
كما يختلف عمق القشرة، تختلف درجة حرارتها أيضاً. حيث تتحمل القشرة العلوية درجة الحرارة المحيطة للغلاف الجوي أو المحيط، فهي حارة في الصحاري القاحلة ومتجمدة في خنادق المحيط. بالقُرْب من انقطاع موهو، تتراوح درجة حرارة القشرة بين 200 درجة مئوية و 400 درجة مئوية.

إنّ القشرة القارية أقدم بكثير من القشرة المحيطية، نظراً لأن القشرة القارية نادراً ما يجري تدميرها وإعادة تدويرها في منطقة الاندساس Subduction، كما أنّ بعض أجزاء القشرة القارية تكون قديمة قدم الأرض نفسها تقريباً. إذْ لا توجد قشرة محيطية يزيد عمرها على 200 مليون سنة، في حين أن بعض الصخور القارية عمرها أكثر من 4 بلايين سنة.



الجرانيت
صخرة نارية جوفية مشتركة، وقد عثر على الجرانيت داخل القشرة القارية.

الديوريت
تتشكل هذه الصخرة الرمادية الداكنة بشكل شائع حيث تصطدم صفيحتان تكتونستان.



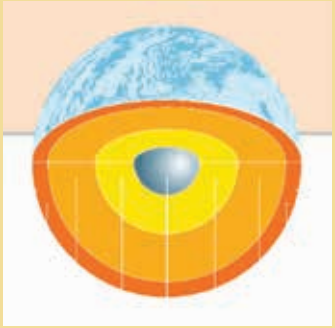
تتكون القشرة القارية من مجموعة متنوعة من أنواع الصخور

انقطاع موهـــو

تتكون الطبقة العلوية من الوشاح بشكل أساســي من حجـــر البيروديت البركاني خشن الحبيبـــات

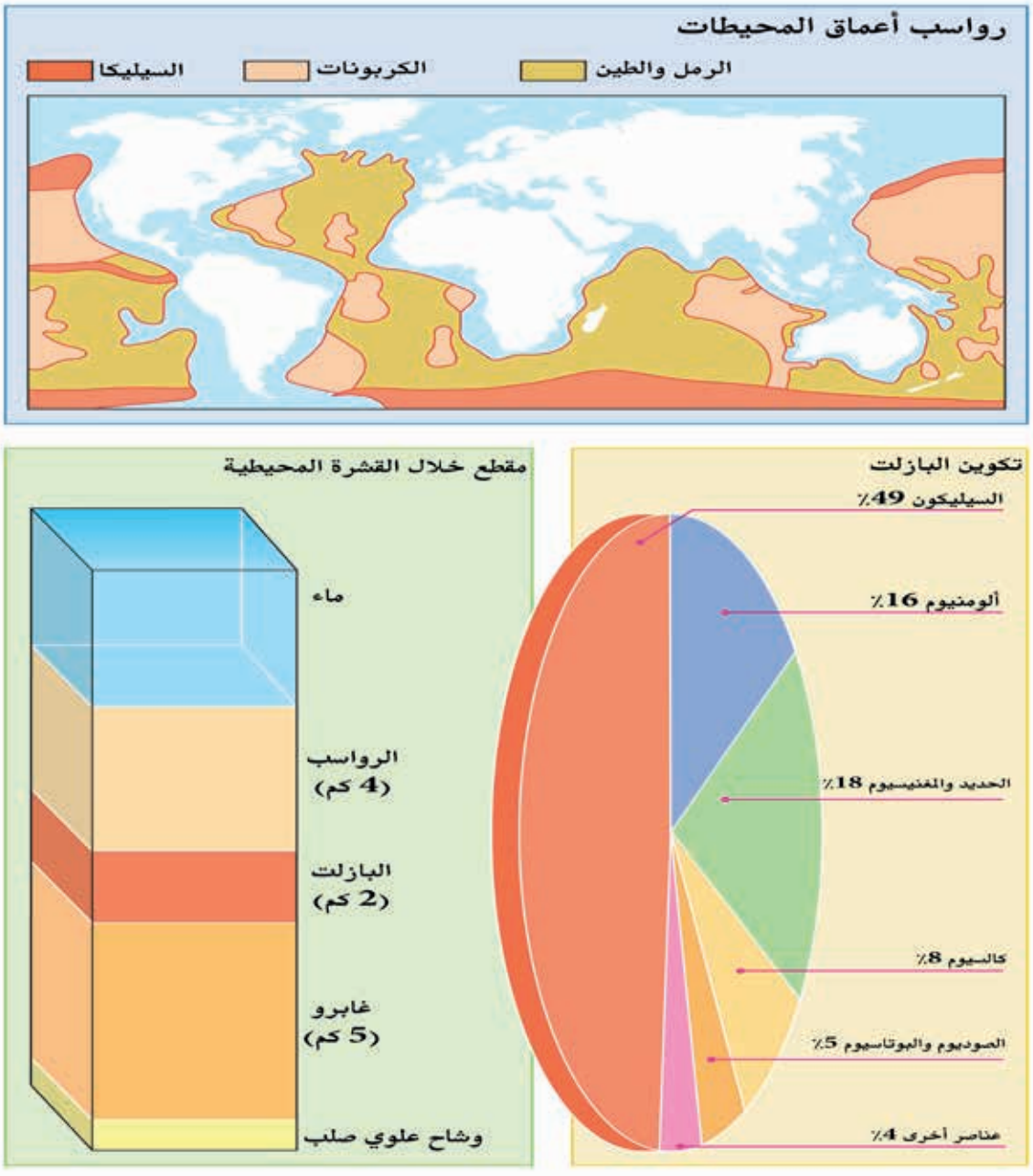
الغلاف الموري طبقة حارة قابلة للتشوه من الوشاح العلوي أسفل الغلاف الصخري مباشرة

الغلاف الصخري القاري

حقائق علمية مدهشة	قشـــــرة الأرض والأظـــافـــــر
	تتحرك قشرة الأرض بسرعة نمو أظافر يدك نفسها تقريباً، أي 3.47 ملليمتر كل شهر.

القشـــرة المحيطيـــة Oceanic Crust

تختلف القشرة القارية تماماً عن القشرة المحيطية التي تغلف المحيطات. حيث تتكون القشرة المحيطية في الغالب من سيليكات المغنيسيوم، بينما تحوي القارات على نسب أعلى من سيليكات الألومنيوم. كما أنها تحوي على كمية من الحديد أقل من النسب الأكثر كثافة من سيليكات الألومنيوم. كما أنها تحوي على كمية أقل من الحديد من المادة الأكثر كثافة في الوشاح أو قاع المحيط. ونتيجة لذلك، فإنها تطفو، وإن كان ذلك على الوشاح شبه الصلب، ويمكن أن تكون سميكة.



نسب مكونات القشرة المحيطية من المعادن والصخور.

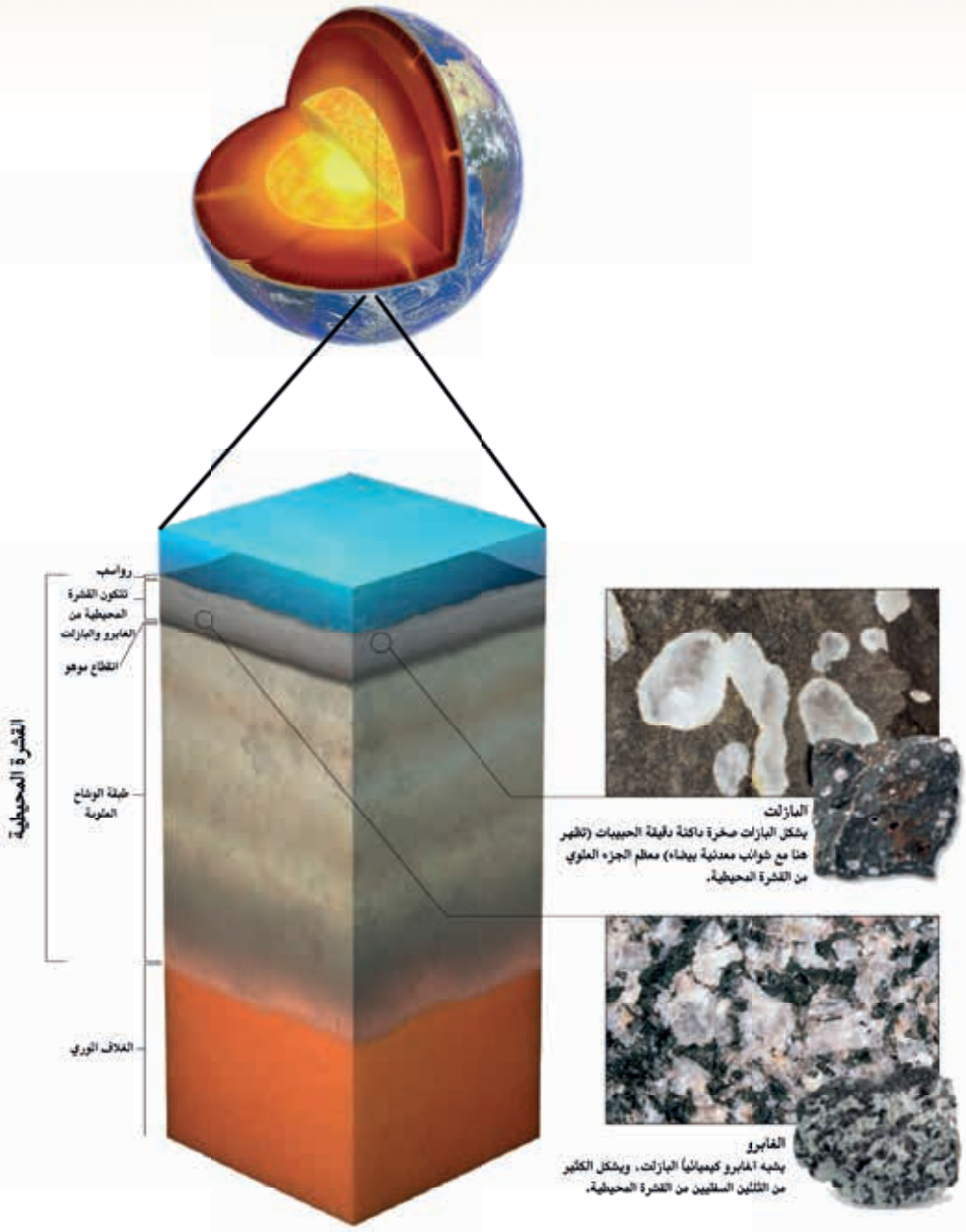
القشرة المحيطية متجانسة إلى حدٍ ما بسمك 7 كيلومترات. لكن لا يزال مدى عمق جذور القارات مثيراً للجدل؛ إذ يقول البعض إنّ سمكها يتراوح بين (6 و 11 كيلومتراً).

تتشكل القشرة المحيطية باستمرار عند تلال وسط المحيط، حيث تنفصل الصفائح التكتونية عن بعضها بعضاً. عندما تبرد الصهارة التي تخرج من هذه الصدوع في سطح الأرض، تصبح قشرة محيطية صغيرة. يزداد عمر وكثافة القشرة المحيطية مع زيادة المسافة من التلال وسط المحيط.

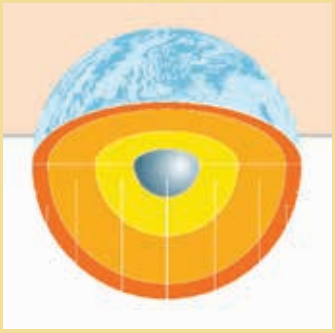
ومع تشكل القشرة المحيطية عند تلال وسط المحيط، يجري تدميرها في مناطق الاندساس: والاندساس هو العملية الجيولوجية المُهمَّة التي تذوب فيها الصفيحة التكتونية المصنوعة من مادة الغلاف الصخري الكثيفة، أو تسقط أسفل صفيحة مصنوعة من الغلاف الصخري الأقل كثافة عند حدود صفيحة متقاربة.

عند حدود الصفائح المتقاربة بين الغلاف الصخري القاري والمحيطي، فإن الغلاف الصخري المحيطي الكثيف (بما في ذلك القشرة) ينزل دائماً تحت القارات. في شمال غرب الولايات المتحدة، على سبيل المثال، تنحدر صفيحة خوان دي فوكا المحيطية أسفل صفيحة أمريكا الشمالية القارية. وعند الحدود المتقاربة بين صفيحتين تحملان الغلاف الصخري المحيطي، ينزلق الغلاف الأكثر كثافة (عادةً ما يكون حوض المحيط الأكبر والأعمق). ففي خندق اليابان، تنحدر صفيحة المحيط الهادئ الكثيفة تحت صفيحة أوخوتسك الأقل كثافة.

عندما ينغرس الغلاف الصخري، يغرق في الوشاح، ويصبح أكثر مرونة وقابلية للدك. من خلال الحمل الحراري في الوشاح، قد يحدث في نهاية المطاف (إعادة تدوير) للمعادن الغنية في الوشاح حيث تظهر على شكل حمم بركانية تصنع القشرة عند التلال والبراكين في منتصف المحيط


رواسب
تتكون القشرة المحيطية من الغابرو والبازلت
القشاع موهو
القشرة المحيطية
طبقة الوشاح العلوية
الغلاف الوري
البازلت
بشكل البازلت صخرة داكنة دقيقة الحبيبات (تظهر هنا مع ذوائب معدنية بيضاء) معظم الجزء العلوي من القشرة المحيطية.
الغابرو
يشبه الغابرو كيميائياً البازلت، ويشكل الكثير من الثلثين السفليين من القشرة المحيطية.

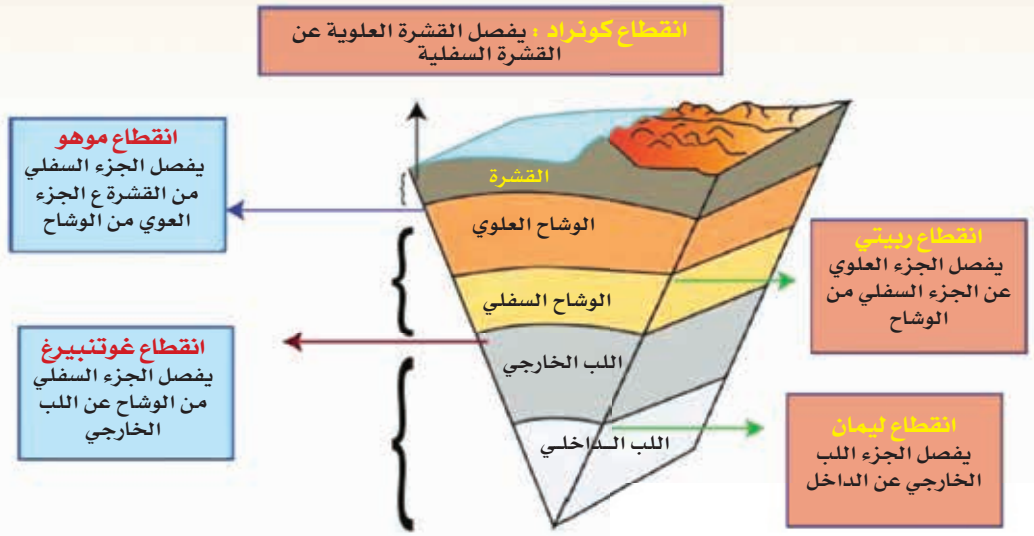
يجمع الجيولوجيون عينات من قشرة المحيطات من خلال الحفر في قاع المحيط، باستخدام الغواصات، ودراسة الأفيوليتات Ophiolites التي هي أجزاء من القشرة المحيطية جرى دفعها فوق مستوى سطح البحر من خلال النشاط التكتوني، والتي تظهر أحياناً على شكل سدود في القشرة القارية. غالباً ما يكون وصول العلماء إلى الأفيوليتات أكثر سهولة من القشرة المحيطية في قاع المحيط.

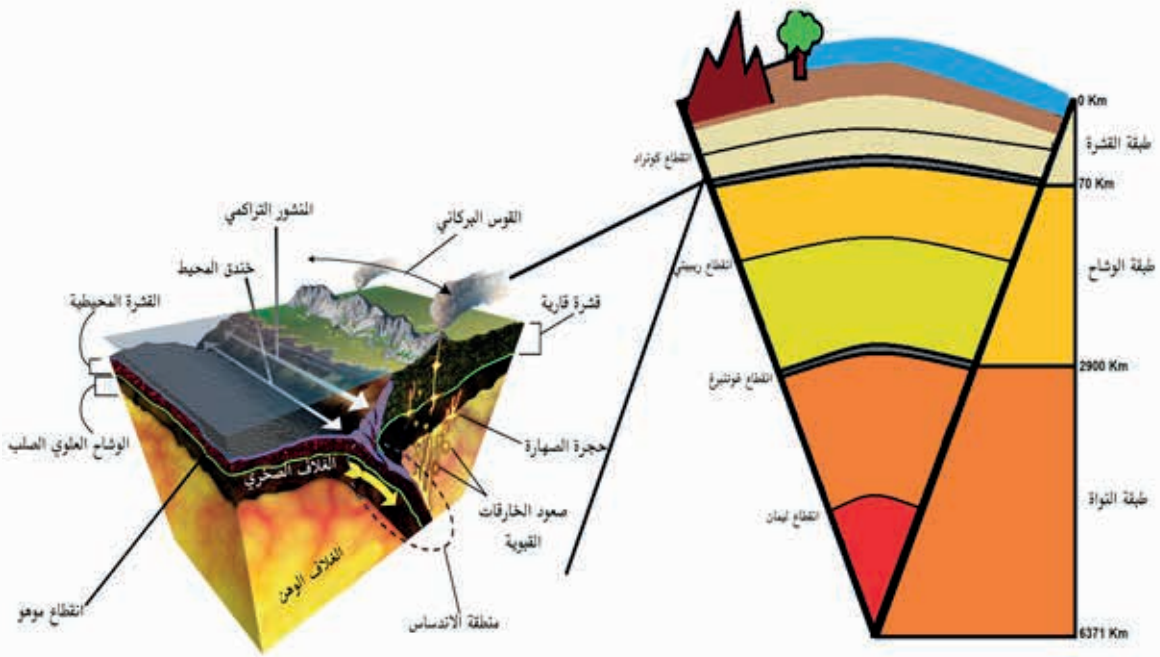
حقائق علمية مدهشة	قشـــــرة متجـــــددة
	تنشأ 10 كيلومترات مكعبة جديدة من القشرة المحيطية في مرتفعات منتصف المحيط كل عام.

الانقطاعـــــات داخـــــل الأرض

تنقسـم بنيـة الأرض إلـى أربعـة مكونـات رئيسـة القشـرة، والوشـاح، والنـواة الخارجيـة، والنـواة الداخليـة. تحـوي كل طبقـة علـى تركيبـة كيميائيـة فريـدة وحالـة فيزيائيـة يمكـن أن تؤثـر علـى الحيـاة علـى سـطح الأرض. تنفصـل كل مـن هـذه الطبقـــــات عـن بعضهـا بعضـــاً مـن خـلال مناطـــــق تسـمى مناطـــــق الانتقـــال Transition Zones أو الانقطاعات Discontinuities ويوجد داخل الأرض عدة انقطاعات أهمها:

1. **انقطاع كونراد** Conrad Discontinuity
2. **انقطاع موهو** Moho Discontinuity
3. **انقطاع 410 كم** 410 Km Discontinuity
4. **انقطاع 660 كم** 660 Km Discontinuity
5. **انقطاع ريبيتي** Repiti Discontinuity
6. **انقطاع غوتنبرغ** Gutenberg Discontinuity
7. **انقطاع ليمان** Lehman Discontinuity





مواقع الانقطاعات بين القشرة الأرضية والنواة الداخلية

في الواقع تُستخدم كلمة (انقطاع Discontinuity) في الجيولوجيا للإشارة إلى السطح الذي تتغير فيه سرعة الموجات الزلزالية. ومعظم الانقطاعات سُميت على أسماء العلماء المكتشفين لها، وسنتكلم عن هذه الانقطاعات بالتفصيل فيما يأتي:

انقطـــــاع كونـــــراد

يفصل هذا الانقطاع القشرة العلوية (الجرانيتية) عن القشرة السفلية (البازلتية). يتوافق انقطاع كونراد مع الحدود شبه الأفقية في القشرة القارية التي تزداد فيها سرعة الموجة الزلزالية بطريقة متقطعة. لوحظت هذه الحدود في مناطق قارية مختلفة على عمق 15 إلى 20 كم، ومع ذلك فهي غير موجودة في المناطق المحيطية. عند المرور عبر انقطاع كونراد، تزداد سرعة الموجات الزلزالية الطولية بشكل مفاجئ من نحو 6 إلى 6.5 كم / ثانية.

انقطـــــاع موهـــــو

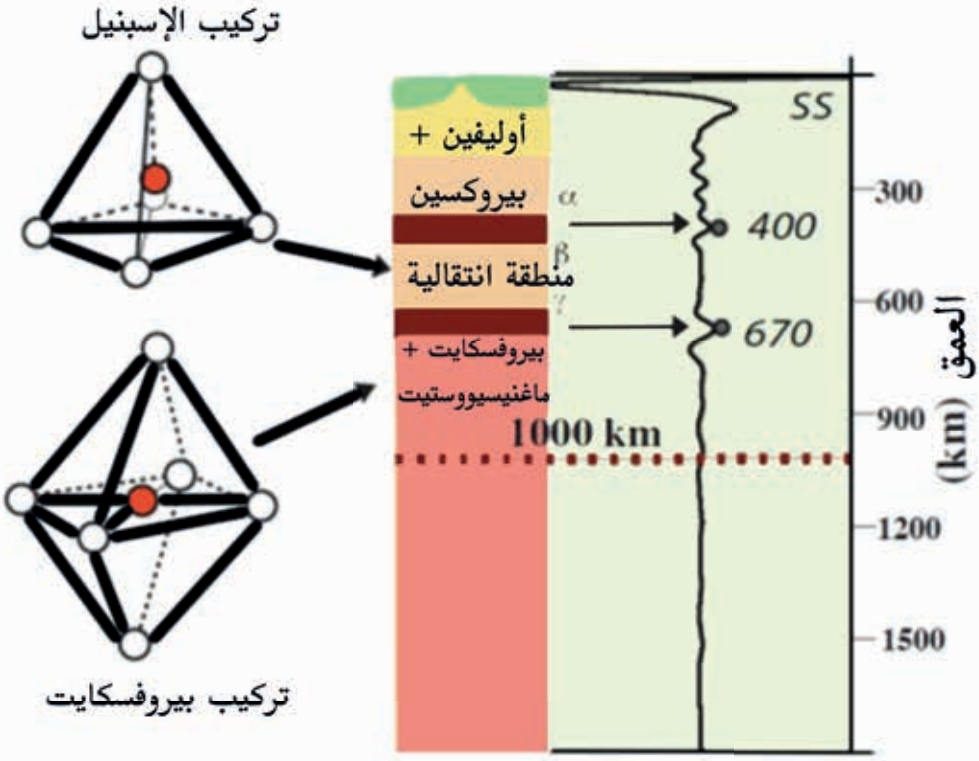
لاحظ عالم الجيوفيزياء موهورفيتش Mohorvicic عام 1909م ازدياد سرعة الموجات الزلزالية وتغير الصفات المميزة لها عند انتقالها من الجزء السفلي لطبقة القشرة الأرضية (وسط منخفض الكثافة) إلى الجزء العلوي من طبقة الوشاح (وسط عال الكثافة) مما يدل على أن هناك وسطاً ذا كثافة عالية وطبيعة غير صلبة تماماً يفصل بين طبقتي القشرة الأرضية والوشاح، وقد تم تسمية هذا الوسط باسم (Moho Discontinuity) تكريماً لهذا العالم. ويختلف

عمق هذا الوسط من مكان إلى آخر دلالة على اختلاف سمك القشرة الأرضية وكثافتها تحت القارات عنها تحت المحيطات. يقع هذا الانقطاع على عمق يتراوح بين 30 و60 كم وذو أهمية خاصة في تفسير السجلات الزلزالية على مسافات مركزية قصيرة تصل إلى بضع مئات من الكيلومترات.

انقطاعي المنطقة الانتقالية في الوشاح (عند 410 كم و 660 كم)

تقع المنطقة الانتقالية (MTZ) بين الوشاحين العلوي والسفلي بين عمق 410 كم و 660 كم، وتعتبر البنية الزلزالية للمنطقة الانتقالية مهمة لفهم البنية الحرارية للوشاح العلوي ونماذج ديناميكية باطن الأرض. تفسّر الانقطاعات البالغة عند 410 كم و 660 كم على أنها انتقالات طور معدني.

- عند انقطاع 410 كم يكون التغير في الطور موجباً ناتجاً عن تغير الضغط من معدن الأولوفين–أو البيروكسين Mg_2SiO_4 إلى سبينل.
- عند انقطاع 660 كم فان تغير الطـــــــور المعدني من سبينل إلى بيـــروفسكايت و ماغنيسيووستيت يصير سالباً على منحنى كلابيرون، ويعتبر هذا التفاعل ماصاً للحرارة ويحدث قفزة في اللزوجة ويمكن ملاحظة ذلك من خلال انعكاس وانكسار الموجات الزلزالية علاوة على تغير درجة الحرارة والكثافة مع العمق. سيؤدي هذا التغير في الطور إلى ارتفاع عند 410 كم وانخفاض عند 660 كم في المناطق ذات درجات الحرارة المنخفضة مثل تلك المرتبطة بألواح المحيطات المنحدرة.



الانقطاعان في المنطقة الانتقالية من الوشاح عند 410 كم و 660 كم.

انقطـــــاع ريبيتـــــي

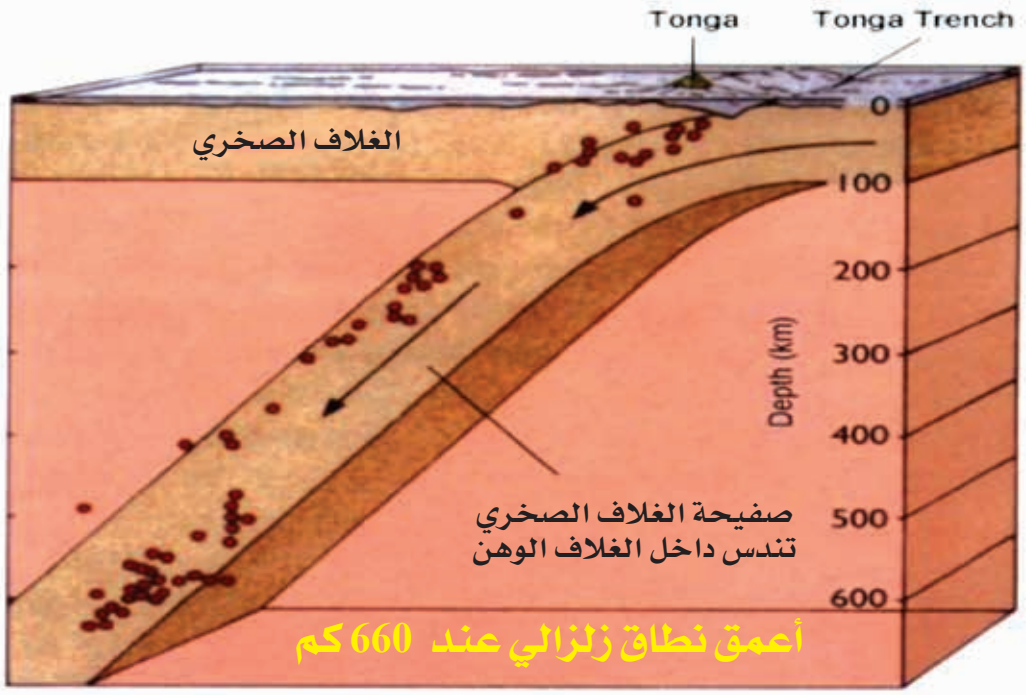
يقسـم الوشـاح العلـوي عـن السـفلي، ويتـراوح عمقهـا بـين 660 و 700 كـم تقريبـاً. مـروراً بهـذا الانقطـاع، تزيـد الموجـات الزلزاليـة مـن سـرعتها. يكـون الوشـاح السفلي أكثر سخونة وتسييلاً بينما يكون الجزء العلوي أكثر برودة وعجيناً.

تشـير الدراسـات الزلزاليـة ببيانـات قصيـرة المـدة إلـى أن المنطقـة الانتقاليـة لهـا سـمك صغيـر نسـبياً (نحـو 10 كـم). لا يـزال سـبب انقطـــاع ريبيتـي غيـر واضـح وظهـوره حتـى الوقـت الحالـي فقـط مـن خـلال عـدد قليـل نسـبيّاً مـن الملاحظـات المشـــغولة. وقـد عثـــر علـى مثـــل هـذا الانقطـــاع خـــارج منطقـــة الاندساس Subduction. لذلك يُفترض إمكان أن يكون انقطاعاً عالميّاً.

منطقـــة وأداتي بينوف Wadati – Benioff

تحدث أكثر الزلازل وأقواها على امتداد انزلاق الصفائح تحت بعضها البعض مناطق Benioff هي مناطق غمس، مناطق مستوية تقريباً من نشاط زلزال متزايد ناتج عن تفاعل صفيحة قشرة محيطية متجهة إلى أسفل مع صفيحة قارية أو محيطية سائدة. تحدث عند حدود الصفائح القشرية تسمى مناطق الاندساس. يمكن أن تحدث الزلازل عن طريق الانزلاق على طول صدع دفع الاندساس أو عن طريق الانزلاق داخل الصفيحة الهابطة، نتيجة الانحناء والتمدد حيث يتم سحب الصفيحة في الوشاح. تتراوح الانخفاضات في المناطق عادةً بين 40 و60 درجة. تُعرف هذه المناطق أيضاً باسم (منطقة Wadati–Benioff)؛ تيمناً بالعالم الأمريكي Benioff والعالم الياباني Wadati اللذين تعرفا على هذا النطاق. تأتي أعمق الزلازل المسجلة إلى أعماق تصل إلى 660 كم بحد أقصى.

تم العثور على مناطق Benioff في مناطق الاندساس التي تتشكل عن طريق اصطدام صفيحتين من القشرة الأرضية بكثافة وسمك متباينين، على سبيل المثال الصفيحة المحيطية والقارية. يتم دفع القشرة الأثقل (الرقيقة) للصفيحة المحيطية أو تنغمس تحت القشرة الأخف والأكثر سمكاً للصفيحة القارية. ينتج خندق عميق في المحيط حيث تلتقي هاتان الصفيحتان. على طول خندق بيرو-تشيلي، يتم غرس صفيحة المحيط الهادئ تحت صفيحة أمريكا الجنوبية، التي تستجيب عن طريق الانهيار لتشكيل جبال الأنديز.



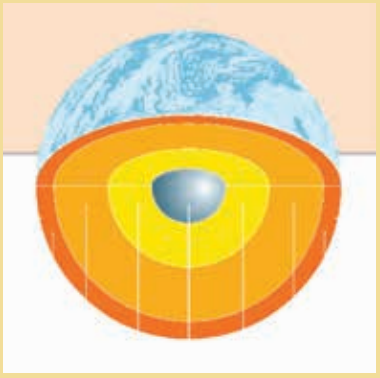
نطاق Wadati – Benioff الواقعة في مناطق الاندساس

انقطـــــاع غـــوتنبـــــــرغ

تم اكتشاف الدليل على هذا الانقطاع عند عمق 2900 كم تقريباً من قبل Wiechert و Oldham في عام 1906، ولكن تم التحديد الصحيح وتحديد عمق هذا الانقطاع بواسطة Gutenberg (1914)، ومن ثم سمي بانقطاع غـــوتنبرغ Gutenberg ويقع عند الحد الفاصل بين الوشاح واللب الخارجي (CMB). عند هذا الانقطاع يوجد تغير مفاجئ في الموجات الزلزالية التي تنتقل عبر الأرض. حيث تنخفض سرعة الموجات الزلزالية الأولية (موجات P) بينما تختفي الموجات الزلزالية الثانوية (موجات S) تماماً. أثبت الانقطاع أنه تحت هذه الطبقة، يجب أن يكون باطن الأرض سائلاً، وفوق هذه الطبقة، سيكون باطن الأرض صلباً. في الواقع، اللب الخارجي، الذي يقع تحت انقطاع غوتنبرغ، سائل بكثافة أعلى بكثير من الوشاح. يحتوي على كميات عالية من الحديد. فوق انقطاع غوتنبرغ يقع الوشاح السفلي، وهو صلب بطبيعته لكنه أقل كثافة من اللب الخارجي. تعد حدود الوشاح الأساسي، أو CMB، حاجزاً مميزاً بين اللب والغطاء الذي تم تحديده من خلال الاختلاف في الموجات الزلزالية عند هذا المستوى. إنها منطقة ضيقة وغير منتظمة مع تموجات يصل عرضها إلى 5–8 كيلومترات. يؤثر نشاط الحمل الحراري داخل الوشاح العلوي على هذه التموجات، التي يمكن أن تكون العامل الدافع وراء حركة الصفائح التكتونية – حركة أجزاء من الغلاف الهش للأرض.

انقطـــاع ليمـــان

تمثل منطقة الانتقال بين اللب الخارجي والداخلي. انقطاع ليمان هو زيادة مفاجئة في سرعات الموجة P و S على عمق 220 ± 30 كم، اكتشفتها عالمة الزلازل إنجي ليمان، وهي تظهر تحت القارات، ولكن ليس عادةً تحت المحيطات، ولا تظهر بسهولة في المتوسط العالمي.

حقائـــق علميـــة مدهشـــة	يوجـد من هو أكـبر من الأرض
	إن شمسنا ضخمة لدرجة أنها أكبر بمليون مرة من الأرض! وبالتالي أثقل منها بما يعادل 330000 مرة!

الـــوشـــــاح Mantle

يمثل الوشاح الجزء الأكثر صلابة من باطن الأرض. لكن هذا الوشاح الأرضي يقع بين نواة الأرض (اللب) شديدة الحرارة والقشرة الأرضية. يبلغ سمك الوشاح نحو 2900 كيلومتر، ويشكل 84 % من الحجم الإجمالي للأرض، فهو أكبر طبقة تقع مباشرة فوق النواة الخارجية. يتكون الوشاح في الغالب من عناصر السيليكون والأكسجين والمغنيسيوم والحديد. وغالباً ما يقسّم الوشاح إلى جزء علوي وجزء سفلي بناءً على سرعة الموجة الزلزالية المتغيرة. ينقسم الوشاح إلى عدة طبقات: الوشاح العلوي، ومنطقة الانتقال، والوشاح السفلي، وأخيراً المنطقة (D″)، وهي المنطقة الغريبة التي يلتقي فيها الوشاح السفلي بالنواة الخارجية. سنتعرف فيما يأتي وبشكلٍ مفصل على هذه الطبقات.

الوشـــــاح العلـــــوي

يمتد الوشاح العلوي من الحد السفلي للقشرة الأرضية إلى عمق نحو 410 كيلومترات. يكون الوشاح العلوي صلباً في الغالب، لكن مناطقه الأكثر مرونة تساهم في النشاط التكتوني ويدخل في نطاقه الغلاف الصلب والغلاف الوهن.

الغـــــلاف المـــوري (الغـــلاف الوهـــن) Asthenosphere

اشتق اسم الأسثينوسفير من الكلمة اليونانية التي تعني ضعيفاً، الأسثيس، بسبب الطبيعة الهشة نسبياً للمواد التي صنع منها. تم تسميته لأول مرة في عام 1914 من قبل الجيولوجي البريطاني جيه باريل، الذي قسم الهيكل العام للأرض إلى ثلاثة أقسام رئيسة: الغلاف الصخري، أو الطبقة الخارجية من مادة تشبه الصخور؛ الأسثينوسفير والكرة المركزية، أو الجزء المركزي من الكوكب.

يُعتقد أن الجزء العلوي من الغلاف الموري هو المنطقة التي تتحرك عليها ألواح الغلاف الصخري الصلبة والهشَّة من قشرة الأرض. يقع الغلاف الموري بشكل عام بين 72–250 كم تحت سطح الأرض، على الرغم من أنه عادة ما يكون أقرب بكثير من السطح تحت المحيطات، وفي وسط المحيط ترتفع التلال إلى مسافة أميال قليلة من قاع المحيط

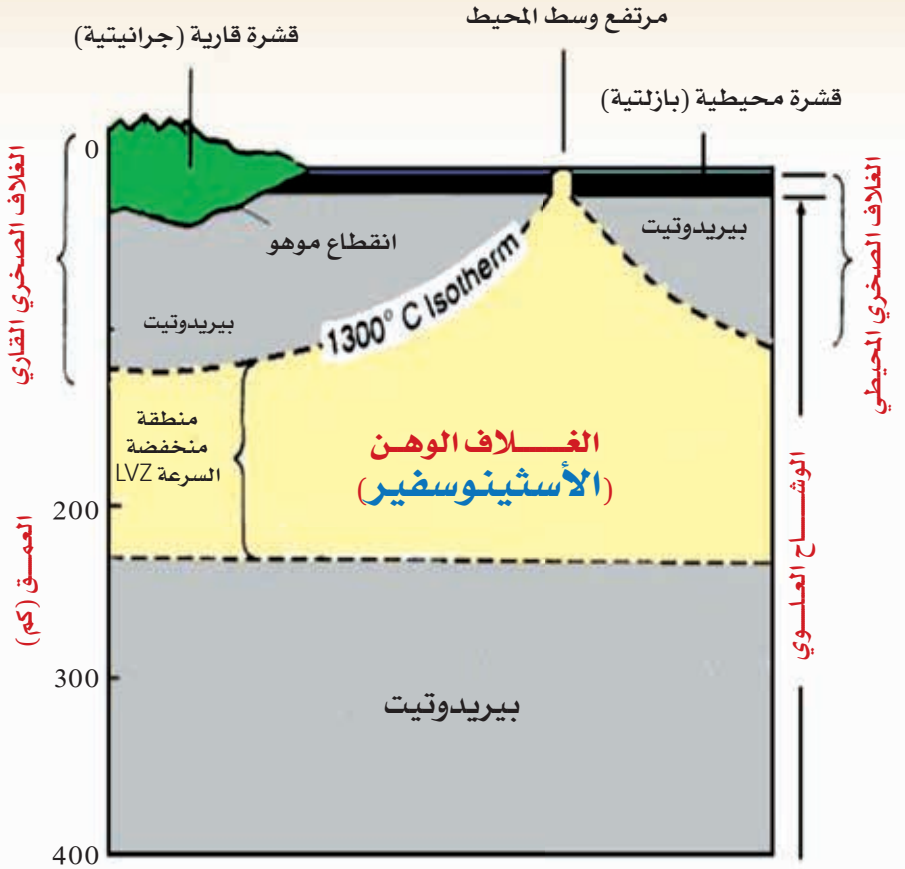
يشير مصطلح الغلاف الوهن إلى طبقة شبه سائلة تحت الغلاف الصخري (داخل الوشاح العلوي)، وتقع تحت الغلاف الصخري الخارجي الصلب (القشرة المحيطية والقارية) التي تشكل جزءاً من الوشاح. مع صلابة الغلاف الموري، إلا أنه شديد الحرارة ويُعتقد أنه قادر على التدفق عموديّاً وأفقيّاً، مما يتيح لأجزاء من الغلاف الصخري الخضوع للحركات المرتبطة بالصفائح التكتونية.

يستخدم الجيولوجيون مصطلح (اللدونة) Plastics لوصف كيف يمكن للمواد الصلبة الساخنة، بما في ذلك الصخور، أن تتشوه وتتدفق ببطء بدلاً من أن تنكسر تحت الضغط. يكاد يكون الغلاف الوهن (الموري) صلباً، على الرغم من أن بعض مناطقه يمكن أن تكون منصهرة (على سبيل المثال، أسفل تلال منتصف المحيط). لم يتم تحديد الحد السفلي من الغلاف الموري بشكل جيد. يعتمد سمك الغلاف الموري بشكل أساسي على درجة الحرارة. في بعض المناطق، يمكن أن يمتد الغلاف الموري إلى عمق 700 كيلومتر.

الغلاف الصخري (الليثوسفير) Lithosphere

الغلاف الصخري (الليثوسفير) يمثل الطبقة الخارجية الصلبة لمعظم الأرض و هو غلاف صلب وبارد نسبياً و يتكون من القشرة والأعلى من 80 إلى 100 كيلومتر من الوشاح و يبلغ سمكه حوالي 200 كيلومتر (تحت القشرة القارية) ويتكسر في الصفائح التكتونية. الغلاف الصخري الليثوسفير هو (صفيحة) نظرية الصفائح التكتونية. تتميز قاعدة الليثوسفير بمنطقة زلزالية (منخفضة السرعة) حيث تتباطأ الموجات الزلزالية عند دخولها الغلاف الأستينوسفير البلاستيكي الدافئ.

يُعد Asthenosphere (الغلاف الوهن) جزءاً من الوشاح الذي يتدفق، وهي خاصية تسمى السلوك البلاستيكي. قد يبدو غريباً أن مادة صلبة يمكن أن تتدفق. يعد تدفق الغلاف الأستثيني جزءاً من الحمل الحراري في الوشاح، الذي يلعب دوراً مُهمّاً في تحريك ألواح الغلاف الصخري. غلاف Asthenosphere هو الجزء البلاستيكي الدافئ نسبياً (ربما المنصهر جزئيّاً) من الوشاح العلوي الذي يمتد من عمق 10 كم (في حواف منتصف المحيط) إلى 700 كم تقريباً.

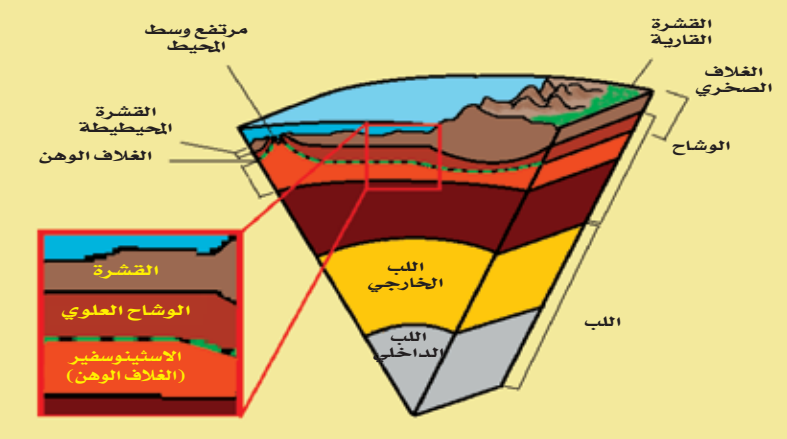


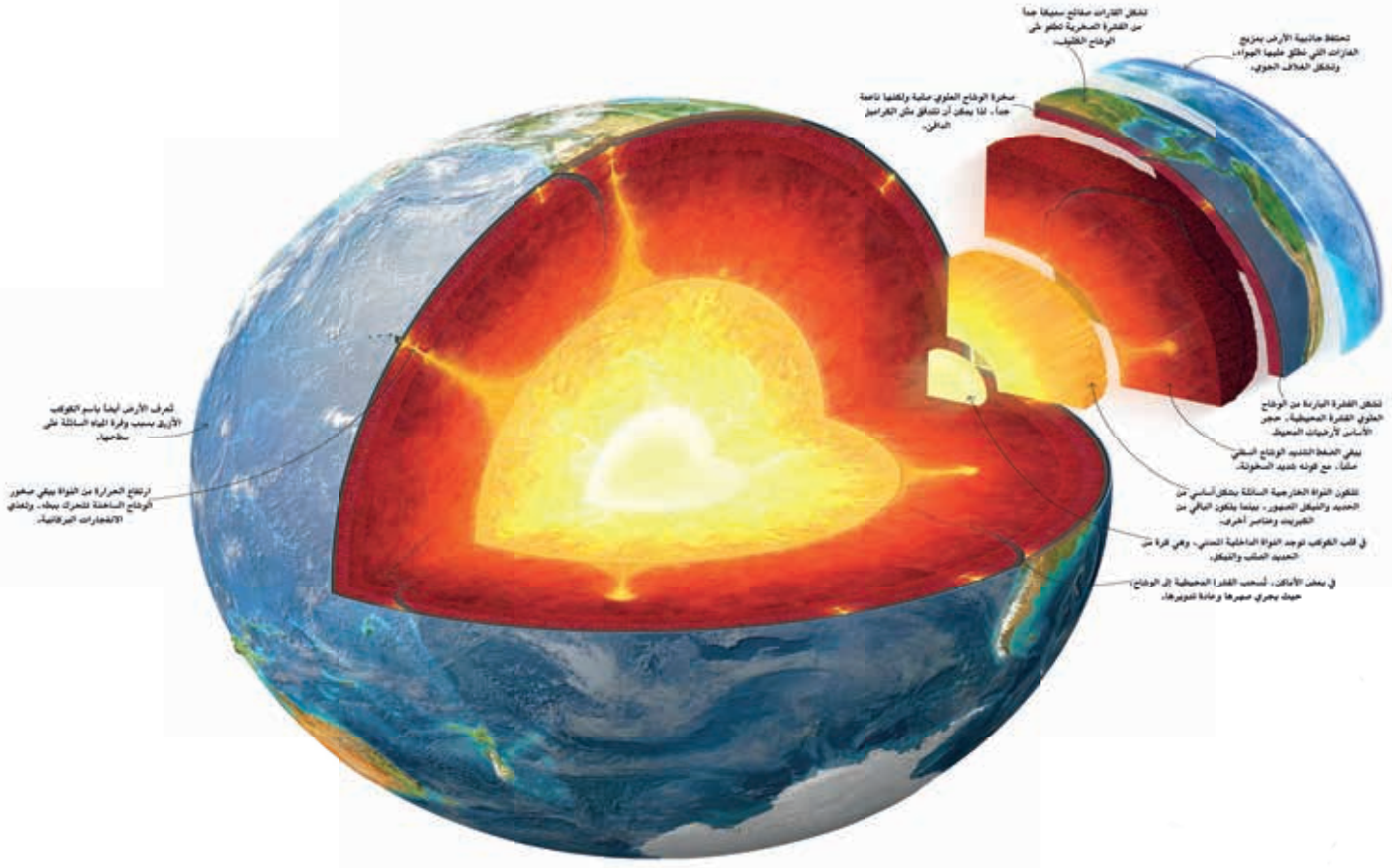
الحد الفاصل بين الغلافين الصخري والوهن LAB

يشار عادة إلى حدود الغلافين الصخري والوهن باسم LAB. على الرغم من الاشتباه في وجودها في وقت مبكر من عام 1926، تم تأكيد حدوث المنطقة البلاستيكية في جميع أنحاء العالم من خلال تحليلات موجات الزلزال من زلزال تشيلي في 22 مايو 1960. الموجات الزلزالية، التي تقل سرعتها مع نعومة الوسط، مرت ببطء نسبيًا على الرغم من الغلاف الموري، وبالتالي تم تسميتها منطقة السرعة المنخفضة LVZ، أو دليل الموجات الزلزالية. قد تكون زلازل المنطقة العميقة، أي تلك التي تحدث في الغلاف الموري أو تحته، ناتجة عن غرق الصفائح القشرية في الوشاح على طول حدود القشرة الأرضية المتقاربة.

LAB هـو الطبقـة الحدوديـة الميكانيكيـة التـي تفصـل الغـلاف الخارجـي الصلـب لـلأرض عـن الوشـاح المشـوه بشـكل لـزج، وبالتالـي يتـم تحديـده مـن خـلال الزيـادة المفاجئـة في معـدل الإجهـاد. أنـه طبقـة انتقاليـة في قاعـدة طبقـة الحـدود الحراريـة التـي تفصـل الغطـاء الموصـل أعـلاه عـن عبـاءة الحمـل الحـراري أدنـاه حيـث تكـون درجـة الحـرارة ثابتـة. يحـدد علمـاء الـزلازل LAB مـن خـلال وجـود منطقـة سـرعة منخفضـة للموجـة S أسـفل غطـاء السـرعة العاليـة. عـلاوة علـى ذلـك، تم العثـور علـى تغييـر في تبايـن الخـواص الزلزاليـة في الوشـاح العلـوي لتقليـد LAB. نظـراً لأن الغـلاف الصخـري الصلـب يجـب أن يكـون مقاومـاً كهربائيّـاً بينمـا يجـب أن يكـون الغـلاف المـوري اللـزج موصـلاً، فـإن الحـد الفاصـل بـين طبقـة المقاومـة العاليـة فـوق طبقـة الميزوسـفير ذات المقاومـة المنخفضـة يتـم تفسـيرها علـى أنهـا LAB. غالبـاً مـا يُنظـر إليـه علـى أنـه انقطـاع بنيـوي مـن الدرجـة الأولـى يسـمح بالحركـة التفاضليـة بـين الصفائـح التكتونيـة والغطـاء السـفلي.

يعـد رسـم خرائـط عمـق حـدود الغـلاف الصخـري والأسـثينوسـفير LAB أمـراً مُهمّـاً، نظـراً لأنـه يمثـل قيـداً أساسـيّاً في نمـاذج تكويـن وتطـور المناطـق المحيطيـة والقريبـة. تعتمـد النمـاذج التفصيليـة للحمـل الحـراري في الوشـاح علـى المعرفـة الدقيقـة لتغيـرات العمـق في حـدود الغـلاف الجـوي والأسـثينوسـفير. في المناطـق المحيطيـة، غالبـاً مـا يتـم تفسـير الاختلافـات الكبيـرة في تدفـق الحـرارة وقيـاس الأعمـاق علـى أنهـا مؤشـر علـى الزيـادة المنهجيـة في عمـق حـدود الغـلاف الصخـري والغـلاف المـوري مـع المسـافة مـن مراكـز الانتشـار. في المناطـق القاريـة، يبـدو أن جـذور الغـلاف الصخـري السـميكة تظهـر اختلافـات كبيـرة في السـماكة، ومـن المرجـح أن تمثـل المناطـق التـي توجـد بهـا الصفائـح بقـوة. مقترنـاً بتدفـق الوشـاح.


مرتفع وسط المحيط
القشرة القارية
الغلاف الصخري
القشرة المحيطية
الغلاف الوهن
الوشاح
القشرة
الوشاح العلوي
الأسثينوسفير (الغلاف الوهن)
اللب الخارجي
اللب الداخلي
اللب

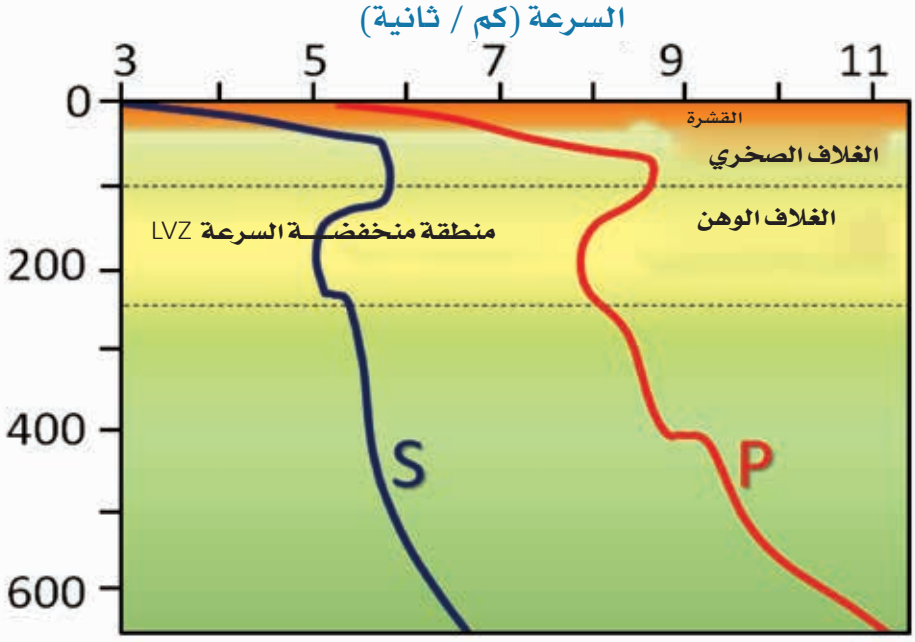


منطقة السرعة المنخفضة (LVZ)

المنطقة الواقعة داخل الوشاح العلوي تحت المحيطات التي يتم فيها إبطاء الموجات الزلزالية P وتباطؤ الموجات S وامتصاصها جزئيّاً. يبلغ عمق الجزء العلوي من المنطقة حوالي 40–60 كم بالقُرب من التلال المحيطية الممتدة، ويزداد هذا العمق إلى 120–160 كم تحت القشرة المحيطية الأقدم. الجزء السفلي من المنطقة غير محدد بشكل جيد، ولكن في منطقة يتراوح عمقها بين 250 و 300 كيلومتر. تحت القارات، توجد منطقة منخفضة السرعة مقيدة تحت مناطق القشرة المعرضة للتكوين خلال الـ 600 مليون سنة الماضية أو نحو ذلك، ولكن لا توجد تحت مناطق Cratonic. يُعزى إلى وجود طور سائل بنسبة 0.1 % ويُعزى عادةً إلى الذوبان الجزئي لصخور الوشاح في هذه الأعماق. غالباً ما يُعتبر متزامناً مع الغلاف الموري (الوهن)، ولكن من المحتمل أن يكون هذا صالحاً فقط للمناطق المحيطية.

تتميز منطقة السرعة المنخفضة بسرعات زلزالية منخفضة وتوهين زلزالي عالي وموصلية كهربائية عالية. تكون التأثيرات الزلزالية أكثر وضوحاً بالنسبة للموجات S مقارنة بالموجات P. يمكن أن تنشأ السرعات الزلزالية المنخفضة من عدد من الآليات المختلفة، بما في ذلك درجة حرارة عالية بشكل غير طبيعي، وتغير في الطور، وتغير تركيبي، ووجود تشققات أو شقوق مفتوحة، وذوبان جزئي. ومن المقبول عموماً أن السرعات الزلزالية المنخفضة تنشأ بسبب وجود مادة منصهرة. من المحتمل أن يحدث الذوبان في هذه المنطقة مدعوم بحقيقة أنه في هذا المستوى تقترب مادة الوشاح من نقطة انصهارها.

تعتبر منطقة السرعة المنخفضة للوشاح ذات أهمية كبيرة لتكتونية الصفائح؛ لأنها تمثل طبقة منخفضة اللزوجة يمكن على طولها استيعاب الحركات النسبية للغلاف الصخري والغلاف الموري.



المنطقـــــة الانتقاليـــــة Transition Zone

من نحو 410 كيلومترات إلى 660 كيلومتراً تحت سطح الأرض، تخضع الصخور لتحولات جذرية، هذه هي المنطقة الانتقالية Transition Zone للوشاح. في المنطقة الانتقالية، لا تذوب الصخور ولا تتفكك، وإنما يتغير هيكلها البلَّوري بطرائق مهمة. تصبح الصخور أكثر كثافة بكثير. تمنع منطقة الانتقال التبادلات الكبيرة للمواد بين الوشاح العلوي والسفلي. يعتقد بعض الجيولوجيين أن الكثافة المتزايدة للصخور في المنطقة الانتقالية تمنع الصفائح المنحدرة من الغلاف

الصخري من السقوط أكثر في الوشاح. تتوقف هذه القطع الضخمة من الصفائح التكتونية في المنطقة الانتقالية لملايين السنين قبل أن تختلط مع صخور الوشاح الأخرى وتعود في النهاية إلى الوشاح العلوي كجزء من الغلاف الموري، وتندلع كحمم بركانية، وتصبح جزءاً من الغلاف الصخري، أو تظهر كقشرة محيطية جديدة في مواقع انتشار قاع البحر.

ومع ذلك، يعتقد بعض الجيولوجيين وعلماء الريولوجيا (علم جريان المواد غير العادية Rheologia) أن الصفائح المنقسمة يمكن أن تنزلق من تحت المنطقة الانتقالية إلى الوشاح السفلي. تشير أدلة أخرى إلى أن الطبقة الانتقالية قابلة للاختراق، وأن الوشاح العلوي والسفلي يتبادلان قدراً من المواد.

ربما يكون أهم جانب في المنطقة الانتقالية للوشاح هو وفرة المياه فيها. إذ تحوي البلّورات في المنطقة الانتقالية على قدر من الماء يعادل جميع المحيطات على سطح الأرض.

لكن الماء في المنطقة الانتقالية ليس (ماءً) كما نعرفه. إنه ليس سائلاً أو بخاراً أو صلباً أو حتى بلازما، وإنما يوجد على شكل هيدروكسيد متحد مع المواد. والهيدروكسيد هو أيون من الهيدروجين والأكسجين بشحنة سالبة. في منطقة الانتقال، تحتجز أيونات الهيدروكسيد في التركيب البلّوري للصخور مثل الرينغووايت والوادسلايت. تتشكل هذه المعادن من الزبرجد الزيتوني عند درجات حرارة وضغط مرتفعين جداً.

بالقُرْب من الجزء السفلي من المنطقة الانتقالية، تؤدي زيادة درجة الحرارة والضغط إلى تحويل الرينغووايت والوادسلايت. تتكسر هياكلها البلّورية ويتسرب الهيدروكسيد وكأنه (يذوب). تتدفق الجزيئات الذائبة لأعلى باتجاه المعادن التي

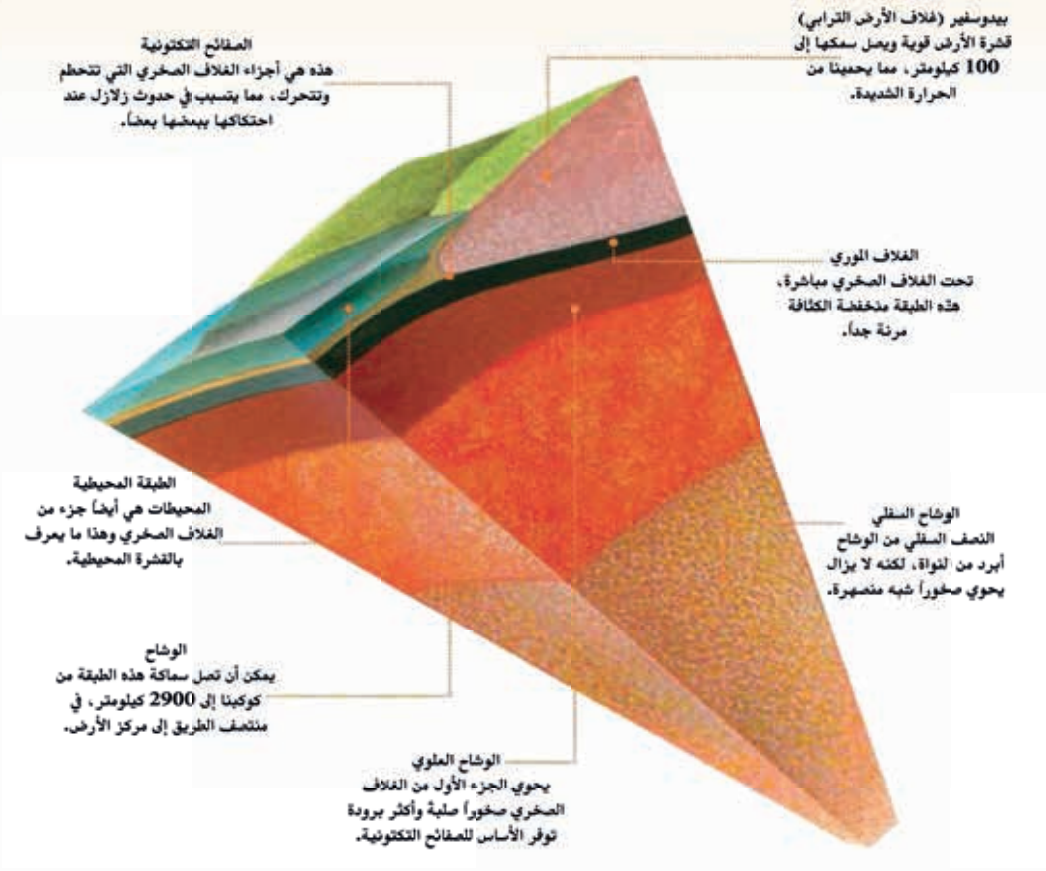
يمكنها الاحتفاظ بالمياه. هذا يسمح للمنطقة الانتقالية بالحفاظ على خزان ثابت للمياه.

يعتقد الجيولوجيون وعلماء الريولوجيا أن الماء دخل الوشاح من سطح الأرض في أثناء عملية الاندساس. إلى جانب الصخور والمعادن الموجودة في الغلاف الصخري، تُنقل أيضاً أطنان من الماء والكربون إلى الوشاح. يجري إرجاع الهيدروكسيد والماء إلى الوشاح العلوي والقشرة وحتى الغلاف الجوي من خلال الحمل الحراري في الوشاح والانفجارات البركانية وانتشار قاع البحر.

الوشـــــاح السفـــــلي Lower Mantle

يمتد الوشاح السفلي من نحو 660 كيلومتراً إلى نحو 2700 كيلومتر تحت سطح الأرض. الوشاح السفلي أكثر سخونة وكثافة من الوشاح العلوي والمنطقة الانتقالية، وهو أقل مرونة بكثير من الوشاح العلوي والمنطقة الانتقالية. مع أن الحرارة عادةً ما تتوافق مع تليين الصخور، إلا أن الضغط الشديد يحافظ على صلابة الوشاح السفلي.

لا يتفق الجيولوجيون على هيكل الوشاح السفلي. يعتقد بعض الجيولوجيين أن الصفائح المقوسة من الغلاف الصخري قد استقرت هناك؛ في حين يعتقد جيولوجيون آخرون أن الوشاح السفلي غير متحرك تماماً ولا ينقل الحرارة حتى بالحمل الحراري.

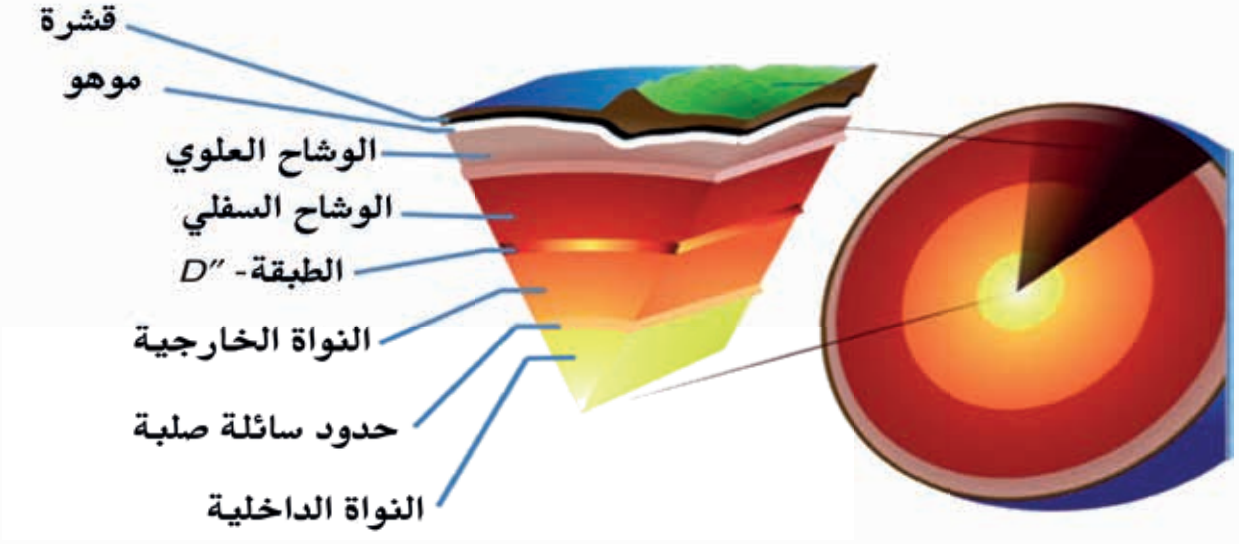


هكذا ستبدو الأرض إذا قمت بقطع مسافة 100 كيلومتر منها.

المنطقـــــــة (D″)

تحـــــت الوشـــــاح السفلي توجـــــد منطقة ضحلـــــة تسمى (D″) أو المزدوجـــــة (Double Prime). في بعض المناطق، يكون (D″) حدّاً رقيقاً تقريباً مع اللب الخارجي. في مناطق أخرى، يحتوي (D″) على تراكمات كثيفة من الحديد والسيليكات. في مناطق أخرى، اكتشف الجيولوجيـــون وعلماء الزلازل مناطق ذوبـــان ضخمـــة.

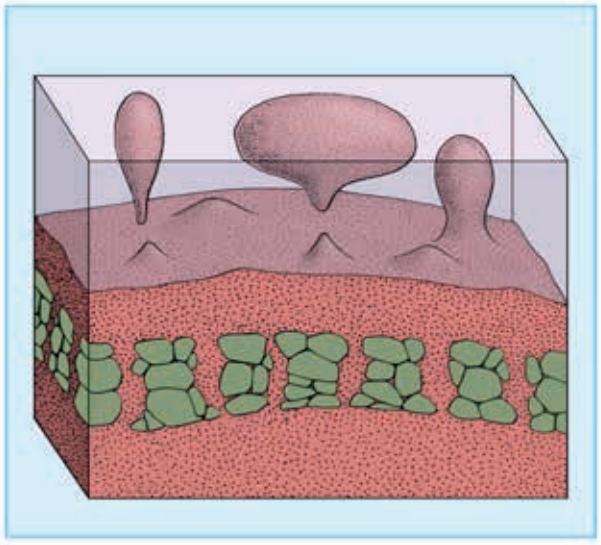
طبقة (D″) عبارة عن طبقة تبلغ سماكتها حوالي 200 كم في الجزء السفلي من الوشاح السفلي (على عمق حوالي2700–2900كم). لديها تدرجات سرعة منخفضة للموجة S وتشتت متزايد في أوقات السفر والسعات. من الناحية التركيبية، هناك مصدران لطبقة (D″) طبقة الأكسيد السفلي واللب الخارجي. أكاسيد من مرحلة تجربة الوشاح السفلي والتغيرات الفيزيائية داخل طبقة (D″).



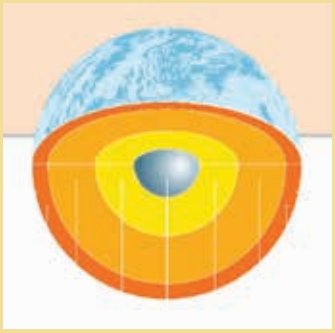
موقع الطبقة (D″) بين طبقات الأرض.

تتأثر الحركة غير المتوقعة للمواد في المنطقة (D″) بالوشاح السفلي والنواة الخارجية. يؤثر الحديد الموجود في النواة الخارجية على تكوين الانبثاقات الصهارية Plumes، وهي معالم جيولوجية تكون على شكل قبة تدفع المزيد من المواد السائلة إلى الصخور العلوية الهشة. ينبعث من الانبثاق الحديدي حرارة وقد يطلق نبضاً ضخماً منتفخاً من أي مادة أو طاقة، تماماً مثل مصباح الحمم البركانية. تزاد هذه الطاقة باتجاه الأعلى، ناقلة الحرارة إلى الوشاح السفلي والمنطقة الانتقالية، وربما تندلع كانبثاق صهاري للوشاح.

تتأثر الحركة غير المتوقعة للمواد في (D″) بالغطاء السفلي واللب الخارجي. يؤثر الحديد الموجود في اللب الخارجي على تكوين الحفاضات Diapir، وهي سمة جيولوجية على شكل قبة (التسلل البركاني) حيث يتم دفع المزيد من المواد السائلة إلى الصخور العلوية الهشَّة. ينبعث الحفاض الحديدي حرارة وقد يطلق نبضاً ضخماً منتفخاً من أي مادة أو طاقة - تماماً مثل مصباح الحمم البركانية. تزدهر هذه الطاقة لأعلى، ناقلة الحرارة إلى الوشاح السفلي والمنطقة الانتقالية، وربما تندلع كعمود وشاح.



يشبه مبدأ عمل مصابيح الحمم (إلى اليمين) الانبثاقات الصهارية التي تحدث في الوشاح. عند إيقاف تشغيلها، توجد طبقة من السائل الأحمر اللزج أسفل طبقة الزيت الشفاف. وعند تشغيل المصباح يقوم السلك الموجود في قاعدته بتسخين الكرة الحمراء بحيث تتمدد وتصير أقل كثافة وتبدأ في الارتفاع بشكل كتل ممطوطة إلى الجزء العلوي من الزيت. عندما تبرد الكرة الحمراء بدرجة كافية، فإنها تغوص للأسفل مرة أخرى.

حقائق علمية مدهشة	تفجيـــرات نوويـــة
	تسبب الانفجارات، مثل الزلازل، موجات زلزالية. قد تكون موجات الجسم من الانفجارات النووية القوية قد كشفت عن أدلة حول باطن الأرض، ولكن مثل هذه الدراسة الزلزالية محظورة كجزء من معاهدة الحظر الشامل للتجارب النووية.

عند قاعدة الوشاح، على بُعْد نحو 2900 كيلومتر تحت السطح، توجد حدود الوشاح الأساسي، أو CMB. هذه النقطة، التي تسمى انقطاع غوتنبرغ، تمثل نهاية الوشاح وبداية النواة الخارجية السائلة للأرض.

طرائـــق استكشـــاف الوشـــاح

لم يقم العلماء باستكشاف وشاح الأرض مباشرة. حتى معدات الحفر الأكثر تعقيداً لم تصل إلى ما بعد القشرة الأرضية. وإنما بدلاً من ذلك، يقوم العلماء بتخطيط المناطق الداخلية من خلال مشاهدة كيفية انحناء أو انعكاس أو تسريع أو تأخير الموجات الزلزالية الناتجة عن الزلازل بسبب الطبقات المختلفة، كما توجد عدة طرائق للكشف عن بنية الوشاح سنتعرف عليها فيما يأتي.

إيكـــو لتصـــويـر باطـــن الأرض

الأمـواج الزلزاليـة تنتقـل بـين طبقـات الأرض وتكشـف عـن المناطـق السـائلة والصلبـة ويقـوم العلمـاء بالتقـاط الانعكاسـات ومعالجتهـا حاسـوبيّاً وإظهارهـا بشـكل صـور ملونـة تبـين لهـم أدق التفاصيـل. فعليّـاً كيـف يمكـن للأمـواج الزلزاليـة أن تخبرنا عن بنية الأرض؟

تخيّـل شـكل موجـة، ربمـا تفكـر في موجـة مائيـة سـطحية، مثـل الموجـة التـي تراهـا علـى سـطح البحـر. لكـن العديـد مـن الموجـات – مثـل الصـوت، علـى سـبيل المثـال – تنتقـل عبـر المـادة. مـع أن الموجـات الزلزاليـة التـي تسـبب ضـرراً عنـد حـدوث الزلـزال هـي تلـك التـي تنتقـل علـى السـطح، إلا أن هنـاك نوعين من (موجات الجسم Body waves) التي تتحرك عبر الأرض:

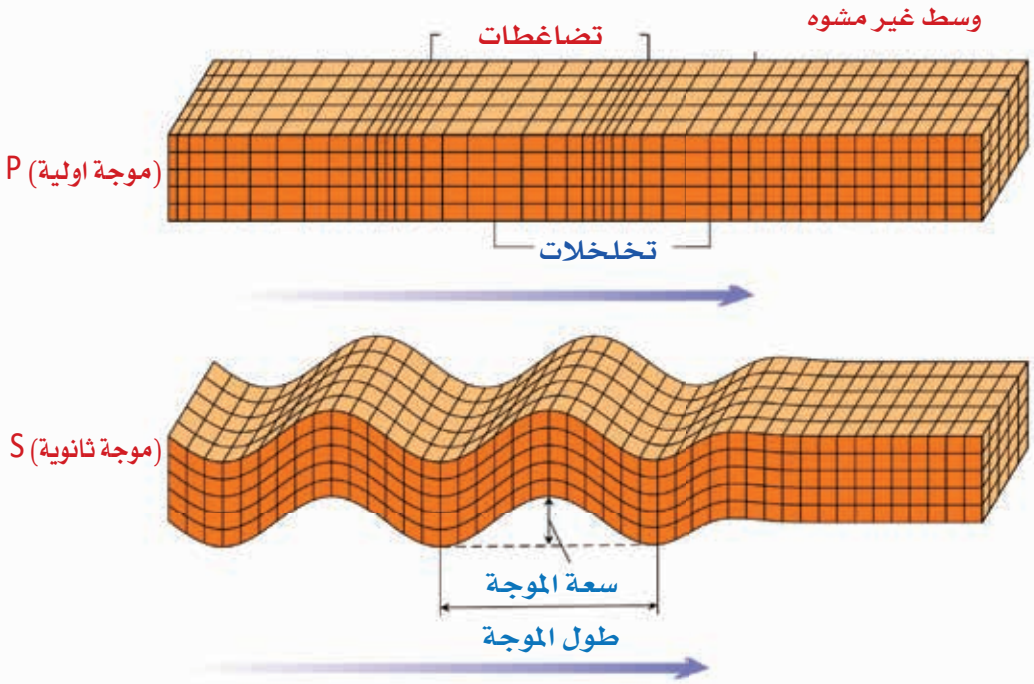
- النـوع الأول هـو الموجـات P (P تعنـي أوليـة Primary) وهـي موجـات طوليـة، تمامـاً مثـل موجـات الصـوت. وتهتـز في اتجـاه الحركـة، ممـا يتسـبب في سـحق الأرض وتوسـعها أثنـاء مرورهـا بهـا. وتنتقـل الموجـات P بسـرعة نحـو 5 كيلومتـرات في الثانيـة في صخـرة مثـل الغرانيـت، ومـا يصـل إلـى 14 كيلومتـراً في الثانيـة في أكثـر أجزاء الوشاح كثافة.

- النـوع الثانـي هـو الموجـات S (S تعنـي ثانويـة Secondary)، هـي موجـات عرضيـة أبطـأ مـن الموجـات الأوليـة، تتحـرك مـن جانـب إلـى آخـر. وعلـى عكـس الموجـات P، فإنهـا لا تسـتطيع السـفر عبـر الجسـم السـائل، ولهـذا السـبب أثبـت هـذان النوعان من الموجات أنهما ضروريان في مساعدتنا على فهم باطن الأرض.

ولكن كيف تتحرك الموجتان P و S؟

ذكرنا أن الموجات P الأولية (الانضغاطية) هي أسرع الموجات الناتجة عن الزلزال. ترتحل عبر باطن الأرض ويمكنها المرور عبر كل من الصخور الصلبة والمصهورة. إنها تهز الأرض ذهاباً وإياباً – مثل نابض سلينكي Slinky – في اتجاه سفرها، لكنها تتسبب في أضرار طفيفة لأنها تحرّك المباني فقط للأعلى وللأسفل.

أما موجات S (القص) الثانوية فهي تتأخر عن الموجات P لأنها تسافر أبطأ 1.7 مرة ويمكن أن تمر فقط عبر الصخور الصلبة. ومع ذلك فهي تسبب المزيد من الضرر لأنها أكبر وتهز الأرض عمودياً وأفقياً.



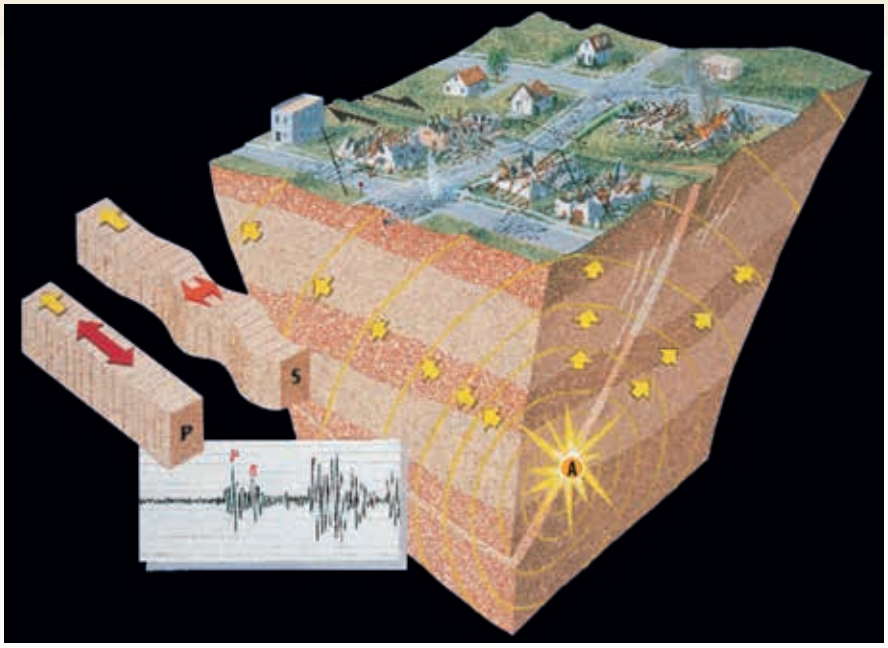
ميكانيكية انتشار الموجات P (الانضغاطية) الأولية الموجات S (القص) الثانوية.

الآن تخيل وقوع زلزال هائل، تبدأ الأمواج بالتحرك عبر الأرض، حيث تنطلق الموجات P إلى الأمام، بينما تتبعها موجات S في الخلف بنحو نصف السرعة.

ولكن عندما تمر الموجات عبر النواة لتصل إلى محطة قياس بعيدة، يوجد ما يسمى بمنطقة الظل. تسافر نحو 104 درجات حول محيط الأرض من مركز الزلزال وتختفي. ولكن ابتداءً من 140 درجة فصاعداً، تعود الموجات P إلى الظهور دون وجود موجات S مصاحبة.

تغير الموجات الزلزالية سرعتها أثناء مرورها عبر طبقات الأرض. تتسارع الموجات الزلزالية عندما تمر عبر قاع القشرة وتدخل الوشاح العلوي، تسمى هذه الحدود بين القشرة والوشاح العُليا بانقطاع موهو.

في وقت مبكرٍ من عام 1906م، أدرك العالم ريتشارد أولدهام الآثار المترتبة على هذا الظل الغريب. لقد أدرك أنه يمكن تفسير سلوك الموجة P و S الملحوظ إذا اعتبرنا أن مركز الأرض سائل. في مثل هذه الحالة، تنكسر الموجات P بوساطة السائل، وتنحني كما يفعل الضوء عندما ينتقل من الماء إلى الهواء، تاركاً ظلاً مميزاً. على النقيض من ذلك، سيجري إيقاف الموجات S تماماً بوساطة النواة السائلة.



عندما تتحرك الصفائح التي تشكل الغلاف الصخري للأرض، يحدث ضغط كبير على الصخور. إنها تنحني، وتمتد، وتضغط. من حين إلى آخر، تتكسر الصخور، مما ينتج عنه زلازل تولد موجات زلزالية. كما هو موضح هنا، يتحرك نوعان مختلفان من الموجات الزلزالية هما P و S - لكل منها خصائص مميزة - إلى الخارج من بؤرة الزلزال (الموقع A في الشكل).

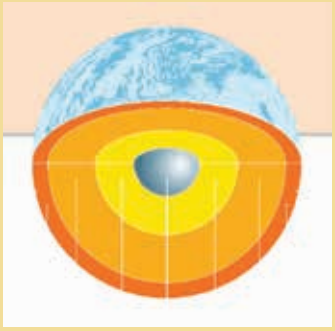
أدى اكتشاف أولدهام Oldham إلى إيجاد صورة مقبولة على نطاق واسع للنواة المنصهرة، ولكن بعد 30 عاماً، أدركت العالمة الدنماركية إنجي ليمان أن فكرة أولدهام كانت بسيطة جدّاً. إذ يجب أن ينتج عن انكسار الموجات P بوساطة السائل الكثيف الموجود في مركز الأرض ظل كامل.

في الواقع، أظهرت القياسات التي أجريت باستخدام مقاييس الزلازل الأكثر حساسية المتوفرة في زمن ليمان أن موجات P الخافتة لا تزال تصل إلى منطقة الظل. من خلال دراسة البيانات التي تمر عبر الكوكب من زلزال نيوزيلندا عام 1929م، اقترحت ليمان أن هذه الموجات تنعكس على الحدود بين النواة الصلبة الداخلية والسائلة الخارجية.

جرى تأكيد نتائجها، التي نُشرت في عام 1936م، بعد ذلك بعامين من قبل بينو غوتنبرغ وتشارلز ريختر، اللذين صاغا بدقة تأثيرات النواة الصلبة. وجاءت القياسات المباشرة لهذه الموجات الزلزالية المنعكسة أخيراً في عام 1970م.

وبشكل مثير، كشفت القياسات المتتالية عن كتلةٍ ضخمةٍ من مادة حرارية كثيفة شديدة السخونة تقع في قاع الوشاح بالقُرْب من حدودها مع نواة الأرض المنصهرة. إحداهما تحت جنوب المحيط الهادئ والأخرى تحت أفريقيا. يبلغ طول كل منها آلاف كيلومتر، وفوق كل منها يبدو أن هناك كمية كبيرة من المواد الأكثر سخونة تتجه نحو السطح.

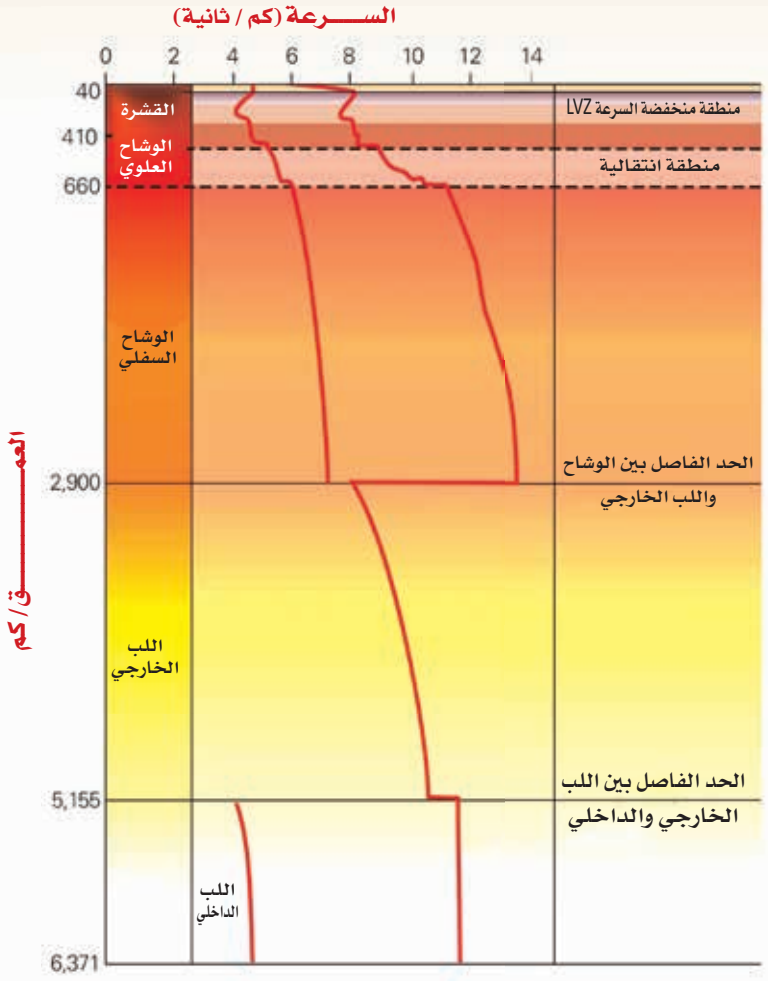
يمكن أن يفسر هذا سبب وجود قاع المحيط في منتصف جنوب المحيط الهادئ على ارتفاع 1000 متر فوق التضاريس المحيطية تحت سطح البحر، وهو أمر يصعب تفسيره عن طريق حركة الصفائح التكتونية. وإذا ذهبت إلى جنوب الكونغو على طول الطريق وصولاً إلى جنوب جنوب إفريقيا، بما في ذلك مدغشقر، فإن هذه المنطقة بأكملها مدعومة من هذا التيار الفائق.

حقائق علمية مدهشة	عـــدد مـــزلـــزل
	**حتى يتمكن علماء الجيولوجيا من رسم خرائط للوشاح المعقد فإنهم يحتاجون إلى وقوع 6000 زلزال بقوة 5.5 درجة على الأقل. لكن قد تكون خرائط الوشاح هذه قادرة على تحديد الصفائح القديمة من المواد المغمورة والموقع الدقيق وحركة الصفائح التكتونية.**

العلاقـــــة بين ســـرعة الموجـــات والعمـــق

تم استخدام التصوير المقطعي باستخدام موجات S أو موجات P أو مزيج من الاثنين في السنوات الأخيرة لإنشاء صور رائعة للهيكل الداخلي. ما يتم تصويره هو تغيرات في السرعة الزلزالية ترتبط بتغيرات درجة حرارة الأرض. تعتبر سرعة انتشار الموجات S حسَّاسة جدّاً لدرجة الحرارة بشكل خاص حيث ترتبط المناطق الأسرع بمواد أكثر برودة وأكثر دفئاً بسرعات أبطأ. تم تحديد معدل تغير الموجات الزلزالية مع العمق في الأرض من خلال تحليل الإشارات الزلزالية لإظهار ما يلي:

- **تكـــون السرعات** في صخور الوشاح أكبر منها في القشرة.
- **تـــزداد السرعات** بشكل عام مع زيادة الضغط، وبالتالي مع العمق.
- **تتباطأ السرعات** في المنطقة بين عمق 100 كم و 250 كم (تسمى منطقة السرعة المنخفضة؛ أي ما يعادل الغلاف الموري).
- **تـــزداد السرعات** بشكل كبير عند عمق 660 كم (بسبب التحول المعدني).
- **تتباطـأ السرعات** في المنطقة الواقعة فوق حد الوشاح الأساسي (الطبقة "D أو «منطقة السرعة المنخفضة جدّاً»).
- **لا تمـــر موجات** S عبر الجزء الخارجي من القلب.
- **تـــزداد سرعات** الموجة P بشكل كبير عند الحدود بين اللب الخارجي السائل واللب الداخلي الصلب.

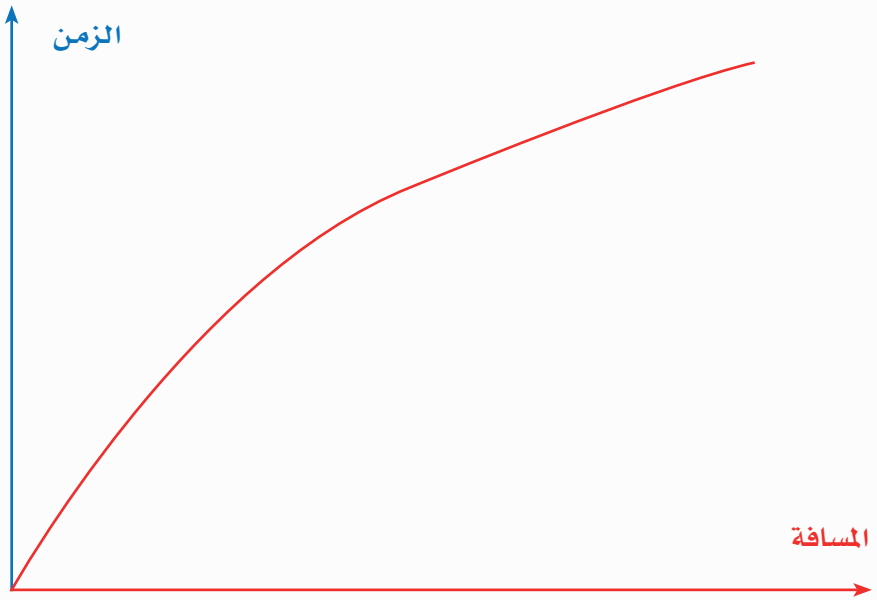


تغير السرعة السيزمية مع العمق من السطح إلى مركز الأرض

إن تقييد الخصائص الزلزالية للانقطاعين 410 و 660 كم اللتين تحددان منطقة انتقال الوشاح أمر بالغ الأهمية في فهم تكوين الوشاح وديناميكيات الحمل الحراري. تتمثل إحدى طرق دراسة المنطقة الانتقالية في استخدام وصول (ثلاثي) Triplicated للبيانات الزلزالية. التوزيعات المختلفة للسرعة مع العمق تنتج منحنيات وقت سفر مميزة. يوضح الشكل التالي الوضع المعتاد.

أولاً: تزداد الســـــرعة ببطء مع العمـــق

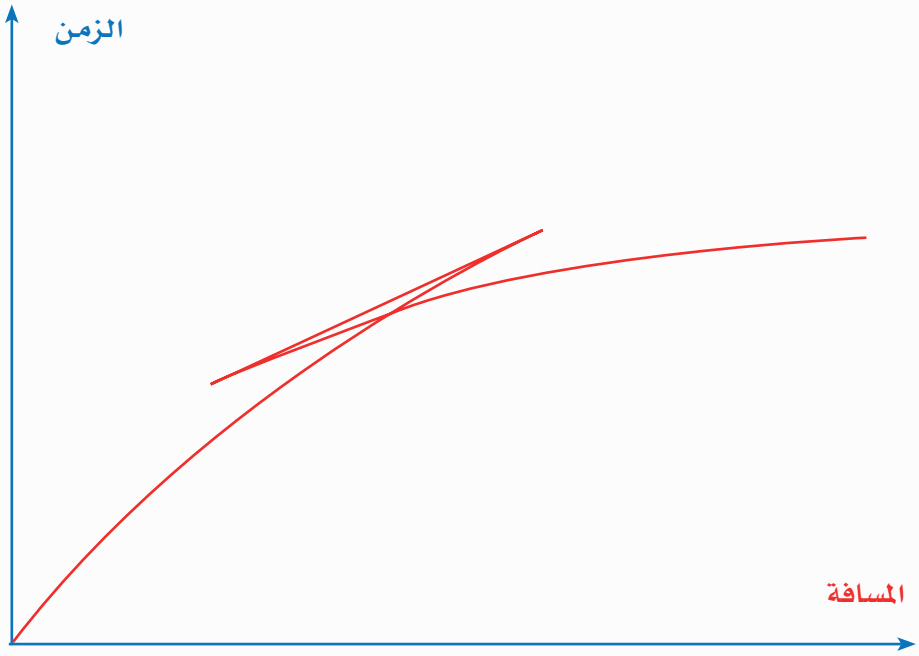
بالنظر إلى شعاعين، يكون للشعاع الذي له زاوية سقوط أصغر عند المصدر أصغر p، وبالتالي فإن القيعان أعمق عند نقطة ذات rp أصغر، ويخرج في النهاية أكثر من المصدر. وهكذا يقل معامل الشعاع، ويزيد وقت السفر، بشكل رتيب مع المسافة.



منحنى وقت السفر للسرعة يتباطأ مع العمق

ثانياً: تـــزداد السـرعة فجـــأة مع العمـــق

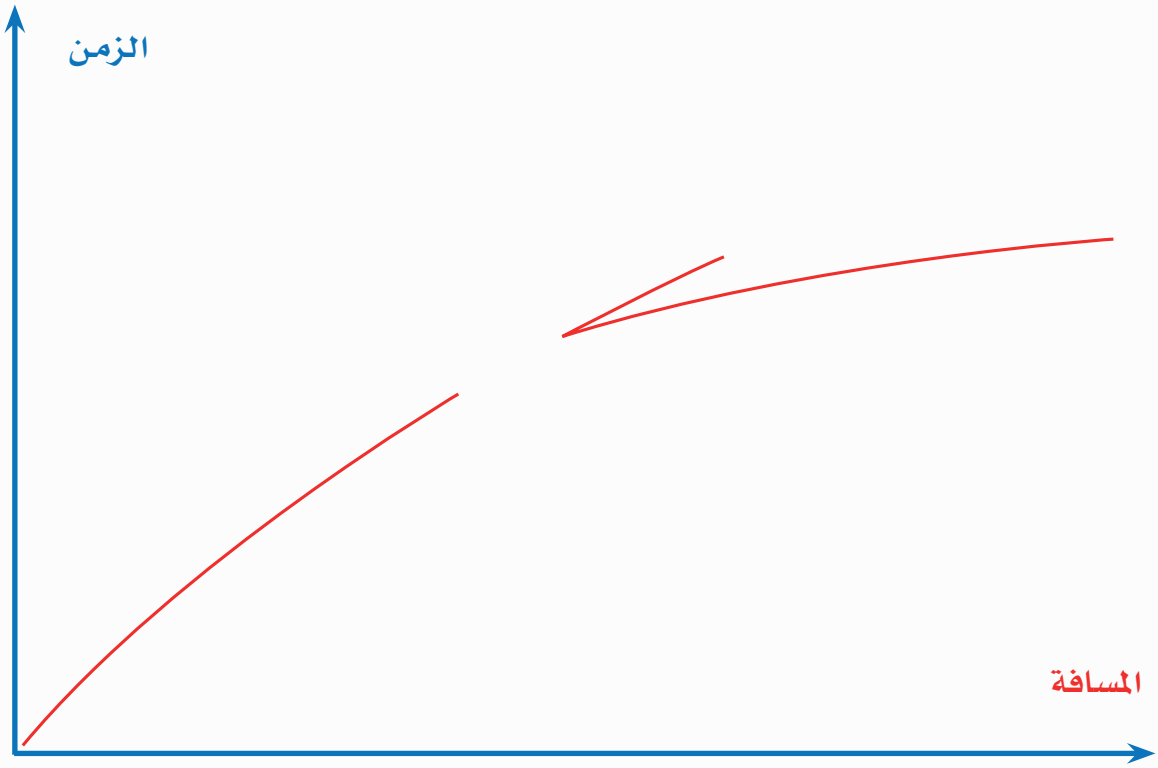
تتصـرف الأشـعة التـي تقـع أسـفل منطقـة التـدرج اللونـي للسـرعة العاليـة أو أسفلها كما في الشكل التالي؛ لذا فإن الأجزاء المقابلة من وقت السفر ومنحنى معامل الشعاع تظهر زيادة وقت السفر مع زيادة المسافة. على النقيض من ذلك، تنحني الأشعة التي تقع في القاع في منطقة الانحدار عالي السرعة لأعلى أكثر، وتظهر عند قيم أصغر للمسافة التي قد تكون كذلك. نتيجة لذلك، تظهر ثلاثة أشعة بمعاملات شعاع مختلفة على نفس المسافة، ويكون للمنحنى ثلاثة فروع متميزة، مما يعطي ثلاثية مميزة Triplication .



منحنى وقت السفر للسرعة يتزايد بسرعة فجائية

ثالثاً: تقـــل الســـرعة مع العمـــق

يطلق عليها منطقة السرعة المنخفضة، حيث تتناقص السرعة مع العمق ثم تزداد. تنحني الأشعة التي تدخل منطقة السرعة المنخفضة، بدلاً من أن تكون لأعلى، لذلك لا توجد أشعة أسفل هناك. يتسبب هذا الوضع في منطقة ظل Shadow Zone، وهي منطقة على سطح الأرض لا تصل إليها أشعة. أسفل منطقة السرعة المنخفضة مباشرةً، تصل الأشعة إلى مسافة معينة من خلال مسارين، مما يعطي قيمتين لوقت السفر لمسافة معينة.

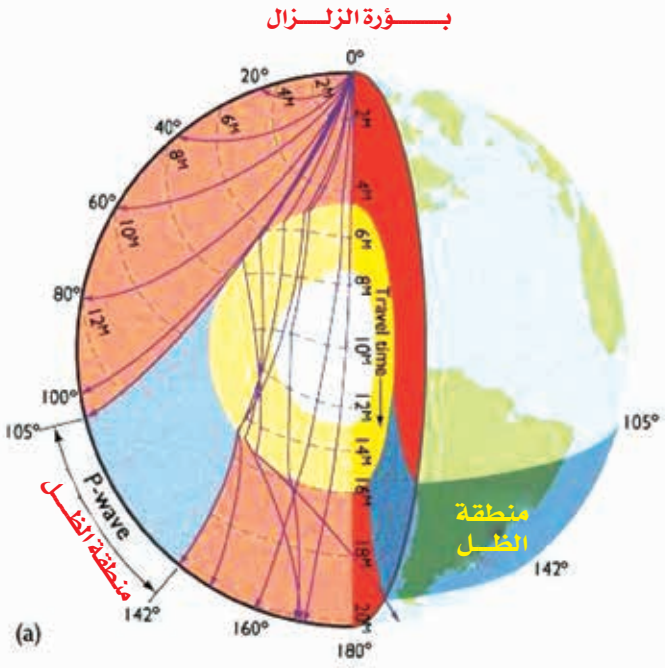


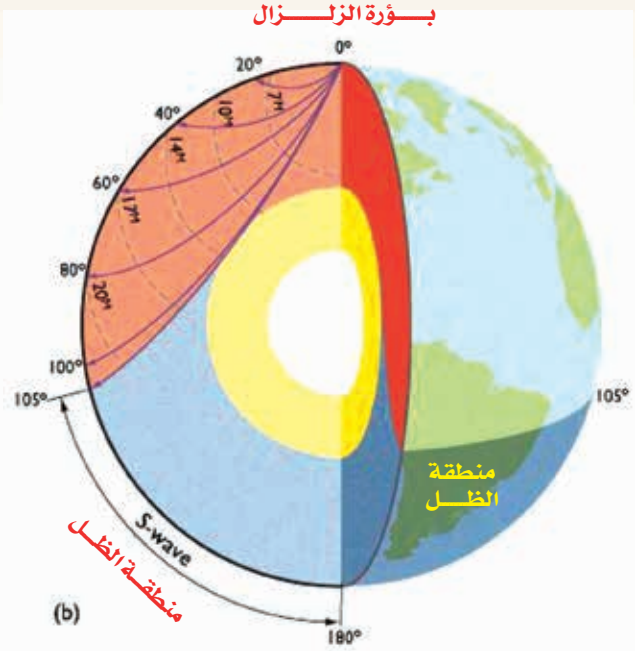
منحنى وقت السفر لمنطقة السرعة المنخفضة (منطقة الظل)

منطقـــــة الظـــــل Shadow Zone

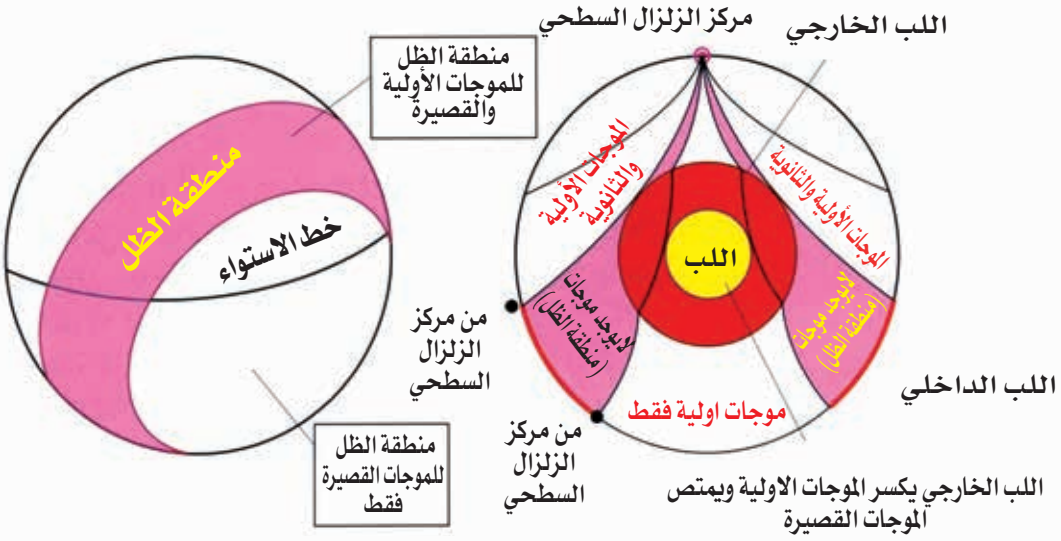
عندما يحدث زلزال، توجد منطقة على الجانب الآخر من الأرض حيث لا يتم قياس موجات S. تبدأ منطقة ظل الموجة S هذه بمقدار 103 درجة على جانبي الزلزال، لمسافة زاويّة إجمالية قدرها 154 درجة. توجد أيضاً منطقة ظل موجة P على جانبي الزلزال، من 103 درجة إلى 150 درجة.

تحدث منطقة الظل S-wave لأن موجات S لا يمكنها الانتقال عبر اللب الخارجي السائل. تحدث منطقة ظل الموجة P لأن السرعات الزلزالية أقل بكثير في اللب الخارجي السائل منها في الوشاح العلوي، وتنكسر الموجات P بطريقة تترك فجوة. لا تخبرنا مناطق الظل فقط أن اللب الخارجي سائل، كما أن حجم مناطق الظل يسمح لنا بحساب حجم اللب وموقع حدود اللب والوشاح.





أنماط انتشار الموجات الزلزالية عبر وشاح الأرض ولبها. لا تنتقل الموجات S عبر اللب الخارجي السائل، لذلك تترك ظلاً على الجانب البعيد من الأرض. تنتقل الموجات P عبر القلب، ولكن نظراً لانكسار الموجات التي تدخل اللب، توجد أيضاً مناطق ظل للموجة P.



الصخـــور الدخيلة (الزينوليثات) Xenoliths

هو جزء من الصخور الدخيلة داخل صخرة نارية. قد يكون Xenolith نفسه أي نوع من الصخور ولكن صخرته المضيفة يجب أن تكون نارية. تُعرف الصخور الدخيلة في أنواع الصخور الأخرى عادةً باسم (الشوائب). (Xenolith) تعني حرفيّاً (الصخور الدخيلة)، لكن بعض الزينوليث ليست غريبة تماماً على مضيفيها. قد تكون مرتبطة وراثيّاً على سبيل المثال Xenoliths Gabbro في البازلت. تسمى هذه Xenoliths الإدراج المتشابه أو Autoliths. إنهما مرتبطان لأن كلاهما تبلور من نفس الصهارة.

يدرس العديد من الجيولوجيين الوشاح من خلال تحليل الصخور الدخيلة أو الزينوليثات Xenoliths وهي نوع من الصخور الدخيلة، أي صخرة محاصرة داخل كتلة صخرية أخرى. الماس نفسه أقل أهمية بالنسبة للجيولوجيين من الأحجار الزينوليثية التي يحويها البعض. هذه الصخور الدخيلة هي معادن من الوشاح، محاصرة داخل الماس الصخري. سمحت الاختراقات الماسية للعلماء بإلقاء نظرة على ما يصل إلى 700 كيلومتر تحت سطح الأرض، أي الوشاح السفلي.

تشير دراسات الصخور الدخيلة أن الصخور الموجودة في الوشاح العميق هي على الأرجح ألواح يبلغ عمرها 3 بلايين عام من قاع البحر المغمور. وصرنا نعلم من تركيبة الزينوليتات أن الوشاح العلوي على الأقل مصنوع من صخور مثل البريدوتيت، الغني بمعدن سيليكات الحديد والمغنيسيوم.

صخور الوشاح الدخيلة، مثل هذه القطعة من الدونايت الملون باللون الأخضر، التي جلبت إلى السطح عن طريق الاضطرابات المرتبطة بالبركنة.

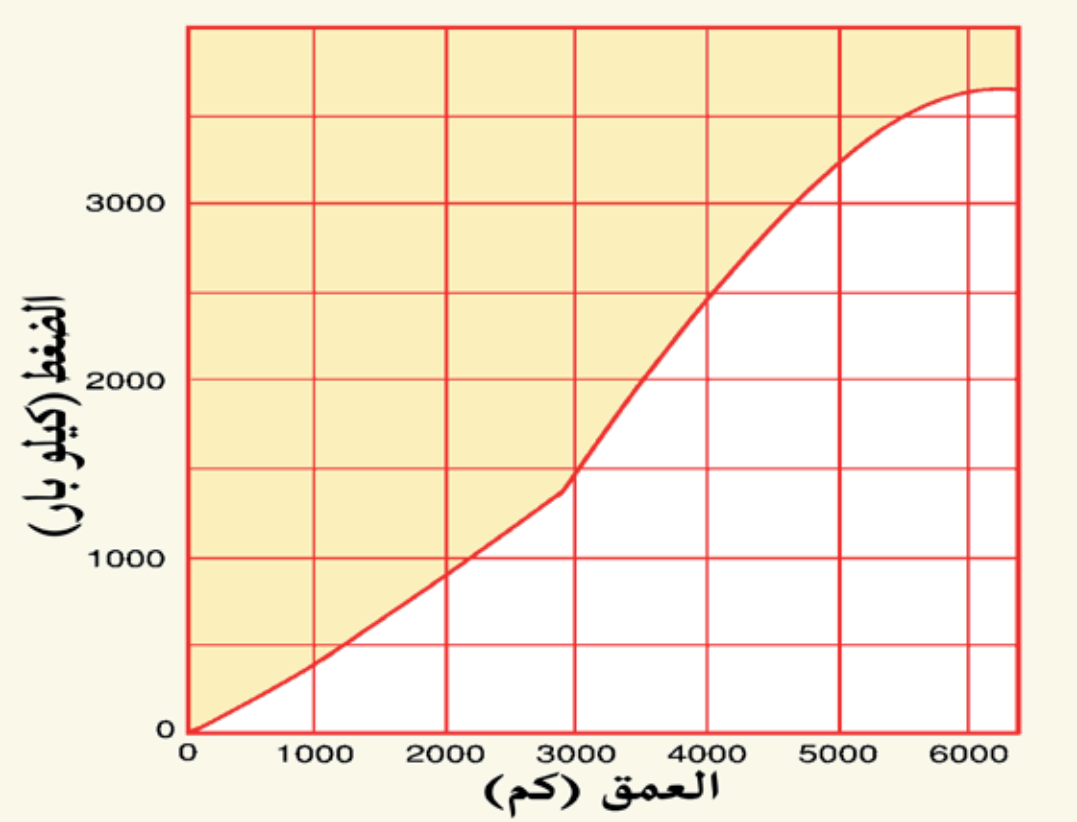
رســـــائل من الأعمـــــاق

هناك طريقة واحدة يمكننا من خلالها أخذ عينات من الوشاح مباشرة: في أثناء تدفق البراكين عميقة الجذور. تأتي معظم الصهارة التي تنفجر من البراكين من الانصهار الجزئي لمواد المصدر، لذلك البازلت، على سبيل المثال، ليس عينة كاملة من صخور الوشاح. ومع ذلك، فإنه يحمل أدلة نظيريه لما يكمن تحته. على سبيل المثال، يحوي البازلت من بعض البراكين عميقة الجذور، مثل تلك الموجودة في هاواي، على غاز الهيليوم مع نسبة عالية من الهيليوم 3 والهيليوم 4، الذي يعود لوقتٍ مبكرٍ من نشوء النظام الشمسي.

لذلك يُعتقد أن هذا الهليوم الذي يأتي من جزء من باطن الأرض لا يزال أصليّاً. يضيع الهليوم في الانفجارات البركانية ويستبدل ببطء بالهيليوم 4 من الاضمحلال الإشعاعي. يُستنفد البازلت في براكين سلسلة التلال في الهيليوم 3. وهذا يشير إلى أن المادة المعاد تدويرها فقدت غاز الهيليوم في الانفجارات السابقة ولا تأتي من عمق هذا الوشاح.

الحمـــــل الحـــــراري في الوشـــــاح

تختلف درجة حرارة الوشاح اختلافاً كبيراً، من 1000 درجة مئوية بالقُرب من حدودها مع القشرة الأرضية، إلى 3700 درجة مئوية بالقُرب من حدودها مع النواة. في الوشاح، تزداد الحرارة والضغط عموماً مع العمق. ويقيس التدرج الجيوحراري هذه الزيادة. في معظم الأماكن، يبلغ التدرج الحراري الأرضي نحو 25 درجة مئوية لكل كيلومتر من العمق.

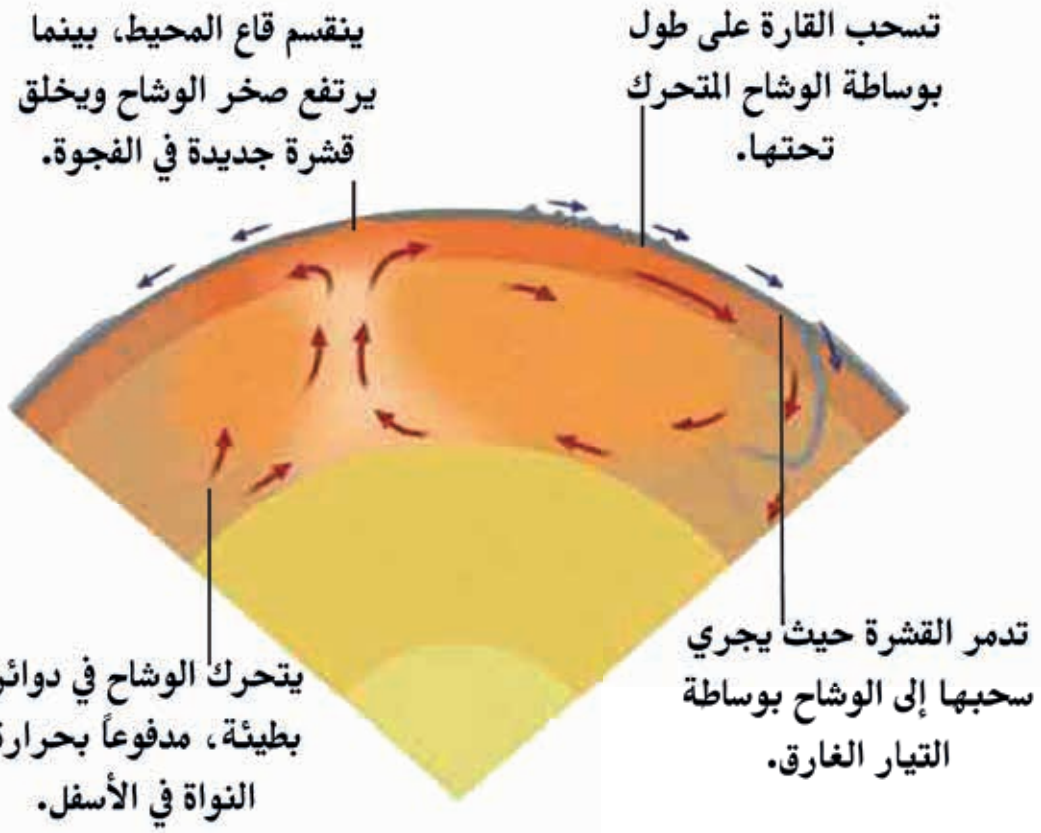


منحنٍ يوضح ازدياد الضغط في الجزء الداخلي من الأرض.

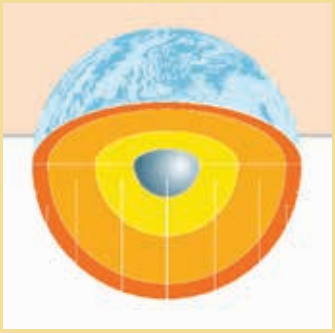
تختلف أيضاً لزوجة الوشاح اختلافاً كبيراً. وهي في الغالب صخور صلبة، لكنها أقل لزوجة عند حدود الصفائح التكتونية والانبثاقات الصهارية للوشاح. صخور الوشاح هناك ناعمة وقادرة على التحرك بشكل لدن (على مدار ملايين السنين) بعمق وضغط كبيرين.

ويصف الحمل الحراري في الوشاح حركة الوشاح؛ لأنه ينقل الحرارة من النواة البيضاء الساخنة إلى الغلاف الصخري الهشِّ. يسخّن الوشاح من الأسفل،

ويجري تبريده من الأعلى، وتنخفض درجة حرارته الإجمالية على مدى فترات طويلة من الزمن. كل هذه العناصر تساهم في الحمل الحراري. تنقل تيارات الحمل الحراري الصهارة الساخنة إلى الغلاف الصخري عند حدود الصفيحة والنقاط الساخنة. كما تنقل التيارات الحرارية أيضاً مادة أكثر كثافة وبرودة من القشرة إلى باطن الأرض من خلال عملية الاندساس.



تتدفق الصخور الموجودة في الوشاح في تيارات ترتفع وتتدفق جانبيّاً وتبرد ثم تغرق. يمكن أن تدفع هذه التيارات صفائح قشرة الأرض بعيداً أو تسحب أجزاء من القشرة لأسفل الوشاح.

حقائق علمية مدهشة	موصليـــــة الوشـــاح
	تعتمد بعض خرائط الوشاح على التوصيل الكهربائي، وليس على الموجات الزلزالية. من خلال رسم خرائط الاضطرابات في الأنماط الكهربائية، ساعد ذلك العلماء في تحديد (الخزانات) المخفية للمياه في الوشاح.

أعمـــــدة الوشـــاح Mantle Plumes

هو صعود صخرة شديدة السخونة من الوشاح. أعمدة الوشاح هي السبب المحتمل (للبقع الساخنة)، وهي مناطق بركانية لم تنشأ عن الصفائح التكتونية. عندما يصل عمود الوشاح إلى الوشاح العلوي، يذوب في حفاضات. تعمل هذه المادة المنصهرة على تسخين الغلاف الموري والغلاف الصخري، مما يؤدي إلى ثورات بركانية. تساهم هذه الانفجارات البركانية مساهمة طفيفة في فقدان الحرارة من باطن الأرض، على الرغم من أن النشاط التكتوني عند حدود الصفائح هو السبب الرئيس لفقدان الحرارة.

عمود الوشاح هو ارتفاع صخري ساخن بشكل غير طبيعي داخل وشاح الأرض. نظراً لأن رؤوس أعمدة الوشاح يمكن أن تذوب جزئياً عندما تصل إلى أعماق ضحلة، يُعتقد أنها سبب للمراكز البركانية المعروفة باسم (النقاط الساخنة) وربما أيضاً تسببت في الفيضانات البازلتية. إنها طريقة ثانوية تفقد فيها الأرض الحرارة، وهي أقل أهمية في هذا الصدد من فقدان الحرارة عند هوامش الصفائح.

يعتقد بعض العلماء أن الصفائح التكتونية تبرد الوشاح، وأن أعمدة الوشاح تبرد اللب. اثنان من أكثر المواقع المعروفة التي تتناسب مع نظرية عمود الوشاح هما هاواي وأيسلندا لأن كليهما لهما نشاط بركاني. حدد الجيولوجيون ما يسمى بـ (الأعمدة الفائقة) Superplumes. هذه الأعمدة الفائقة، أو المقاطعات الكبيرة ذات سرعة القص المنخفضة (LLSVPs)، ترجع أصولها إلى المادة الذائبة لـ (D″).

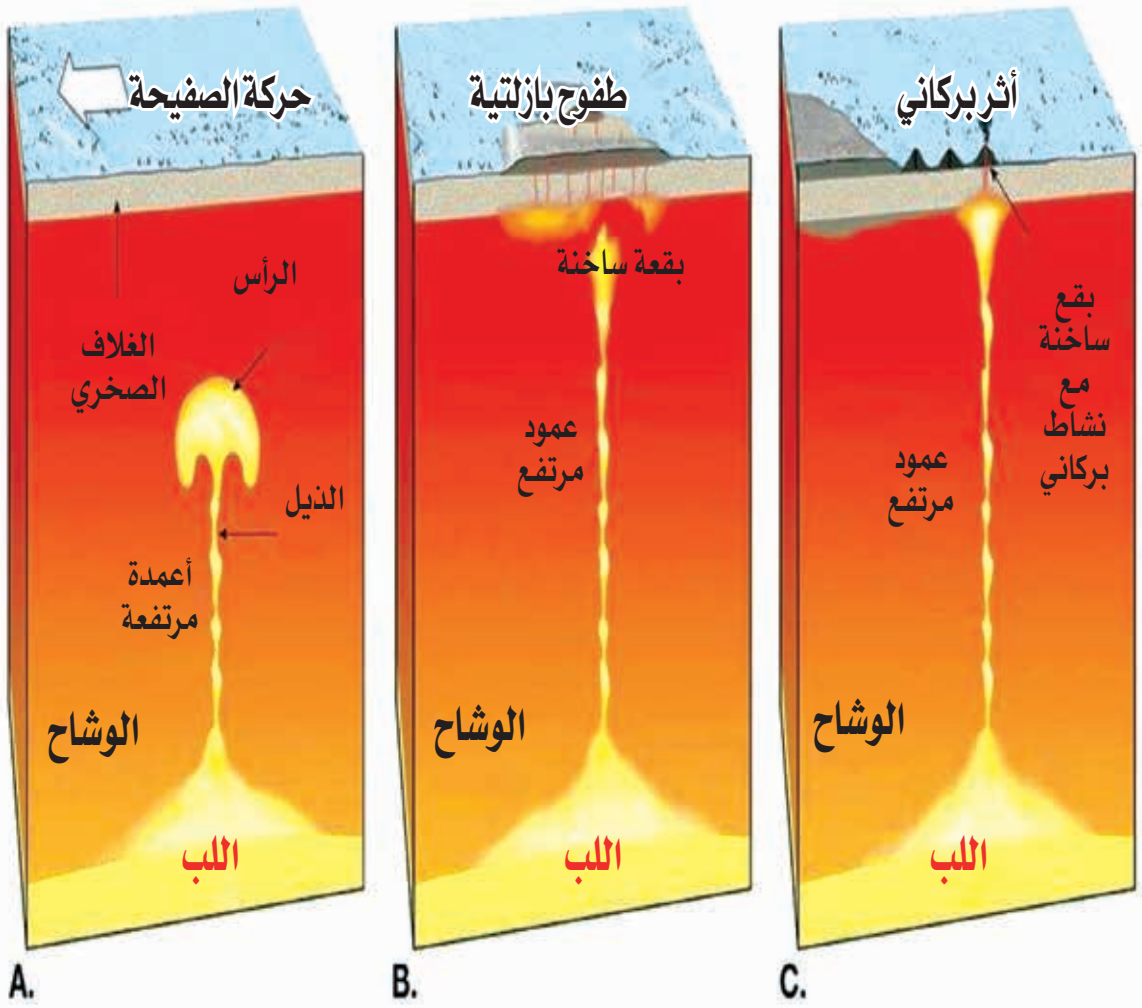
يعتقد الجيولوجيون أن أعمدة الوشاح قد تتأثر بالعديد من العوامل المختلفة. قد ينبض البعض، بينما قد يتم تسخين البعض الآخر باستمرار. قد يحتوي البعض على حفاض واحد، بينما قد يحتوي البعض الآخر على (سيقان) متعددة. قد تنشأ بعض أعمدة الوشاح في منتصف الصفيحة التكتونية، بينما قد يتم (أسر) البعض الآخر عن طريق مناطق انتشار قاع البحر.

حدد بعض الجيولوجيين أكثر من ألف عمود من أعمدة الوشاح. يعتقد بعض الجيولوجيين أن أعمدة الوشاح غير موجودة على الإطلاق. إلى أن تسمح الأدوات والتكنولوجيا للجيولوجيين باستكشاف الوشاح بشكل أكثر شمولاً، سيستمر الجدل.

البقـــــع الساخنـــــة Hot Spots

البقعة الساخنة: هي منطقة من الوشاح العلوي للأرض ترتفع لتذوب خلال القشرة لتشكيل سمة بركانية. تُعزى معظم البراكين التي لا يمكن عزوها إلى منطقة اندساس أو قاع البحر المنتشر عند التلال وسط المحيط إلى النقاط الساخنة. تعتبر نسبة 5 في المائة من براكين العالم المعروفة التي لا ترتبط ارتباطاً وثيقاً بهوامش الصفائح (انظر الصفائح التكتونية) براكين في النقاط الساخنة. تعد براكين هاواي من أفضل الأمثلة على هذا النوع، حيث تحدث بالقُرْب من مركز الجزء الشمالي من صفيحة المحيط الهادئ. يمكن أن تتكون سلسلة من البراكين المنقرضة أو الجزر البركانية والجبال البحرية، مثل سلسلة هاواي، على مدى ملايين السنين حيث تتحرك صفيحة الغلاف الصخري فوق

نقطة ساخنة. تقع جميع البراكين النشطة في أحد طرفي السلسلة أو التلال، وتزداد أعمار الجزر أو التلال ببُعْدها عن مواقع النشاط البركاني تلك.



أ. يظهر عمود وشاح متصاعد. ب. الصهارة على شكل تدفقات من البازلت، تصلب لتنتج هضبة محيطية.
ج. النشاط الضخم الأقل ينتج سلسلة بركانية

نـــــــــواة الأرض Earth Core

في عـام 1866م، اقتـرح الجيولوجـي الفرنسـي غابرييـل دوبريـه مـا مفـاده أنّ تحـت سـطح الأرض توجـد طبقـات مـن الصخـور المختلفـة التـي تـزداد كثافـة مـع العمـق، لتبلـغ ذروتهـا في منطقـة مركزيـة مكونـة مـن الحديـد والنيـكل. ثبـت أن أفكاره صحيحة وقد اكتشف المزيد حول الوشاح والنواة منذ ذلك الحين.

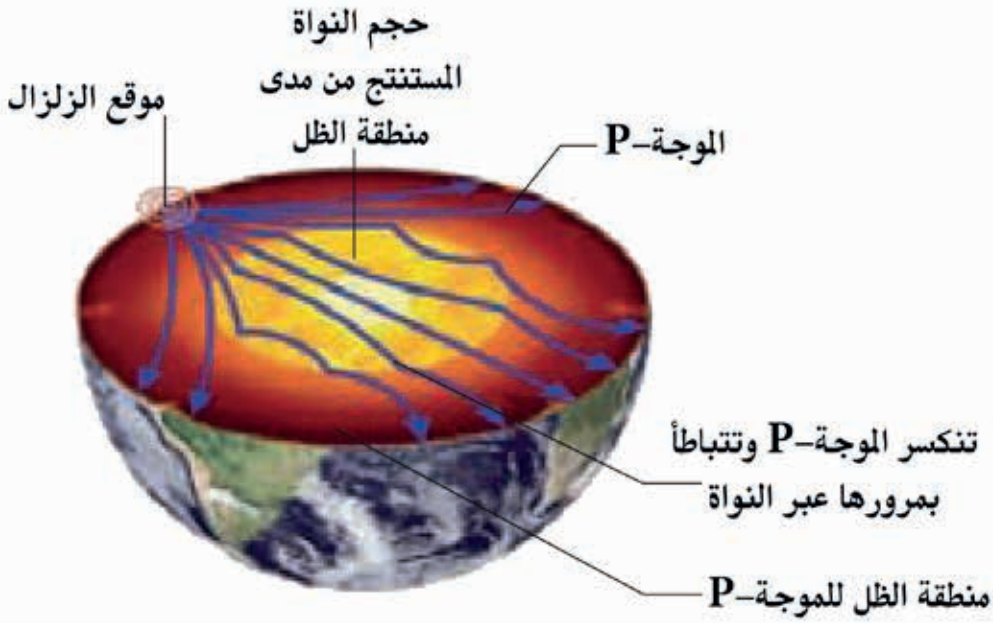
عنـد الوصـول إلـى مركـز الأرض فـإن الضغـط يـزداد إلـى ملايـين المـرات عمـا هـو عليـه علـى سـطح الأرض. وترجـع صلابـة اللـب الداخلـي إلـى أن ازديـاد الضغـط يفـوق زيـادة الحـرارة، لذلـك تتصلـب مكوناتـه، أمـا في اللـب الخارجـي فـإن الزيـادة في الضغـط والحـرارة يكونـان متلازمـين ممـا يبقـى الحديـد في حالتـه السـائلة. وتقـدر درجـات الحـرارة عنـد مركـز الأرض مـا بـين 3000 إلـى 5000 درجـة سـيليزية (مئوية). يمثل اللب حوالي سدس حجم الأرض وما يقرب من ثلث كتلتها.

تمتـد نـواة الأرض مـن حـد الوشـاح السـفلي نـزولاً إلـى مركـز الأرض. وتتـراوح كثافـة النـواة بـين 10و13 غـرام لـكل سـم مكعـب، ويبلـغ قطـر النـواة نحـو 2400 كيلومتـر. وصـار مـن المعـروف أنهـا تتكـون مـن جـزء صلـب داخلـي، وجـزء سـائل خارجي.

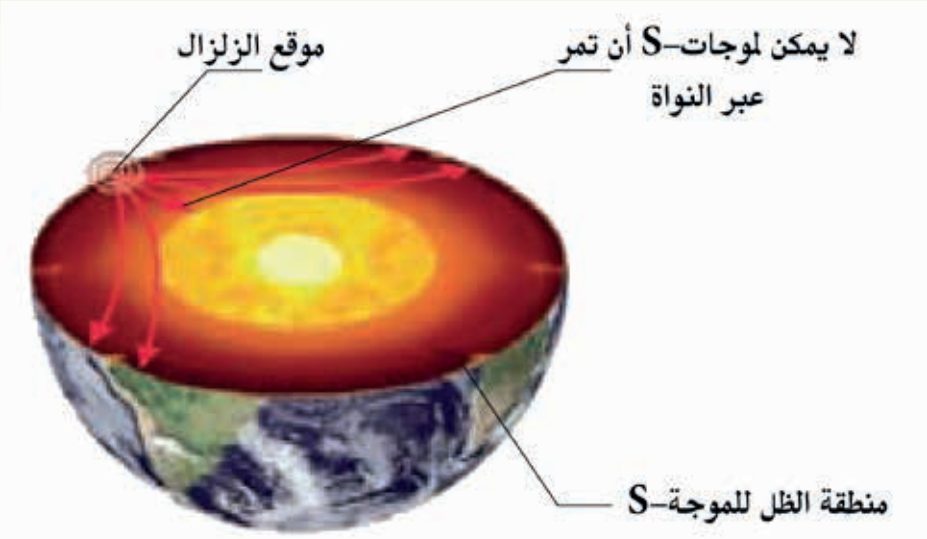
في الواقع توجد عدة أدلة تثبت وجود نواةٍ للأرض، كالموجات الزلزالية وتحليل النيازك، والتجارب المعملية مع درجة الحرارة والضغط، والنمذجة الحاسوبية.

الموجـــــات الزلـــــزاليـــة

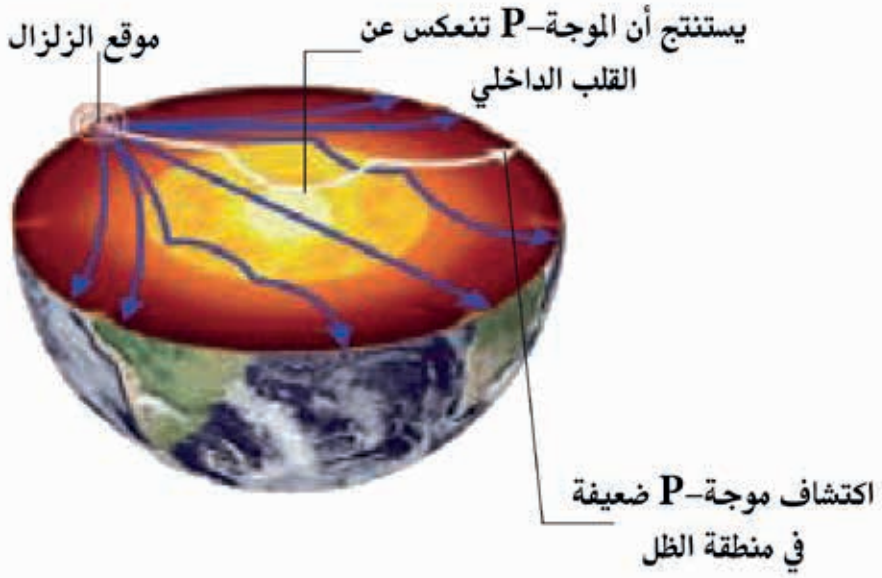
نعلم من الموجات الزلزالية أن الجزء الخارجي من النواة سائل وأن النواة الداخلية صلبة. إذْ تستغرق موجات P وقتاً أطول لانتقال الموجات الزلزالية من جانبٍ إلى آخر بسبب التأثير البطيء للنواة.



لا يمكن أن تمر الأمواج الزلزالية من النوع S خلال السوائل، ولم يجرِ الكشف عنها على الجانب الآخر من العالم. فهذا يشير إلى أن المنطقة الخارجية على الأقل من النواة هي سائلة.

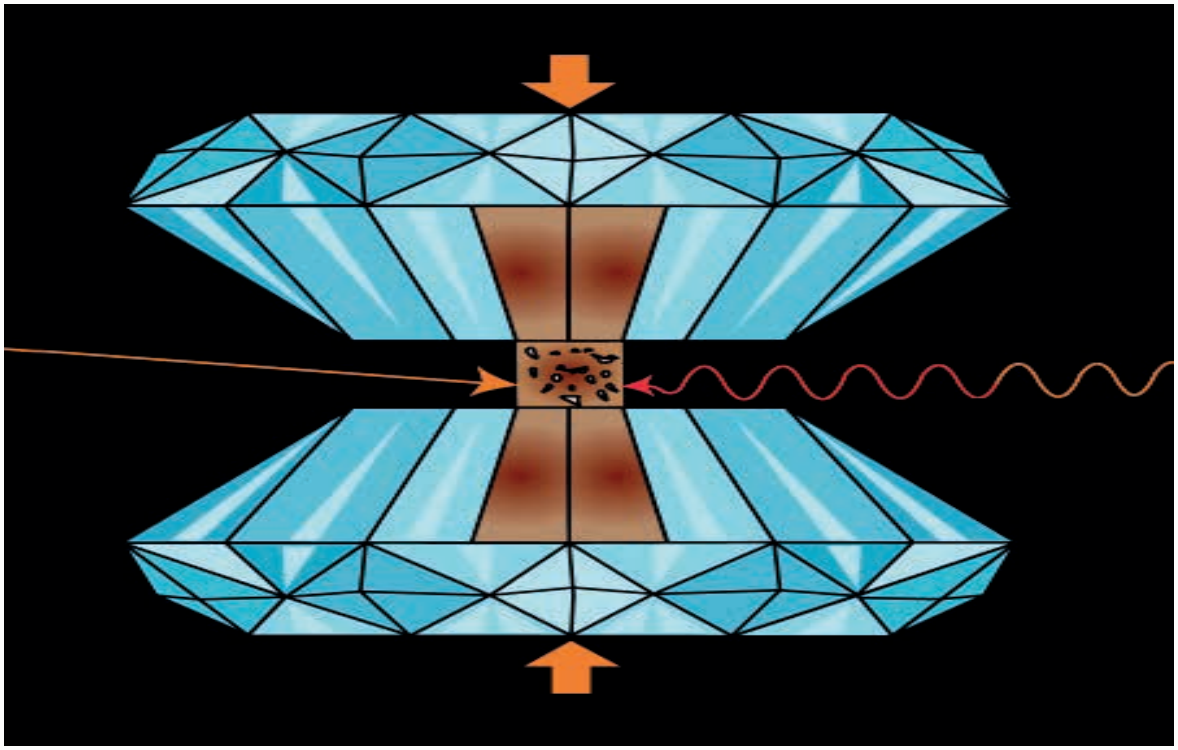


يمكن الكشف عن موجة P باهتة في منطقة الظل بعد الزلزال. عندما جرى اكتشاف هذا لأول مرة، استنتج العلماء أن الموجة P المكتشفة يجب أن تنعكس على سطح الجزء الداخلي من النواة.



فـــي المعمـــــل

تعتبـر خليـة سـندان المـاس Diamond anvil cell الأداة الأكثـر قيمـة لدراسـة القـوى والتفاعـلات في النـواة. تسـتخدم خلايـا سـندان المـاس أقسـى مـادة علـى الأرض (المـاس) لمحـاكاة الضغـط المرتفـع بشـكل لا يصـدق في القلـب، حيـث يسـتخدم الجهـاز ليـزر الأشـعة السـينية لمحـاكاة درجـة حـرارة النواة، ويبث الليزر بين ماسـاتين يضغطان على عينة بينهما.



تمكن خلية سندان الماس (DAC) من ضغط قطعة صغيرة (بحجم أقل من المليمتر) من المواد لضغوط شديدة، تصل عادةً إلى نحو 100 – 200 جيجاباسكال، ومن الممكن تحقيق ضغوط تصل إلى 770 جيجاباسكال (أو 7.7 مليون ضغط جوي).

النمذجة الحاسوبية

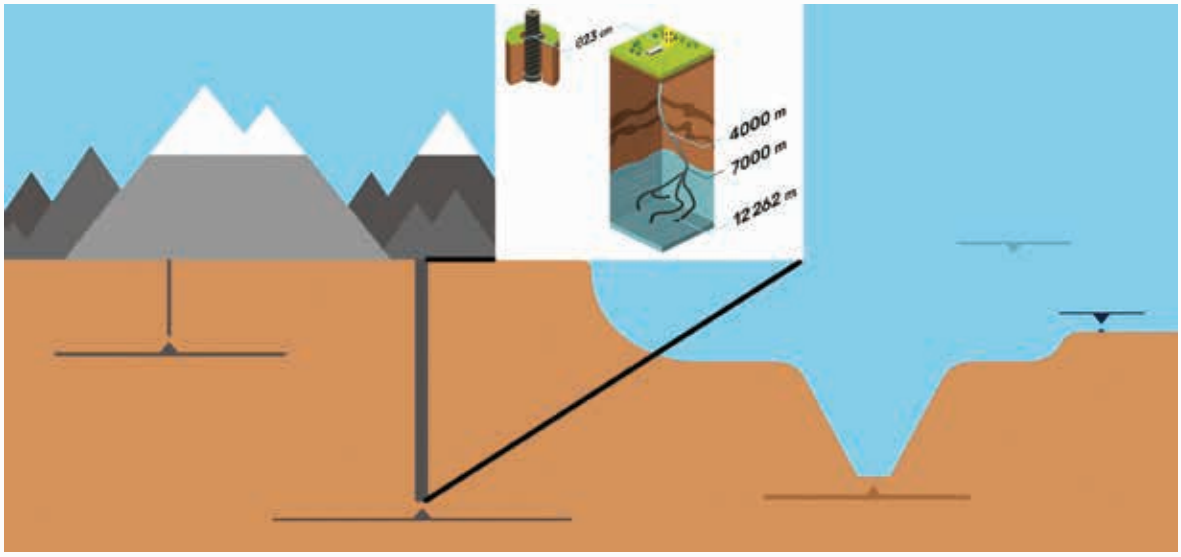
لقد سمحت النمذجة الحاسوبية المعقدة للعلماء أيضاً بدراسة النواة، ففي التسعينات، على سبيل المثال، أوضحت النمذجة جيوديناموGeoDynamo كاملة مع تقلبات القطب بشكل جيد. والجيوديناموتعني أنّ التدفق المضطرب للحديد السائل الموجود في لب باطن الأرض يولِّد مجالاً مغناطيسيّاً.

تقترح نظرية دينامو أن الحمل الحراري في اللب الخارجي، جنباً إلى جنب مع تأثير كوريوليس، يؤدي إلى المجال المغناطيسي للأرض . اللب الداخلي الصلب حار جدّاً بحيث لا يحمل مجالاً مغناطيسيّاً دائماً ولكن من المحتمل أن يعمل على استقرار المجال المغناطيسي الناتج عن اللب الخارجي السائل. يقدر متوسط المجال المغناطيسي في اللب الخارجي للأرض بقياس 25 غاوس (2.5 مليون طن)، أقوى 50 مرة من المجال المغناطيسي على السطح. تشير الأدلة الحديثة إلى أن اللب الداخلي للأرض قد يدور بشكل أسرع قليلاً من بقية الكوكب؛ في عام 2005 قدر فريق من علماء الجيوفيزياء أن اللب الداخلي للأرض يدور بمعدل 0.3 إلى 0.5 درجة في السنة أسرع.

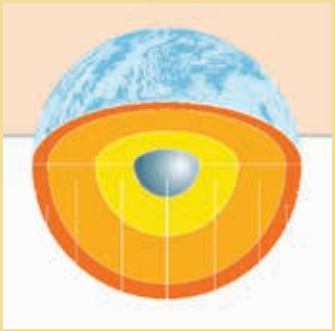
لماذا لا نرسل مسبار آلي إلى نواة الأرض الداخلية لنكشف عن حقيقتها؟

في الواقع تقع نواة الأرض الداخلية على بُعْد 6371 كم من سطح الأرض وأعمق حفرة جرى حفرها على الإطلاق هي حفرة (كولا سوبرديب بورهول Kola Superdeep Borehole) في روسيا، التي وصلت إلى عمق 12 كم فقط. وإذا حاولنا إرسال مسبار روبوت، فإنه لن يبتعد كثيراً. الضغط في باطن الأرض هو أكثر من 3000 ضعف الضغط في قاع المحيط الأعمق. ودرجة الحرارة أكثر من 5000 درجة مئوية.

أعتقد أن هذا قد يفسّر لنا لماذا يتوجه البحث العلمي لاستكشاف أعماق الفضاء أكثر من استكشاف أعماق الأرض؛ إذ بالمقارنة مع الوصول إلى نواة الأرض، فإن السفر إلى المناطق خارج النظام الشمسي يصير أمراً تافهاً.



حفرة (كولا سوبرديب بورهول) في روسيا، التي وصلت إلى عمق 12 كم فقط.

حقائق علمية مدهشة	ليـــس كوكبنـــا فقـــط
	جميع الكواكب المعروفة لها نوى معدنية. حتى عمالقة الغاز في نظامنا الشمسي، مثل كوكب المشتري وزحل، لديها حديد ونيكل في نواها.

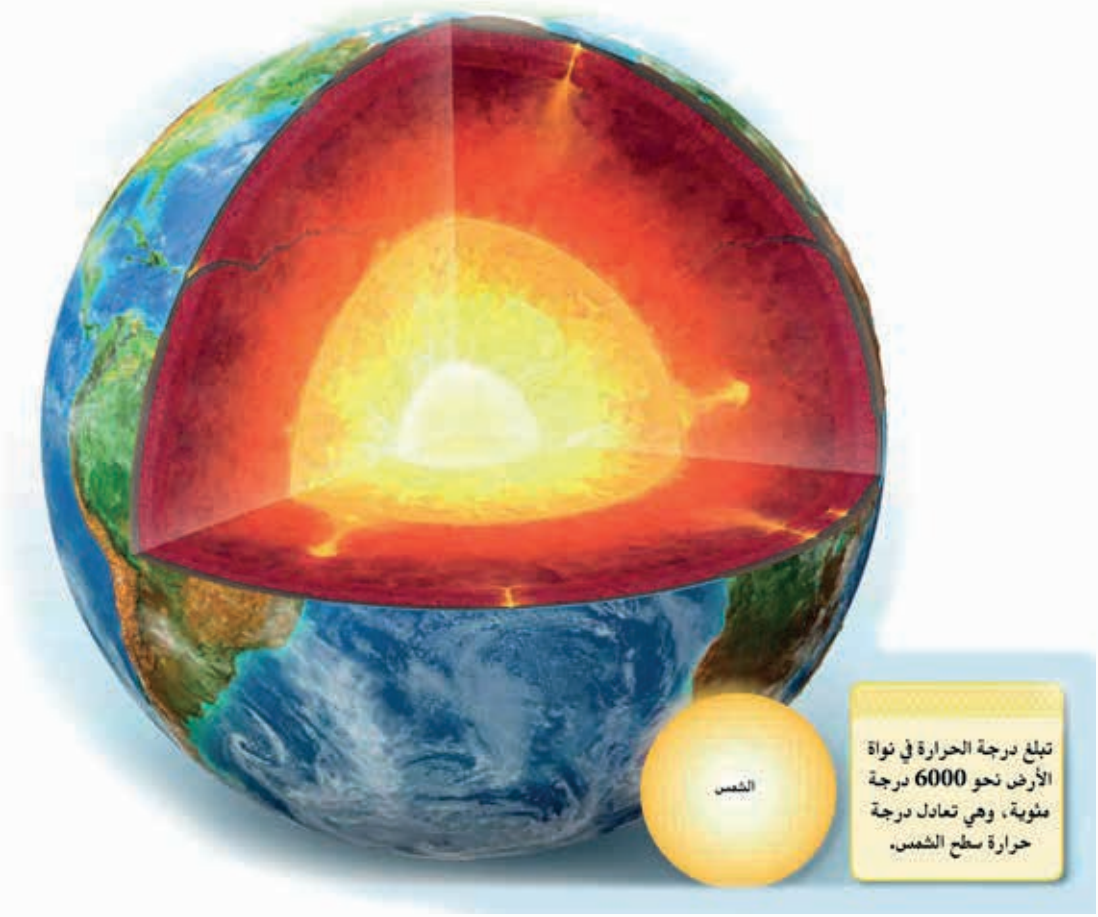
نـــــواتـــــــا الأرض

وجـدنا أن نـــــواة الأرض تنقســـــم إلـى نواتـــين بنـاءً علـى خصائصها الجيوفيزيائيـــة: نـــواة خارجيـــة، ونـــواة داخليـــة.

النـــــــواة الخارجيـــة

النـواة الخارجيـة عبـارة عـن طبقـة سـائلة تتكـون في الغالـب مـن سـبيكة مـن الحديـد والنيـكل (وهـو خليـط لـه تركيبـة مماثلـة للنيـازك المعدنيـة). وقـد تشـكلت من خلال الانصهار الجزئي فقط للعناصر المعدنية المتراكمة.

تبـدأ نـواة الأرض الخارجيـة تقريبـاً عنـد عمـق 2900 كـم تحـت سـطح الأرض، ويبلـغ سـمكها نحـو 2200 كيلومتـر، تتكـون في الغالـب مـن الحديـد السـائل والنيـكل، ويمكـن لهـذه السـبيكة أن توجـد مجـالاً مغناطيسـيّاً هائـلاً لـلأرض وتحافـظ عليـه. إنهـا سـبيكة NiFe شـديدة السـخونة، بـين 4500 درجـة و 5500 درجـة مئويـة، لذلـك فـإن النـواة الخارجيـة موقـع للحمـل الحـراري العنيـف. وهـي تتميـز بلزوجـة منخفضـة جدّاً، ممـا يعنـي أنـه مـن السـهل تشـويهها وقابليتهـا للطـرق.



يدعى الحد الفاصل بين النواة الداخلة والخارجية باسم (انقطاع ليمان)، وهو الجزء الأكثر سخونة من النواة حيث تصل درجات الحرارة إلى 6000 درجة مئوية، وهي ساخنة مثل سطح الشمس.

الأدلة العلمية على أن النواة الخارجية سائلة

اكتشف العلماء أن النواة الخارجية يجب أن تكون سائلةً من خلال مراقبة العديد من الموجات الزلزالية والمجال المغناطيسي للأرض.

بيانات الموجات الزلزالية

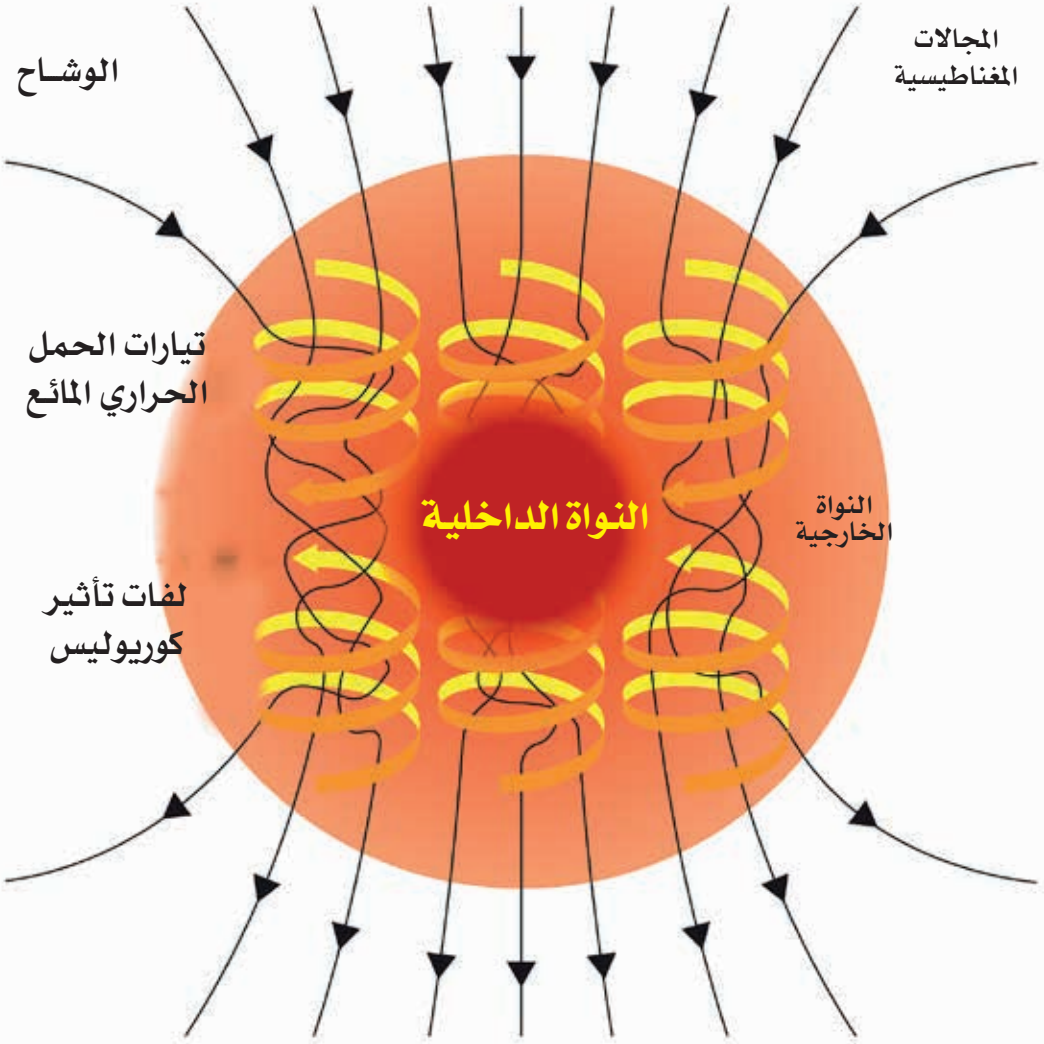
توفر بيانات الزلازل مزيداً من المعلومات حول تكوين مركز الأرض. أثناء حدوث الزلزال، تُطلق الطاقة بشكل موجات تنتقل عبر طبقات الأرض. ويجري تحرير نوعين الموجات هما الموجات الأولية، أي موجات P، والموجات الثانوية (القص)، أي موجات S. يمكن لكلٍ من الموجات P و S أن تنتقل عبر المواد الصلبة، لكن الموجات P الوحيدة يمكنها أن تنتقل عبر السوائل. تُظهر بيانات الموجات الزلزالية أن موجات S لا تمر عبر النواة الخارجية، وبالتالي يجب أن يكون هذا الجزء من باطن الكوكب سائلاً.

لماذا اللب الخارجي للأرض سائل؟ مع خروجنا من اللب الداخلي الصلب، تنخفض درجة الحرارة وينخفض الضغط أيضاً. يجب أن يكون الانخفاض في الضغط كبيراً جدّاً مقارنةً بالانخفاض في درجة الحرارة مع زيادة نصف القطر من اللب. نحو مركز الأرض، تدرجات درجة الحرارة والضغط والكثافة موجبة، ونحن ننتقل من السطح إلى المركز. على الرغم من وجود انقطاعات، في المتوسط، كل هذه تزداد مع العمق. درجة الحرارة الأساسية تزيد على 5500 درجة مئوية تطابق درجة حرارة سطح الشمس. يحمل اللب الخارجي سائلاً منخفض اللزوجة ويتم تصوره. من عمق حوالي 2800 كم إلى 5100 كم. ما

وراء هـذا العمـق تقريبـاً، فهـو نـواة داخليـة كرويـة. يُفتـرض أن المـادة تعـود إلـى صـورة صلبـة عاليـة الكثافـة (13.1 جـم / سـم مكعـب)، بالقُـرْب مـن المركـز، في ظـل ظروف شديدة الحرارة والضغط.

المجـــال المغناطيســـي الأرضـــي

تمتلك الأرض مجالاً مغناطيسيّاً قويّاً يمكن أن يُنسب أيضاً إلى قلب خارجي سائل. إن النواة الخارجية، جنباً إلى جنب مع النواة الداخلية، تشكلان قوة كوريوليس Coriolis Force التي تدعم بشكل دائم البنية المغناطيسية الأرضية للأرض. يتسبب دوران الأرض في دوران النواة الخارجية السائلة في اتجاه معاكس. يمر المعدن السائل للنواة الخارجية عبر مجال مغناطيسي يولد تياراً كهربائيّاً. ومع استمرار تدفق التيار، تتولد قوة مغناطيسية أقوى؛ هذا يخلق دورة ذاتية الاستدامة من القوة المغناطيسية.



رسم تخطيطي يوضح العلاقة بين حركة مائع موصل منظم في لفات بوساطة قوة كوريوليس، والمجال المغناطيسي الذي تولده الحركة. الدليل الذي يثبت أن النواة الخارجية سائلة وليست صلبة.

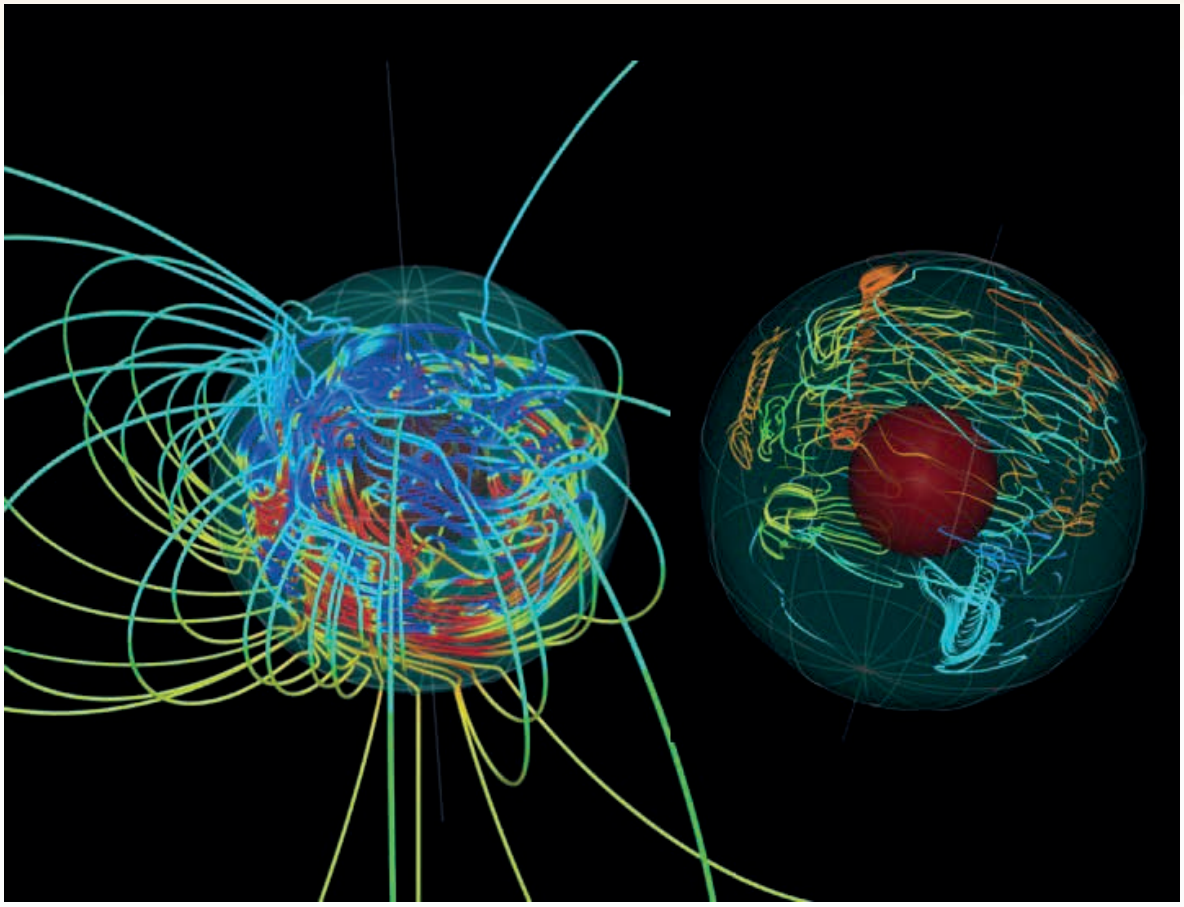
نظريـــــة الجيوديـنـــامـــو GEODYNAMO

تمتلك الأرض مجالاً مغناطيسيّاً ثنائي القطب (شمال وجنوب) قويّاً ينشأ من اللب الخارجي المائع للأرض (المجال الداخلي). يمثل هذا المجال أكثر من 95 % من الطاقة المغناطيسية للمجال المغنطيسي الأرضي المرصود على سطح الأرض.

يمكن تفسير هذا المجال من خلال اللب الخارجي الذي يولد الحقل. لذلك يجب أن يكون اللب الخارجي سائلاً سريعَ التدفق. هذا من شأنه أن يسمح لها بالعمل كدينامو ذاتي التثبيط مع التيارات الحرارية المتصاعدة التي تولد مجالاً كهرومغناطيسيّاً. يجب أن يتكون هذا اللب الخارجي السائل من معادن قادرة على توليد المغناطيسية على سبيل المثال الحديد والنيكل والكوبالت (على الأرجح NiFe – من دليل النيزك).

تؤدي الاختلافات في درجة الحرارة والضغط داخل النواة الخارجية، بالإضافة إلى وجود قوة ناتجة عن دوران الأرض إلى نشأة دوامات من الحديد السائل تسمى تيارات الحمل الحراري Convection Currents التي تُولد تيارات كهربائية، ومن ثمّ تنتج حقول مغناطيسية. تستمر المعادن المشحونة التي تمر عبر هذه الحقول في خلق التيارات الكهربائية الخاصة بها، وبالتالي تستمر الدورة، وتعرف هذه الحلقة باسم (الجيوديناموـ)، ويؤدي محصلة تأثيرها إلى إضافة حقل مغناطيسي شاسع واحد يكتنف الكوكب بأكمله .يُعتقد أن الحرارة الناتجة عن الاضمحلال الإشعاعي في اللب تؤدي إلى حركة الحمل الحراري. وينتج التيار الكهربائي بدوره حقلاً مغناطيسيّاً يتفاعل أيضاً مع حركة السوائل لإنشاء مجال مغناطيسي ثانوي. يعد الحقلان معاً أقوى من المجال الأصلي ويقعان أساساً على طول محور دوران الأرض.

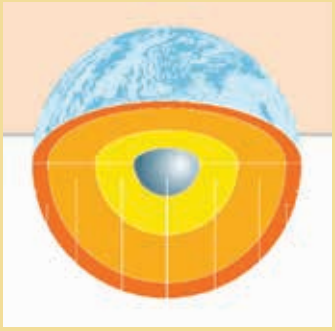
من المعروف أن خطوط المجال المغناطيسي لا تتقاطع. يوجد للشمس مجال مغناطيسي ينظم بها المجموعة الشمسية، وتم تمييز خطوط مجال مغناطيسى من البلازما الشمسية على سطح الشمس، وعندما تتقاطع هذه الخطوط عند مناطق البقع الشمسية Solar Spots، تتولد طاقة هائلة من الجسيمات المشحونة كهربائياً التي تنطلق في الفضاء نحو كوكبنا، وتسمى بـ المقذوفات الأكليلية – Coronal Mass Ejection) أو تُختصر (CME) مكوَنة العاصفة الشمسية. يخلق الحقل المغناطيسي للأرض بِنَية تسمى الغلاف المغناطيسي – Magnetosphere، الذي يحيط بكوكبنا، فعندما يتأثر الغلاف المغناطيسي بجزيئات مشحونة من الفضاء مثل المقذوفات الإكليلية، فإنه يقوم بتحريف هذه الجسيمات بعيداً عن سطح الأرض، وهذا يحمينا من مخاطر التعرض للكثير من هذه الجسيمات. عند اصطدام المقذوفات الشمسية بالغلاف المغناطيسي للأرض تؤدي إلى انضغاطه بدرجة معينة، فيُرغِم هذه الجسيمات أن تسير مع خطوط الحقل المغناطيسي الأرضي باتجاه القطبين الشمالي والجنوبي، فيعلق جزء منها عند قطبي الكوكب، كما ينتقل جزء من طاقتها إلى الغلاف الجوي؛ مما يؤدي إلى اكتساب الإلكترونات طاقة؛ فتصعد إلى مستويات طاقة أعلى، وعند عودتها إلى مستويات طاقتها الأصلية تطلق إشعاعاً يظهر في المناطق القطبية الشمالية والجنوبية مقدمةً عروضاً لونيةً زاهيةً في السماء والمعروفة باسم (الشفق القطبي).



لقطة من نتائج محاكاة الجيودينامو. اليسار هو خطوط المجال المغناطيسي عبر اللب الخارجي، واليمين هو الانسيابية لتدفق الحمل الحراري في اللب الخارجي.

تتفاعل الجسيمات المشحونة مع المجالات المغناطيسية. تشكل حركات الجسيمات المشحونة في الدوائر مجالات مغناطيسية خاصة بها. نتيجة لذلك، عندما يصطدم كلا المجالين المغناطيسي مع بعضهما البعض، يمتص المجال المغناطيسي للأرض زخم الجسيمات المشحونة، وهذا يدفع المجال المغناطيسي

للأرض للخلف. تريد الأرض أن تصنع مجالاً مغناطيسيّاً متساوياً، لكن الشمس تدفع المجالات المغناطيسية بعيداً عن الشمس. هناك أوقات تكون فيها الرياح الشمسية قوية بما يكفي للتغلب على المجال المغناطيسي. ينزلق الجسيم المشحون على طول الحقل إلى القطبين، وعندما يكون قويّاً بدرجة كافية، يدخل الغلاف الجوي بالقُرْب من قطبي الأرض، ويؤين الغلاف الجوي. هذا يؤدي إلى مشهد جميل يسمى Aurora Borealis Australis.

حقائق علمية مدهشة	طريقة الجيونوترينوات
	واحدة من أكثر الطرائق غرابة التي يدرس علماء الجيولوجيا النواة فيها هي من خلال الجيونوترينوات Geoneutrinos. وهي نيوترينوات، أخف جسيم دون ذري، ينطلق من التحلل الإشعاعي الطبيعي للبوتاسيوم والثوريوم واليورانيوم في باطن الأرض. من خلال دراسة الجيونوترينوات، يمكن للعلماء أن يفهموا بشكل أفضل التركيب والتوزيع المكاني للمواد في الوشاح والنواة.

النـــــــواة الداخليـــــة

تظهـر الدراسـات الجيوفيزيائيـة أن النـواة الداخليـة تتصـرف كجسـم صلـب، لكنـه كثيـف جـدّاً، تبلـغ كثافتـه نحـو 16 غـرام / سـم مكعـب (علـى غِـرار الخَصائـص الفيزيائيـة لحجـر النيـكل النيزكـي). يبلـغ قطـر المنطقـة الداخليـة من النـواة الداخليـة نحـو (1180 كم) وتشـكل 0.08 % من حجم الأرض.

مـع أن النـواة الداخليـة بيضـاء حـارّة، إلا أن الضغـط مرتفـع جـدّاً ولا يمكـن للحديـد أن ينصهـر. إذْ يبلـغ الضغـط في النـواة الداخليـة مـا يقـرب مـن 3.6 مليـون ضغـط الغـلاف الجـوي. وتحـت هـذا الضغـط يمكـن للمـواد أن تعمـل بشـكل مختلـف تمامـاً عـن الظـروف العاديـة. حيـث يمنـع الضغـط الشـديد للنـواة الداخليـة الحديـد مـن الانصهـار. الضغـط والكثافـة أكبـر مـن أن تنقـل ذرات الحديـد إلـى الحالـة السـائلة. بسـبب هـذه المجموعـة غيـر العاديـة مـن الظـروف، يفضـل بعـض الجيوفيزيائيـين تفسـير النـواة الداخليـة ليـس علـى أنهـا صلبـة، وإنمـا علـى أنهـا بلازمـا تتصـرف كمـادة صلبـة؛ أي أنهـا أشـبه بمعجـون الأسـنان.

تخضـع الطبيعـة الدقيقـة للنـواة الداخليـة لنقـاش كبيـر بـين العلمـاء؛ ففـي درجـات الحـرارة، علـى سـبيل المثـال، لا يمكـن حسـابها إلا مـن خـلال الدراسـات التجريبيـة لكيفيـة انصهـار المـواد وتصلبهـا تحـت الضغـط. بشـكل عـام، فدرجـات الحـرارة تتـراوح بـين 4400 و6000 درجـة مئويـة. ومـع ذلـك، يجـب أن تذهـب هـذه الحـرارة في قلـب الأرض إلـى مـكان مـا، ويعتقـد العلمـاء أنهـا تـدور في تيـارات عبـر الوشـاح، تمامـاً مثـل حـرارة الموقـد التـي تحـرك محلـول القطـران الثقيـل حولهـا.

النواة الداخلية هي خليط من الحديد والنيكل ممزوجة بعناصر أخف. كما أنّ الضغط في المركز مرتفع جدّاً بحيث يبقي النواة الداخلية صلبةً.

نِصفي الكرة في اللب الداخلي
تماماً مثل برتقالة مقطعة إلى نصفين

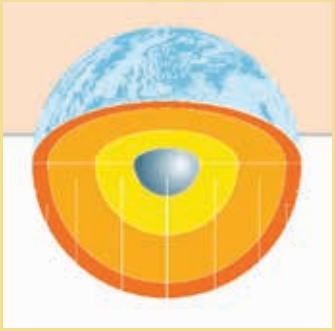
الكارثـــــة الحديديـــــــة

عمر كوكب الأرض أقدم من عمر نواته. عندما تشكلت الأرض منذ نحو 4.5 بليون سنة، كانت كرة موحدة من الصخور الساخنة. وقد تسبب الاضمحلال الإشعاعي والحرارة المتبقية من تكوين الكواكب (الاصطدام، والتراكم، وضغط الصخور الفضائية) في زيادة سخونة الكرة. في النهاية، بعد نحو 500 مليون سنة، ارتفعت درجة حرارة كوكبنا الشاب إلى درجة انصهار الحديد، أي نحو 1538 درجة مئوية. تسمى هذه اللحظة الفاصلة في تاريخ الأرض بالكارثة الحديدية Iron Catastrophe.

لقد سمحت الكارثة الحديدية بحركة أكبر وأسرع للمواد الصخرية المنصهرة للأرض. بقيت المواد شديدة الطفو، مثل السيليكات والماء وحتى الهواء، قريبة من السطح الخارجي للكوكب. وشكلت هذه المواد الوشاح والقشرة في وقت مبكر. انجذبت قطرات من الحديد والنيكل والمعادن الثقيلة الأخرى إلى مركز الأرض، لتصبح النواة المبكرة. هذه العملية المُهمَّة تسمى التمايز الكوكبي Planetary Differentiation.

ويعتقد علماء الجيولوجيا أن بلورات الحديد في النواة الداخلية مرتبة وفق النمط (hcp) أي سداسي الشكل الممتلئ قريباً. حيث تتحاذى البلَّورات بين الشمال والجنوب، جنباً إلى جنب مع محور دوران الأرض والمجال المغناطيسي.

يعني اتجاه التركيب البلَّوري أن الموجات الزلزالية - الطريقة الأكثر موثوقية لدراسة النواة - تسافر بشكل أسرع عندما تتجه شمالاً إلى جنوباً مقارنةً بالذهاب شرقاً غرباً. تنتقل الموجات الزلزالية من القطب إلى القطب بمعدل أربع ثوانٍ أسرع مما تنتقل عبر خط الاستواء.

حقائق علمية مدهشة	كنـز مدفـــــــون
	مع أن النواة الداخلية للأرض في الغالب من النيكل والحديد، إلا أن الكارثة الحديدية دفعت أيضاً العناصر الثقيلة من الحديد إلى مركز الأرض. في الواقع، قدر أحد علماء الجيولوجيا أن هناك 1.6 كوادريليون طن من الذهب في القلب، وهذا يكفي لتذهيب سطح الكوكب بأكمله بسمك نصف متر.

الأدلـــــة العلميـــة على أن النـــــواة الداخليـــة صلبـــة

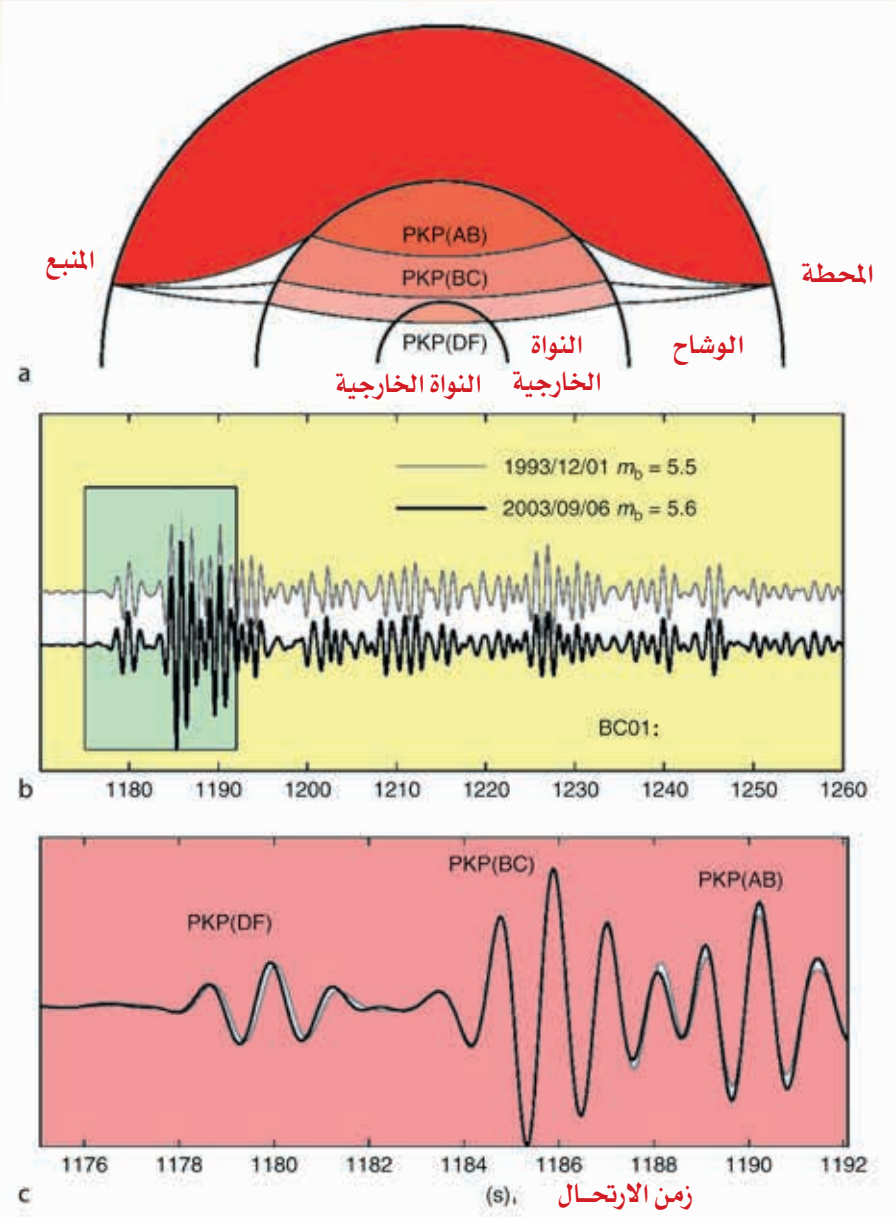
من المقبول على نطاق واسع أن النواة الداخلية للأرض صلبة؛ ولطالما حاول علماء الزلازل العثور على دليل مباشر على هذا التأكيد، الذي يمكن أن يأتي في شكل تحديد نـــــــوع معين من الموجـــــات الزلزالية، تسمى (موجة القص)، التي تنتقـــــل عبر النـــــواة الداخليـــــة. لذا فإن الموجـــــة التي تمر عبرها كلها تسمى PKJKP.

يرسل الزلزال موجات زلزالية في جميع الاتجاهات. أحياناً تكون موجات السطح واضحة بشكل مخيف. تُدرس الموجات الزلزالية التي تمر عبر الوشاح وتعبر جزءاً كبيراً من باطن الكوكب بشكل روتيني عندما تصل إلى قارة أخرى. لكن لم يكشف أي موجة من PKJKP بشكل موثوق حتى الوقت الحالي.

تكمن الحيلة في اكتشاف موجة PKJKP في ملاحظة التغييرات التي تمر بها؛ لأنها تهتز من جانب واحد من كوكب الأرض إلى الجانب الآخر. ما يبدأ كموجة ضغط يتغير إلى ما يسميه العلماء موجة القص.

تمر PKJKP عبر النواة الداخلية كموجة قص، لذلك فإن هذا هو الدليل المباشر على أن النواة الداخلية صلبة؛ لأنه فقط في المادة الصلبة يمكن أن توجد موجة القص. أما في المادة السائلة، كما في حالة الماء، فإن الموجة الانضغاطية يمكن أن تنتقل عبرها فقط.

يتوافق وقت وصول الموجات وبطئها مع التوقعات النظرية لموجات PKJKP، مما يشير إلى وجود نواة صلبة.



الدوران التفاضلي للنواة الداخلية للأرض يدل على أنها صلبة. تظهر مسارات الأشعة لموجات PKP ومثال على شكل الموجة المزدوجة المستخدمة لاكتشاف التغيير الزمني لأوقات السفر عبر النواة الداخلية.

a. **تتحول مسارات الأشعة لثلاثة فروع** من موجات PKP إلى النواة الداخلية الصلبة (DF)، وقاع النواة الخارجية السائلة (BC)، والنواة الوسطى الخارجيـــة (AB).

b. **جرى تسجيل أشكال موجية متشابهة** جدّاً في محطة واحدة في ألاسكا من شكل موجة مزدوج من جزر ساندويتش الجنوبية. يفصل بين الحدثين 10 **سنوات**، أحدهما في عام 1993م والآخر في عام 2003.

c. **أشكال موجة PKP متراكبة وموسعة** من المربع في (B). يجري محاذاة الموجات عبر النواة الخارجية (BC و AB)، لكن الموجة عبر النواة الداخلية (DF) تظهر تحولاً زمنيّاً صغيراً (نحو 0.1 ثانية).

نمـــو النـــواة الداخليـــة

عندما تبرد الأرض بأكملها ببطء، تنمو النواة الداخلية نحو مليمتر كل عام. وتنمو النواة الداخلية عندما تتصلب أو تتبلور أجزاء من النواة الخارجية السائلة. بكلمة أخرى إنها تتجمد، مع أنه من المهم أن نتذكر أن نقطة تجمد الحديد أكثر من 1000 درجة مئوية.

إن نمو النواة الداخلية غير منتظم. فهو يحدث بشكل كتل وعناقيد، ويتأثر بالنشاط في طبقة الوشاح. كما يتركز النمو بشكل أكبر حول مناطق الاندساس، على ارتفاع آلاف الكيلومترات فوق النواة. تسحب الصفائح مندمجة الحرارة من القلب وتبرّد المنطقة المحيطة، مما يتسبب في زيادة حالات التصلب. يتركز

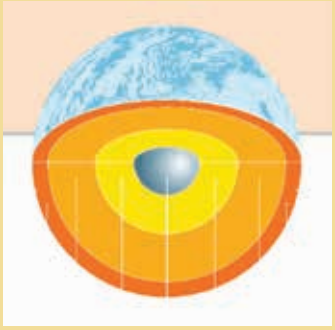
النمو بشكل أقل حول (العناصر الفائقة) أو LLSVPs. هذه الكتل المتضخمة من صخور الوشاح شديدة السخونة تؤثر على الأرجح على النشاط البركاني أو (البقع الساخنة) في الغلاف الصخري، وتساهم في تكوين نواة خارجية أكثر سيولة.

لكن علينا أن نطمئن بأن النواة الداخلية لن تتجمد أبداً. إذْ أنّ عملية التبلور بطيئة جدّاً، كما أنّ التحلل الإشعاعي المستمر لباطن الأرض يبطئها أكثر. يقدر العلماء أن النواة سوف تستغرق نحو 91 بليون سنة حتى تصلب تماماً، لكن الشمس سوف تتخامد في جزء صغير من ذلك الوقت (نحو 5 بلايين سنة). عندها لن يكون هناك أحد على الأرض ليقلق بشأن تجمد نواتها!

تنقسم النواة الداخلية إلى نصفين شرقي وغربي. لكن لا ينصهر نصفا النواة الداخلية بالتساوي، ولها هياكل بلّورية مميزة. ويبدو أن نصف النواة الغربي يتبلور بسرعة أكبر من نصف الكرة الشرقي. في الواقع، قد ينصهر النصف الشرقي من النواة الداخلية.

لقد اكتشف علماء الجيولوجيا مؤخراً أن النواة الداخلية نفسها لها نواة بداخلها. يعتقد العلماء أن تغيراً جيولوجيّاً جذريّاً منذ نحو 500 مليون سنة تسبب في تطور هذا النواة الداخلية.

بلورات النواة الداخلية تتجه من الشرق إلى الغرب بدلاً من الشمال والجنوب. ولا تحدث محاذاة لهذا الاتجاه مع محور دوران الأرض أو المجال المغناطيسي. يعتقد العلماء أن بلورات الحديد قد يكون لها بنية مختلفة تماماً (وليس hcp)، أو توجد في مرحلة مختلفة.

حقائق علمية مدهشة	نمـــــو غريب
	ينمو مركز الحديد الصلب في نواة الأرض بشكل أسرع من الجانب الآخر. ولا يستطيع الخبراء تفسير السبب.

دوران النواة الداخلية

تدور النواة الداخلية للأرض، مثل الأرض ككل، ولكن ليس بالطريقة نفسها تماماً مثل بقية أجزاء الأرض. إنها في الواقع تدور بشكل أسرع قليلاً من بقية الكوكب، حيث اكتسبت ما يقرب من عُشر دورة في الثلاثين عاماً الماضية. تظهر الدراسة المتأنية للموجات الزلزالية من الزلازل في جزر ساوث ساندويتش قبالة الطرف الجنوبي لأمريكا الجنوبية التي جرى اكتشافها في ألاسكا ذلك التأثير. فقد جرى الكشف عن ذلك بسبب تباين الخواص بين الشمال والجنوب في النواة الداخلية.

نظراً لأن النواة الداخلية تتقدم على بقية أجزاء الأرض، فإن التأثير الناتج عن هذا التباين يتغير. وصلت الموجات الزلزالية التي اجتازت خارج النواة الداخلية مباشرة إلى ألاسكا في عام 1995م بالسرعة نفسها التي كانت عليها في عام 1967م. لكن الموجات التي مرت عبر النواة الداخلية جعلت الرحلة أسرع بمقدار 0.3 ثانية في عام 1995م مقارنة بعام 1967م، مما يدل على أن محور المسار السريع يؤرجح النواة الداخلية في محاذاة قدرها 1.1 درجة في السنة. كما تشكل التيارات النفاثة في الغلاف الجوي شداً مغناطيسياً على النواة الداخلية.

يفصل سائل النواة الخارجية النواة الداخلية عن بقية الأرض، ونتيجة لذلك، تدور النواة الداخلية بشكل مختلف قليلاً عن بقية الكوكب. إنها تدور باتجاه الشرق، مثل السطح، ولكن أسرع قليلاً، مما يؤدي إلى دوران إضافي كل 1000 عام تقريباً.

لماذا لا تصهر نواة الأرض كوكب الأرض؟

بمعنى آخر: إذا كانت نواة الأرض ساخنة جدّاً مثل سطح الشمس، فلماذا لا تنصهر الأرض؟ ولماذا لا تقتلنا جميعاً؟

ذكرنا أن النواة محاطة بغطاء صخري صلب في الغالب. القشرة التي نعيش عليها تطفو على الوشاح وتمنحنا حماية أكثر من المساحة الفارغة. لكن أهم سبب لعدم انصهارنا جميعاً هو الفرق بين الحرارة ودرجة الحرارة. بشكل تقريبي، الحرارة هي طاقة ودرجة الحرارة هي كمية الطاقة المحصورة في حجم معين.

للتبسيط يمكن أن تصل درجة حرارة شرارة الألماسة Sparkler [نوع من أنواع الألعاب النارية] إلى 1500 درجة مئوية، لكنها لن تؤذيك في الواقع. من ناحية أخرى، فإن الاستحمام بالماء المغلي عند 100 درجة مئوية قد يقتلك. هذا لأن الحمام يحوي على طاقة حرارية أكثر بكثير.

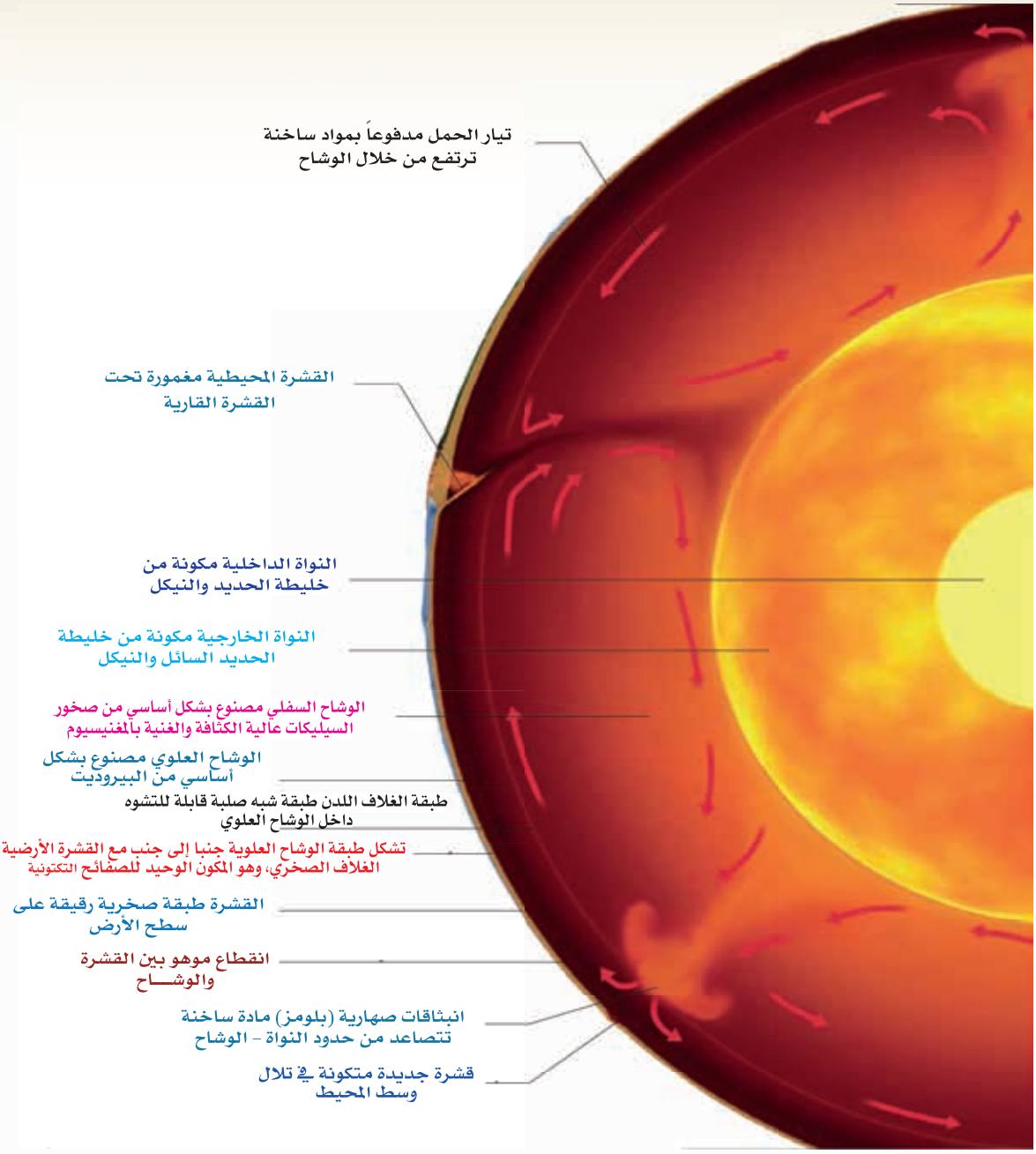
قياس درجة حرارة نواة الأرض

يقيس التدرج الحراري الأرضي زيادة الحرارة والضغط في باطن الأرض. يبلغ التدرج الحراري الأرضي نحو 25 درجة مئوية لكل كيلومتر من العمق. العوامل الرئيسة المساهمة في الحرارة في النواة هي تحلل العناصر المشعة، والحرارة المتبقية من تكوين الكواكب، والحرارة المنبعثة عندما تتصلب النواة الخارجية السائلة بالقُرب من حدودها مع النواة الداخلية.

كلما تعمقت، ازدادت درجة الحرارة، لكن ما مدى سخونة نواة الأرض؟ الجواب هو أنه عند الحدود بين النواة الخارجية المنصهرة والنواة الداخلية الصلبة للأرض، يجب أن تكون درجة الحرارة عند نقطة انصهار الحديد بالضبط. لكن درجة انصهار الحديد تحت تلك الضغوط الهائلة ستكون مختلفة تماماً عن قيمتها على سطح الأرض. لمعرفة ما هو عليه الوضع، يجب على العلماء إعادة إنشاء تلك الظروف في مختبراتهم أو حسابها من الناحية النظرية.

لقد جربوا طريقتين عمليتين مختلفتين: الأولى باستخدام عينات صغيرة محصورة بين سندان ماسي، والأخرى باستخدامٍ مسدس غاز مضغوط عملاق متعدد المراحل لضغط العينات للحظة فقط. نظراً للصعوبات في تحقيق مثل هذه الضغوط المذهلة – 330 غيغاباسكال عند حدود النواة الداخلية – وبسبب صعوبة معايرة الضغط حتى تعرف متى وصلت إلى هناك، لا يزال يتعين على كلتا الطريقتين قياس درجة الحرارة هذه بشكل مباشر.

ما يمكنهم فعله هو قياس درجة انصهار الحديد عند ضغوط منخفضة قليلاً ومحاولة الاستقراء لأسفل. لكن لا تزال هناك صعوبات. ليس أقلها أنّ النواة ليست من الحديد النقي، والشوائب يمكن أن تؤثر على نقطة الانصهار. وضعت الحسابات النظرية حد النواة الداخلية عند نحو 6500 درجة مئوية للحديد النقي، وربما 5100 – 5500 درجة مئوية للحديد مع النطاق المحتمل للشوائب في النواة.



يُعتقد أن الطاقة الحرارية المتدفقة من نواة الأرض تؤدي إلى حركات بطيئة ودائرية وحملية للمواد داخل الوشاح (الأسهم الحمراء). ويعتقد أن هذه الطاقة بدورها تقود حركة الصفائح التكتونية على سطح الأرض.

التصوير المقطعي الزلزالي Seismic Tomography

التصوير المقطعي الزلزالي هو تقنية لتصوير باطن الأرض بالموجات الزلزالية الناتجة عن الزلازل أو الانفجارات. يمكن استخدام الموجات P- و S- والموجات السطحية لنماذج التصوير المقطعي بدرجات دقة مختلفة بناءً على الطول الموجي الزلزالي ومسافة مصدر الموجة وتغطية مصفوفة جهاز قياس الزلازل. تُستخدم البيانات الواردة في أجهزة قياس الزلازل لحل مشكلة عكسية، حيث يتم تحديد مواقع انعكاس وانكسار مسارات الموجات. يمكن استخدام هذا الحل لإنشاء صور ثلاثية الأبعاد للاختلالات في السرعة، التي يمكن تفسيرها على أنها اختلافات هيكلية أو حرارية أو تركيبية. يستخدم علماء الجيولوجيا هذه الصور لفهم العمليات التكتونية الأساسية والصفائح بشكل أفضل. تعتمد سرعة انتقال الأمواج على نوع المادة التي تنتقل عبرها. تنتقل الموجات بشكل أسرع عبر المواد الباردة والقاسية، مثل الصفيحة التي تنغمس في الوشاح، وأبطأ من خلال المواد الأكثر دفئاً، مثل الصخور الساخنة التي ترتفع إلى السطح.

النظـــريـــة

تم حل التصوير المقطعي كمشكلة عكسية. تتم مقارنة بيانات وقت السفر الزلزالية بنموذج الأرض الأولي ويتم تعديل النموذج حتى يتم العثور على أفضل ملاءمة ممكنة بين تنبؤات النموذج والبيانات المرصودة. تنتقل الموجات الزلزالية في خطوط مستقيمة إذا كانت الأرض ذات تكوين موحد، لكن الطبقات التركيبية والبنية التكتونية والتغيرات الحرارية تعكس الموجات الزلزالية وتخترقها. يمكن حساب موقع وحجم هذه الاختلافات من خلال عملية الانعكاس، على الرغم من أن حلول الانقلاب المقطعي ليست فريدة من نوعها.

التصوير المقطعي الزلزالي مشابه للتصوير المقطعـــــي بالأشعة السينيـــــة الطبية (CT Scan) من حيث أن الكمبيوتر يعالج بيانات جهاز الاستقبال لإنتاج صورة ثلاثية الأبعاد، على الرغم من أن التصوير المقطعي المحوسب يستخدم التوهين بدلاً من اختلاف وقت السفر. يجب أن يتعامل التصوير المقطعي الزلزالي مع تحليل مسارات الأشعة المنحنية التي تنعكس وتنكسر داخل الأرض وعدم اليقين المحتمل في موقع مركز الزلزال. تستخدم الأشعة المقطعية الأشعة السينية الخطية ومصدر معروف.

المعـــالجـــــة

يستخدم التصوير المقطعي الزلزالي السجلات الزلزالية لإنشاء صور ثنائية وثلاثية الأبعاد للشذوذ تحت السطحي عن طريق حل المشكلات العكسية الكبيرة مثل التي تولد نماذج متوافقة مع البيانات المرصودة. تُستخدم طرق مختلفة لحل الانحرافات في القشرة والغلاف الصخري، والعباءة الضحلة، والعباءة الكاملة، واللب بناءً على توافر البيانات وأنواع الموجات الزلزالية التي تخترق المنطقة بطول موجة مناسب لتحليل الميزة. دقة النموذج محدودة بتوافر ودقة البيانات الزلزالية ونوع الموجة المستخدمة والافتراضات الواردة في النموذج.

تُستخدم بيانات الموجة P في معظم النماذج المحلية والنماذج العالمية في المناطق ذات الكثافة الكافية من الزلازل وجهاز قياس الزلازل. تُستخدم بيانات S- وبيانات الموجات السطحية في النماذج العالمية عندما لا تكون هذه التغطية كافية، كما هو الحال في أحواض المحيطات وبعيداً عن مناطق الاندساس. تعد أوقات الوصول الأول هي الأكثر استخداماً، ولكن يتم استخدام النماذج التي تستخدم الأطوار المنعكسة والمنكسرة في نماذج أكثر تعقيداً، مثل تلك التي تصور القلب. يتم أيضاً استخدام أوقات السفر التفاضلية بين أطوار الموجة أو الأنواع.

التطبيـــــــق

يمكن للتصوير المقطعي الزلزالي حل التباين وعدم المرونة والكثافة وسرعة الصوت. قد تكون الاختلافات في هذه المعلمات نتيجة للاختلافات الحرارية أو الكيميائية، التي تُعزى إلى عمليات مثل أعمدة الوشاح، والألواح المندسة، وتغيرات الطور المعدني. تشمل الميزات الأكبر حجماً التي يمكن تصويرها باستخدام التصوير المقطعي السرعات العالية تحت الدروع القارية والسرعات المنخفضة تحت مراكز انتشار المحيط.

البقـع الســـــاخنة Hot Spots

تقترح فرضية عمود الوشاح أن مناطق النشاط البركاني التي لم يتم تفسيرها بسهولة بواسطة الصفائح التكتونية، والتي تسمى النقاط الساخنة، هي نتيجة للانبعاث الحراري من أعمـــــــاق حد الوشـــــــاح الأســـــاسي الذي أصبح حفاضات Diapir في القشرة. هذه نظرية مثيرة للجدل، على الرغم من أن الصور المقطعية تشير إلى وجود حالات شاذة تحت بعض النقاط الساخنة. أفضل ما تم تصويره هو المقاطعات الكبيرة ذات سرعة القص المنخفضة، أو الأعمدة الفائقة، التي يمكن رؤيتها على نماذج الموجة S في الوشاح السفلي ويعتقد أنها تعكس الاختلافات الحرارية والتركيبية.

مناطـــق الاندســـــاس

الصفائح المندرجة أبرد من الوشاح الذي تتحرك إليه. هذا يخلق شذوذاً سريعاً يمكن رؤيته في الصور المقطعية. تم تصوير كل من صفيحة فارالون التي هبطت تحت الساحل الغربي لأمريكا الشمالية والجزء الشمالي من الصفيحة الهندية التي هبطت تحت آسيا بالتصوير المقطعي.

العيـــــــوب

توسعت شبكات الزلازل العالمية بشكل مطرد منذ الستينيات، لكنها لا تزال مركزة في القارات والمناطق النشطة زلزاليّاً. المحيطات، ولا سيما في نصف الكرة الجنوبي، غير مغطاة بالقدر الكافي. ستتحسن النماذج المقطعية في هذه المناطق عند توفر المزيد من البيانات. يؤدي التوزيع غير المتكافئ للزلازل بشكل طبيعي إلى تحيز النماذج إلى دقة أفضل في المناطق النشطة زلزاليّاً.

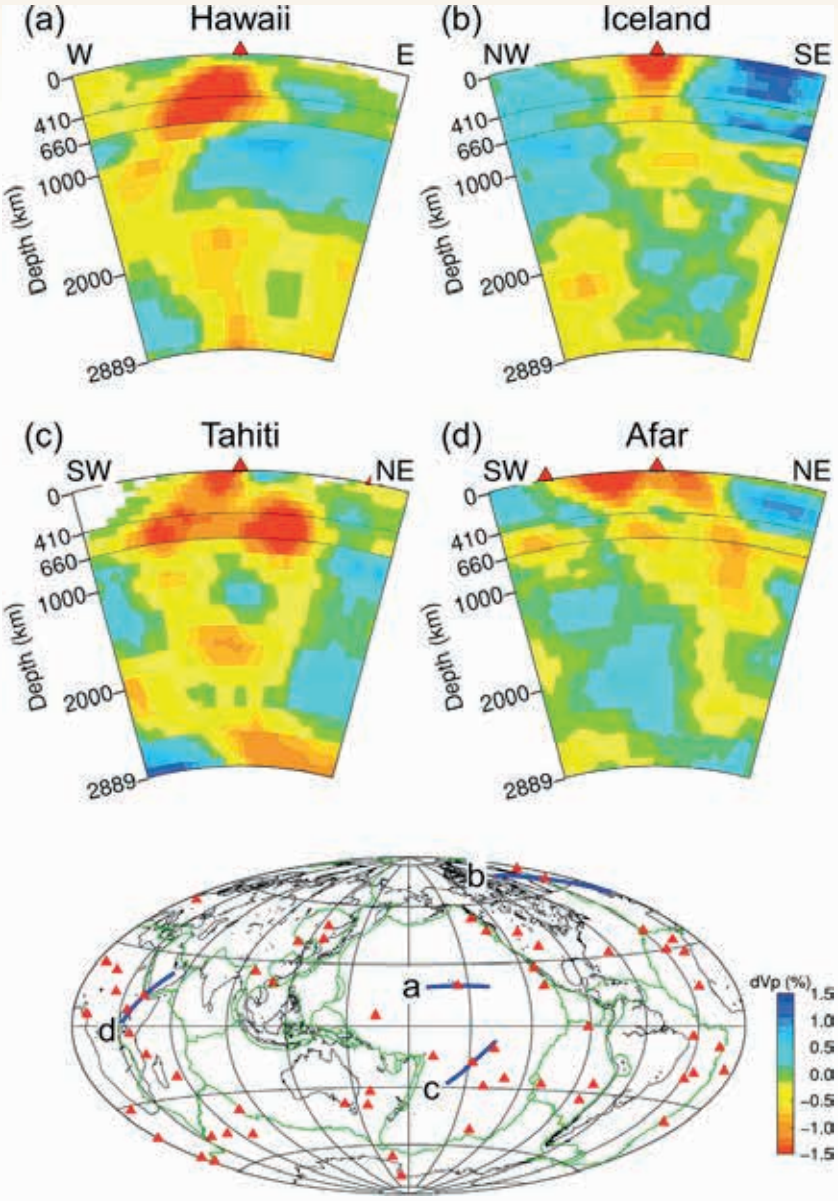
يحد نوع الموجة المستخدمة في النموذج من الدقة التي يمكن أن تحققها. الأطوال الموجية الأطول قادرة على اختراق عمق الأرض، ولكن لا يمكن استخدامها إلا لحل الميزات الكبيرة. يمكن تحقيق دقة أدق باستخدام الموجات السطحية، مع مقايضة عدم إمكانية استخدامها في نماذج الوشاح العميق. يؤدي التباين بين الطول الموجي ومقياس الميزة إلى ظهور حالات شاذة ذات حجم منخفضين في الصور. تستجيب نماذج P- و S-wave بشكل مختلف لأنواع الحالات الشاذة اعتماداً على خاصية مادة القيادة. تفضل النماذج المستندة إلى وقت الوصول الأول بشكل طبيعي المسارات الأسرع، مما يتسبب في انخفاض دقة النماذج القائمة على هذه البيانات للميزات البطيئة (الساخنة غالباً). يجب أن تأخذ النماذج الضحلة أيضاً في الاعتبار التغيرات الكبيرة في السرعة الجانبية في القشرة القارية.

يوفر التصوير المقطعي الزلزالي الحالات الشاذة الحالية فقط في السرعة. أي هياكل سابقة غير معروفة ومعدلات الحركة البطيئة في باطن الأرض (مم إلى سم في السنة) تمنع دقة التغييرات على النطاقات الزمنية الحديثة.

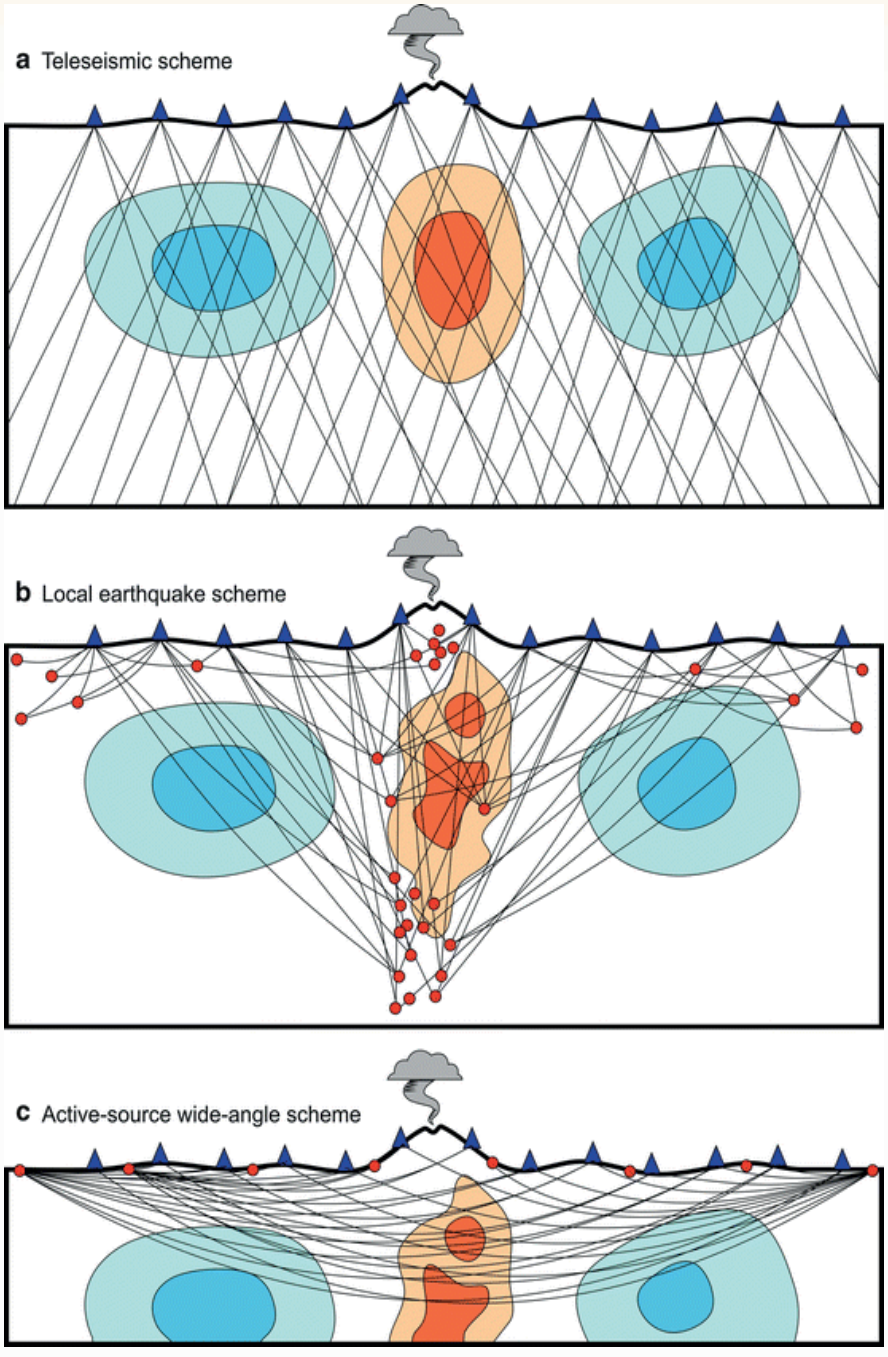
حلول التصوير المقطعي ليست فريدة من نوعها. على الرغم من أنه يمكن استخدام الأساليب الإحصائية لتحليل صحة النموذج، فإن عدم اليقين الذي لا يمكن حله لا يزال قائماً. هذا يساهم في صعوبة مقارنة صحة نتائج النموذج المختلفة.

تحد القدرة الحاسوبية من كمية البيانات الزلزالية وعدد المجهول وحجم الشبكة والتكرارات في نماذج التصوير المقطعي. هذا له أهمية خاصة في أحواض المحيطات، التي بسبب تغطية الشبكة المحدودة وكثافة الزلازل تتطلب معالجة أكثر تعقيداً للبيانات البعيدة. تتطلب النماذج المحيطية الضحلة أيضاً حجماً شبكيّاً أصغر للنموذج نظراً لقشرة القشرة الرقيقة.

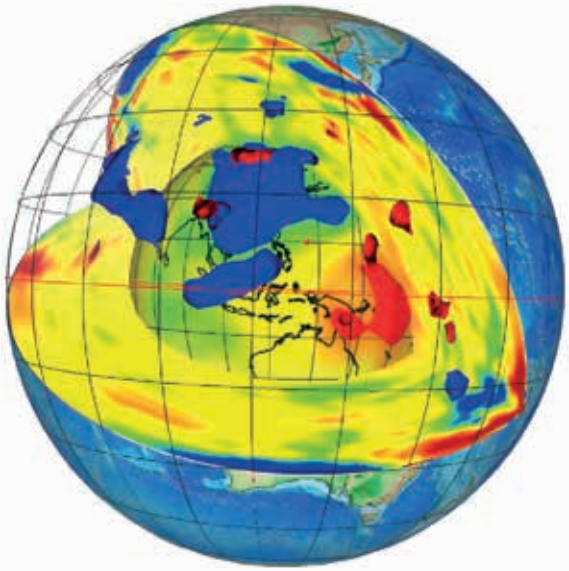
عادةً ما يتم تقديم الصور المقطعية مع منحدر لوني يمثل قوة الحالات الشاذة. ينتج عن ذلك إجراء تغييرات متساوية تظهر بأحجام مختلفة بناءً على الإدراك البصري للون، مثل التغيير من البرتقالي إلى الأحمر الذي يكون أكثر دقة من الأزرق إلى الأصفر. يمكن أن تؤدي درجة تشبع اللون أيضاً إلى انحراف التفسيرات بصريّاً. يجب مراعاة هذه العوامل عند تحليل الصور.



المقاطع العرضية الرأسية للتصوير المقطعي على شكل V أسفل (أ) هاواي، (ب) أيسلندا، (ج) تاهيتي و (د) النقاط الساخنة لعفار (مثلثات حمراء) على طول الملامح الأربعة كما هو موضح في خريطة العالم. تشير الخطوط الخضراء على الخريطة إلى حدود اللوحة.


a Teleseismic scheme
b Local earthquake scheme
c Active-source wide-angle scheme

بالنسبة للبراكين، يبدو أن إحدى المعاملات الرئيسة هي نسبة Vp / Vs التي يمكن استخدامها لتقييم محتوى السوائل والذوبان. إلى جانب توزيعات السرعة، قد يوفر التصوير المقطعي الزلزالي معلومات عن تباين البارامترات الزلزالية التي تساعد في دراسة الضغوط الإقليمية والتركيبات الجيولوجية الفضائية.



توفر اليوم تقنية التصوير المقطعي الزلزالي المحوسب صوراً لشرائح باطن الأرض من خلال تحليل حركة الموجات الزلزالية. يمكن استخدامه لتتبع عمليات مثل الحمل الحراري في الوشاح. هنا تصوير مقطعي زلزالي محوسب تحت اليابان.

كما يكشف التصوير الزلزالي عن سمات أصغر تشبه انبثاقاً صهاريّاً يمتد إلى أعلى في الروافد العُليا من الوشاح تحت أيسلندا وهاواي، وهو ما قد يفسر وجود هاتين الجزيرتين ونشاطهما البركاني.

التذبذب الحر للأرض Free Oscillation of the Earth

لقد بشر زلزال شيلي العنيف الذي حدث في مايو عام 1960م بتطورات هامة في مجال دراسات باطن الأرض. بالإضافة إلى الموجات P ، S والموجات السطحية التي انبعثت منه اكتشف ولأول مرة في التاريخ سلسلة من التذبذب الحر للأرض كلها. إن هذا الزلزال قد هز الأرض كوحدة مستقلة كالجرس تماماً. وفي عام 1935م تمكن العالم بنيوف من تطوير جهاز سيزموجراف (جهاز التقاط موجات الزلازل وتسجيلها) قادر على الكشف عن التغير في الانفعال في الأرض وأمكن تسجيل الحركات الأرضية ذات الزمن الدوري الذي في حدود ساعة أو أكثر. وفوراً بعد الزلزال الكبير في جزيرة كمشاتكنا في شرقي سيبريا في عام 1952م أوضحت تسجيلات أحد الأجهزة اهتزازات زمنها الدوري تقريباً ساعة وعزاها بنيوف إلى التذبذب الحر للأرض. تعطي الأجراس أصواتاً نتيجة لتداخل أنواع عديدة من اهتزازاتها. والأرض تشبه ذلك فإنها تهتز بأنظمة عديدة عند إثارتها بطريقة مناسبة. واهتزازاتها تنخرط تحت نموذجين الأول كروي والثاني التوائي ولكل منهما عدة طرازات أساسية ذات أنغام عديدة. وزمن الذبذبة لا بُدَّ وأن يعطي قيمة معها يجب أن تتفق توزيعات كثافة الأرض وعدم انضغاطيتها وصلابتها. هذا وبينما بيانات الموجات P ، S تعطي قيماً لمعاملات المرونة والكثافة فإن التذبذب الحر غير مرتبط بكل قيمة لهذه المعاملات على حدة.

بيانات التذبذب الحر للأرض قد ساهمت في الحصول على دلائل تؤكد صلابة اللب الداخلي للأرض وذلك وجود المنطقة الانتقالية . توضح نتائج التذبذب الحر للأرض أن أنسب قيمة ممثلة لمتوسط سمك القشرة الأرضية هي في حدود 15 كم. وفي معظم أجزاء الوشاح السفلي واللب الخارجي فإن بيانات الاهتزاز الحر تتفق مع الكثافة والانحدار في قيم الموجتين P ، S.

كان التذبـذب الحـر لـلأرض في الماضـي ظاهـرة عابـرة تحـدث بعـد الـزلازل الكبيـرة. يُظهـر تحليـل سـجلات الـزلازل ذات الحركـة القويـة أن الأرض تتذبـذب بحريـة عنـد مسـتوى يمكـن ملاحظتـه حتـى في الفتـرات غيـر النشـطة زلزاليـاً. التذبذبـات المرصـودة هـي الأنمـاط الكرويـة الأساسـية عنـد تـرددات بـين 2 و 7 مللي هرتز.

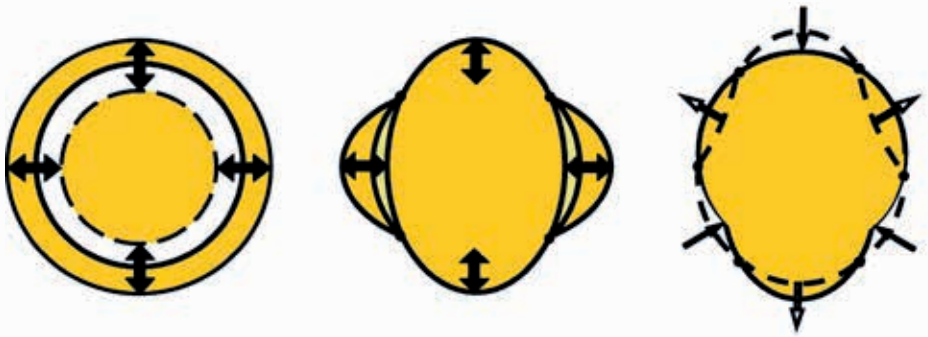
يعتمـد علـى متوسـطات واسـعة مـن المعامـلات الهيكليـة لـلأرض - لا تتأثـر بقيـود تغطيـة البيانـات بسـبب التوزيـع غيـر المتكافـئ للـزلازل والمحطـات. يوفـر طريقـة لحسـاب مخططـات الـزلازل النظريـة - مرشـحات تمريـر منخفضـة جوهريـة لبنيـة الأرض.

بشـكل عـام، تتوافـق هـذه التذبذبـات (الأوضـاع العاديـة Normal Modes) مـع الموجـات السـطحية الواقفـة لأطـول موجـة ممكنـة وأقـل تـردد (فتـرات تصـل إلـى حوالـي سـاعة واحـدة). أطـول فتـرة مـن التذبذبـات هـي فقـط متحمـس بطريقـة قابلـة للقيـاس مـن قبـل أكبـر الـزلازل. تشـكل المجموعـة الكاملـة من الأوضـاع العادية أساسـاً لوصـف أي إزاحـة مرنـة عامـة يمكـن أن تحـدث داخـل الأرض، وتُسـتخدم هـذه الخاصيـة لحسـاب مخططـات الـزلازل النظريـة للموجـات السـطحية طويلـة المدى. على غِرار الفصل بين موجات السطح (لوف ورايلي) .

يعـد التذبـذب الحـر لـلأرض أحـد أكثـر الظواهـر إثـارة للاهتمـام في علـوم الأرض. نوعـان مختلفـان مـن التذبـذب الحـر لـلأرض؛ توجـد أوضـاع كرويـة تقابـل موجـات رايلـي وحلقيـة تقابـل موجـات لـوف (تسـمى أيضـاً الالتوائيـة). بينمـا يتكـون إزاحـة الوضـع الكـروي مـن مكونـات شـعاعية (رأسـية) وعرضيـة (أفقيـة)، فـإن الوضع الحلقي يكون عرضيّاً بحتّاً.

هناك نوعان من الأوضاع العادية Normal Modes

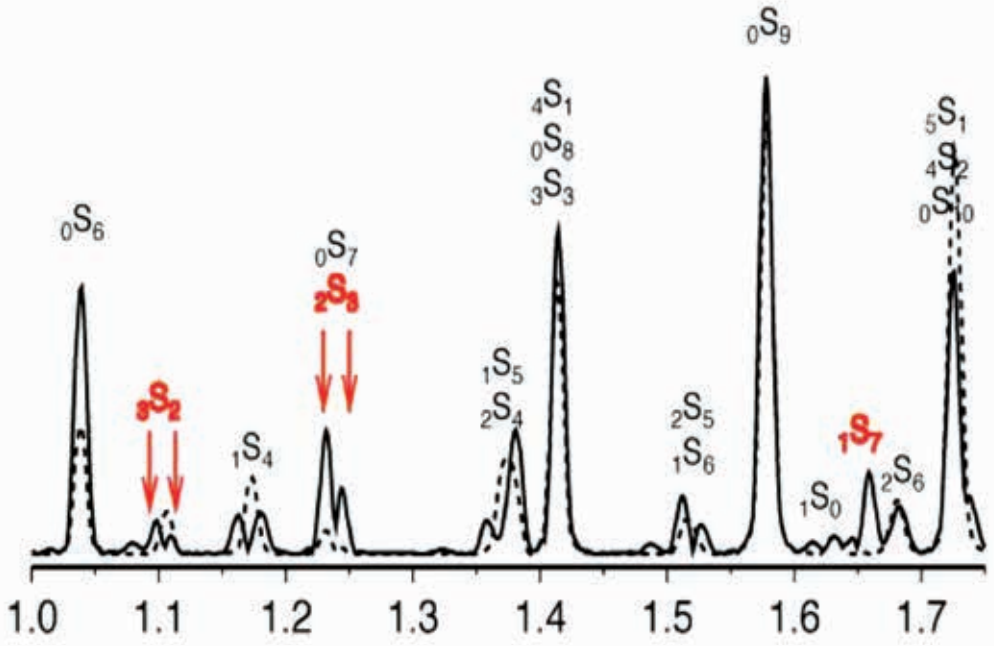
الأوضاع الكروية مماثلة للأنماط مع حركة P-SV و مشابهه لموجات رايلي



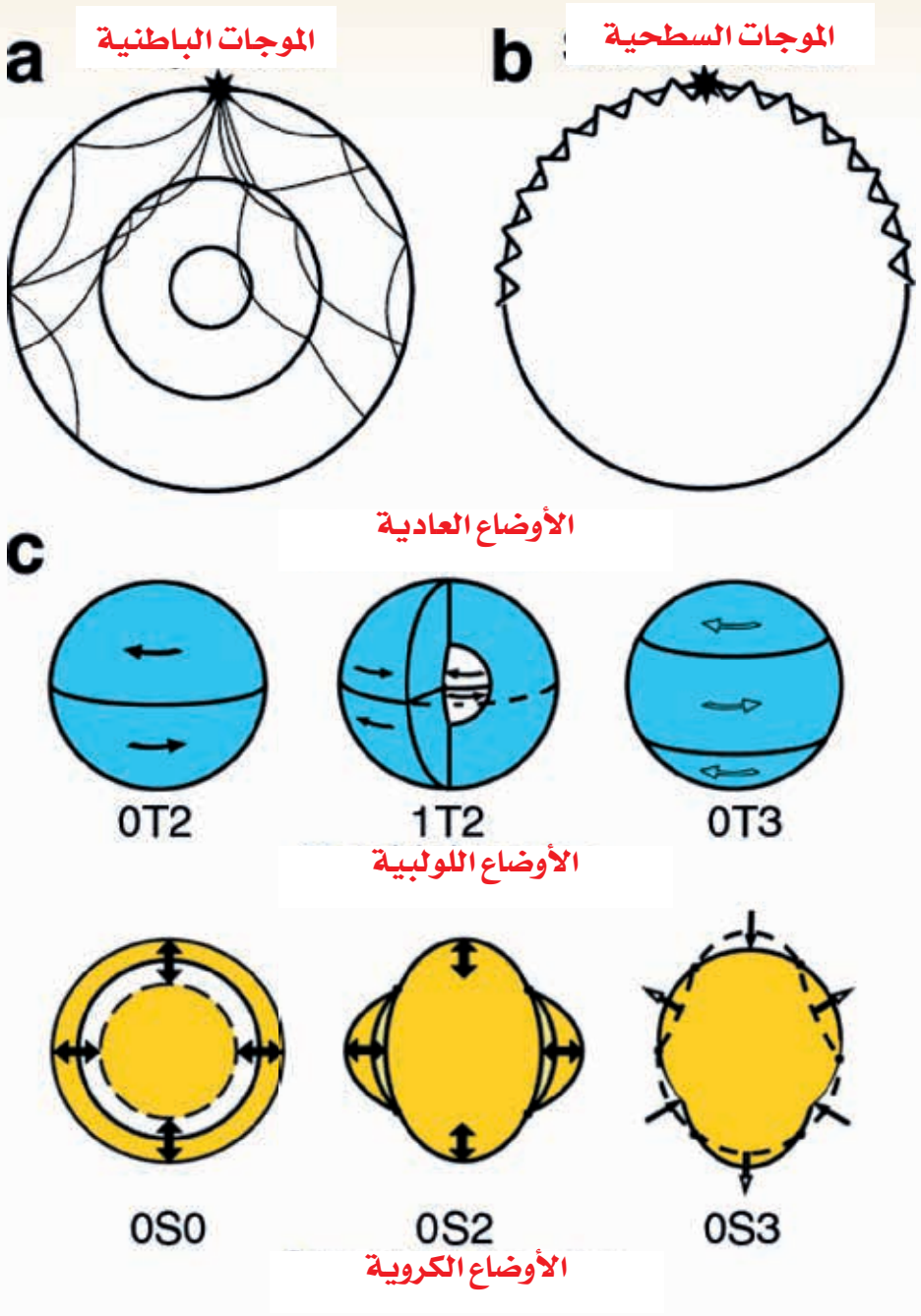
Spheroidal modes ${}_0S_0$ (20.5 min), ${}_0S_2$ (53.9 min) and ${}_0S_3$ (25.7 min)

الأوضاع اللولبية مماثلة لموجات الحب أو حركة SH

Toroidal modes ${}_0T_2$ (44.2 min), ${}_1T_2$ (12.6 min) and ${}_0T_3$ (28.4 min)



عملت مقاييس الضغط ومقاييس الجاذبية ومقاييس الزلازل عريضة النطاق دوراً في مراقبة إشارات التذبذب الحر. تحتوي هذه الأدوات على نسب إشارة إلى ضوضاء S/N جيدة في نطاقات التردد المقابلة. ومع ذلك، لم يتم استخدام النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS) لهذا الغرض على الرغم من مزاياه المتمثلة في المراقبة المكونة من ثلاثة مكونات في الإزاحة والاستجابة الترددية المسطحة عند 0 هرتز. إذا قللنا الكثير من الضوضاء الموجودة في السلسلة الزمنية لنظام تحديد المواقع العالمي (GPS) ، فستكون أداة GPS أداة قوية لاكتشاف إشارات الإزاحة الصغيرة عن طريق التذبذب الحر وكذلك الموجات الزلزالية.

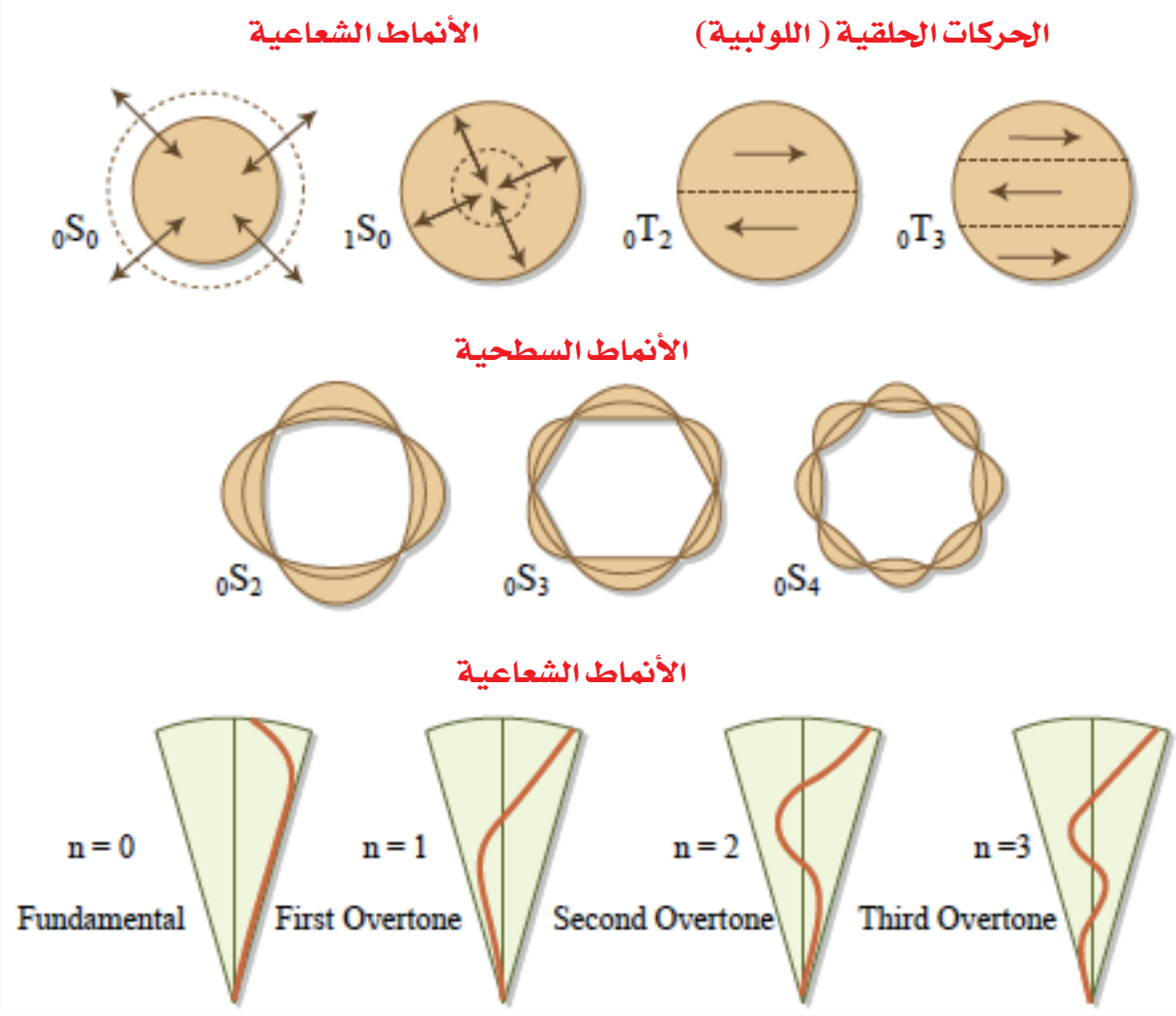


أنواع البيانات الزلزالية المستخدمة لبناء النماذج المرجعية.

a **تنتقل موجات الجسم عبر الأرض**، لذلك يمكنها أخذ عينات من جميع الأعماق على الرغم من أن الدقة الجانبية محدودة من خلال موقع المصادر والمستقبلات. تعتبر موجات الجسم قصيرة نسبيّاً (~ 1 ثانية للموجات P، ~ 10 – 30 ثانية للموجات S) وحساسة للبنية على طول مسارات الأشعة الضيقة (فقط المنطقة الضيقة التي تنتقل الموجة من خلالها).

b. **تكون الموجات السطحية** محاصرة على سطح الأرض، وبالتالي فهي أكثر حساسية للبنية الضحلة، على الرغم من أن الموجات السطحية الأطول يمكن أن تحل بنية أعمق. تتراوح فترات الموجات السطحية عادةً بين 20 و250 ثانية، وتكون أطوالها الموجية أطول، ولذا فهي تأخذ عينات من مناطق أوسع. أنها توفر أخذ عينات من الوشاح العلوي في أحواض المحيطات، التي لم تحلها موجات الجسم بسبب عدم وجود محطات الزلازل في المحيطات.

c. **الأنماط العادية لمعروفة** أيضاً باسم (التذبذبات الحرة) هي تذبذبات الأرض الكاملة حيث تتشوه الأرض بأكملها بترتيب متناسق على فترات طويلة جدّاً. تنجم الأنماط العادية عن تراكب الموجات السطحية وهي إما حركات ملتوية (أوضاع حلقية) أو حركات متموجة (أوضاع كروية). إنها حسَّاسة لكامل بنية الأرض (بما في ذلك الكثافة) مع القليل من التحيز المكاني ولكن لها عمق محدود.



هذه أوضاع بسيطة ثلاثية الأبعاد . الوضع الأساسي ليس له تقاطع صفري في السعة (ملاحظة: يشبه إلى حد ما وظيفة الحساسية لموجات السطح!)

Toroidal Modes

إذا كانت الأرض متناظرة كروياً تماماً وغير دوارة، فكلها متفردة

في المضاعفات سيكون لها نفس التردد (يسمى الانحطاط degeneracy).

على سبيل المثال، فترة nTl سيكون 0 هو نفسه لـ nTl 2، nTl1 إلخ.

في الأرض الحقيقية، تختلف الترددات المفردة (تسمى الانقسام splitting).

Spheroidal Modes

إذا كانت الأرض متناظرة كرويّاً تماماً وغير دوارة، فكلها متفردة

في المضاعفات سيكون لها نفس التردد (يسمى الانحطاط degeneracy).

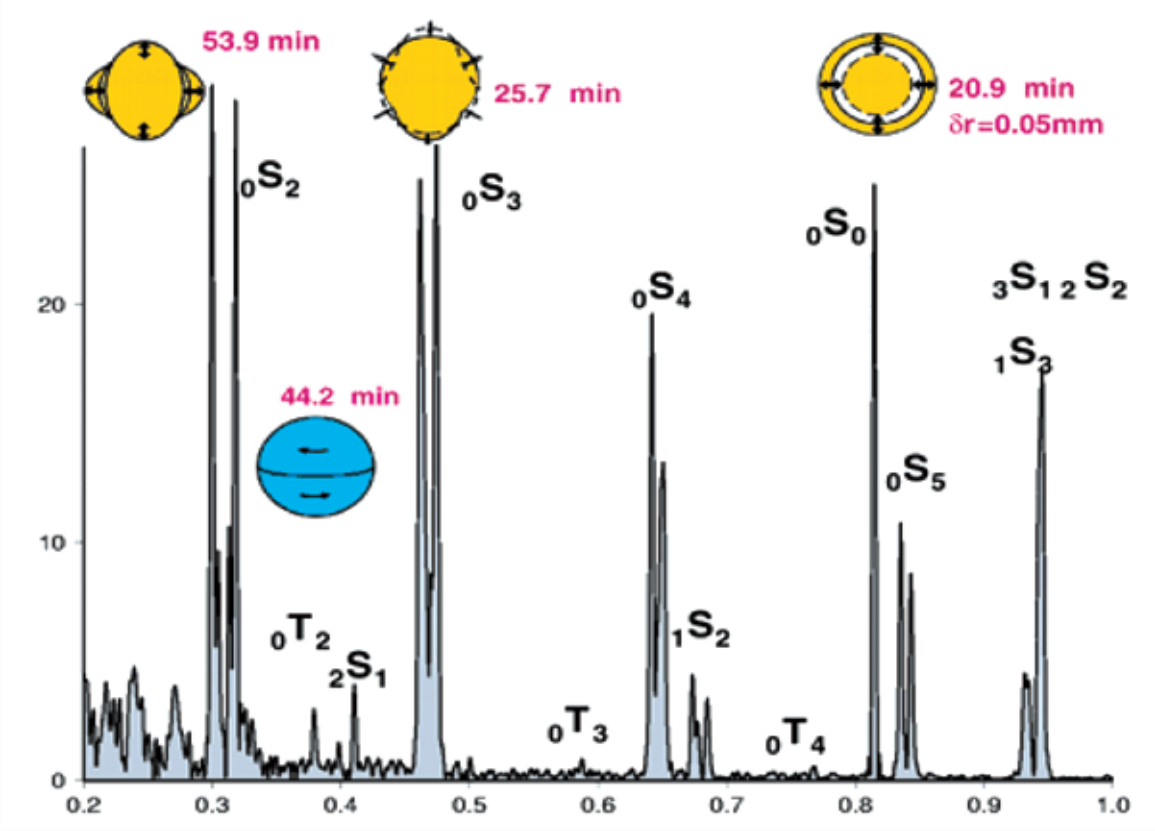
على سبيل المثال، فترة nSl سيكون 0 هو نفسه لـ nSl 2، nSl1 إلخ.

في الأرض الحقيقية، تختلف الترددات المفردة (تسمى الانقسام splitting).

وضع (التنفس) $_0S_0$

يتضمن حركات شعاعية من الأرض كلها **بالتناوب** بين التوسع والانكماش.

نحن ننظر إلى الأوضاع العادية في مجال **التردد**. فيما يلي ملاحظة **لبعض تذبذبات** الوضع العادي **ذات التردد** المنخفض **الناتجة** عن **زلزال سومطرة** 2004.


53.9 min
25.7 min
20.9 min
δr=0.05mm
44.2 min
$_0S_2$
$_0S_3$
$_0S_0$
$_0S_4$
$_3S_1$ $_2S_2$
$_1S_3$
$_0S_5$
$_0T_2$
$_2S_1$
$_1S_2$
$_0T_3$
$_0T_4$
0
10
20
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0

المراجـــع

أولًا: المراجـع العربيـــة

أبو الفداء، عماد الدين إسماعيل، تقويم البلدان، المكتبة الثقافية الدينية، القاهرة، 2007م.

أبو حامد الغرناطي، محمد بن عبد الرحيم، تحفة الألباب ونخبة الإعجاب، مخطوطة مكتبة غوته، برلين، رقم (Ms. Orient. A 1502).

أبو خليل، شوقي والمبارك، هاني، دور الحضارة الإسلامية في النهضة الأوربية، دار الفكر، دمشق، 1996م.

أبو ريان، محمد علي، تاريخ الفكر الفلسفي، ج2، ط3، دار المعرفة الجامعية، الإسكندرية، 2000م.

أحمد، كرم حلمي فرحات، تأثيرات الحضارة الإسلامية في الحضارة الصينية في الرياضيات والفلك والطب والصيدلة والهندسة المعمارية والآلية، مجلة جامعة الشارقة للعلوم الإنسانية والاجتماعية المجلد 8، عدد 2، جمادى الآخرة 1432هـ / يونيو 2011م.

أفلاطون، الطيماوس واكريتيس، تحقيق وتقديم: البير ريفو، ترجمة: فؤاد جرجي بربارة، الهيئة المصرية العامة للكتاب، دمشق، 2014م.

أفندي، عماد الدين، أطلس حضارات العالم القديمة، مراجعة: د. سائر بصمه جي، ط2، دار الشرق العربي، بيروت، 2016م.

إخوان الصفا، رسائل إخوان الصفا، مجلد2، دار صادر، بيروت، (د.ت).

ابن البهلول، الحسن، المختار من كتاب الدلائل، اختيار وتقديم: إياد خالد الطباع، وزارة الثقافة، الهيئة العامة السورية للكتاب، دمشق، 2014م.

ابن الجوزي، سبط، مرآة الزمان في تواريخ الأعيان، ط1، ج 19، تحقيق وتعليق: محمد بركات، كامل محمد الخراط، عمار ريحاوي، محمد رضوان عرقسوسي، أنور طالب، فادي المغربي، رضوان مامو، محمد معتز كريم الدين، زاهر إسحاق، محمد أنس الخن، إبراهيم الزيبق، دار الرسالة العالمية، دمشق، 2013م.

ابن المرزبان، المحصل، مخطوطة المكتبة الأحمدية بحلب، رقم 1122، الكتاب الثالث.

ابن باجة، شرح السماع الطبيعي، حققه: ماجد فخري، دار النهار، ط2، بيروت،1991م.

ابن بطوطة، أبو عبد الله، رحلة ابن بطوطة (تحفة النظار في غرائب الأمصار وعجائب الأسفار)، ج2، تحقيق وتقديم عبد الهادي التازي، أكاديمية المملكة المغربية، الرباط، 1997م.

ابن حوقل، محمد، صورة الأرض، ج2، دار صادر، أفست ليدن، بيروت، 1983م.

ابن خرداذبة، عبيد الله بن أحمد، المسالك والممالك، أوفست عن طبعة ليدن، دار صادر، بيروت، 1889م.

ابن خلدون، المقدمة، تحقيق: عبد الله محمد الدرويش، ط1، ج2، توزيع دار يعرب، دمشق، 2004م، ص 140.

ابن خلدون، عبد الرحمن، مقدمة ابن خلدون، دار الفكر، بيروت، 1988م.

ابن ربن الطبري، فردوس الحكمة في الطب، تحقيق: محمد زبير الصديقي، مطبعة آفتاب، برلين، 1928م.

ابن رشد، تلخيص الآثار العلوية، تحقيق: جمال الدين العلوي، ط1، دار الغرب الإسلامي، بيروت، 1994م.

ابن سينا، أبو علي، الشفاء (الطبيعيات)، تحقيق: محمد رضا مدور، إمام إبراهيم أحمد، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة، 1980م.

ابن طفيل، أبو بكر، حي بن يقظان، تحقيق: عبد الرحمن بدوي، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة، 1995م.

ابن مثويه، الحسن، التذكرة في أحكام الجواهر والأعراض، تحقيق: سامي نصر لطف وفيصل عون، دار الثقافة، القاهرة، 1975م.

ابن ميمون، موسى، دلالة الحائرين، ج2، تحقيق: حسين آتاي، دار مكتبة الثقافة الدينية، القاهرة، (د.ت.).

ابن وحشية، أحمد، كنز الأسرار، مخطوطة نور سليمانية، رقم (3631).

الأبهري، أثير الدين، هداية الحكمة، ط1، مكتبة المدينة للطباعة والنشر والتوزيع، كراتشي، 2019م.

الأتاسي، محمد وائل، لمحات في الإبداع العلمي، الهيئة العامة للكتاب، دمشق، 2010م.

الأحيدب، إبراهيم بن سليمان بن حسن، المدخل إلى الطقس والمناخ والجغرافيا المناخية، ط1، الرياض، 2004م.

الأشعري، أبو الحسن، مقالات الإسلاميين واختلاف المصلين، تحقيق: محمد محي الدين عبد الحميد، ج1،2، ط1، مكتبة النهضة، القاهرة، 1950م.

الألوسي، حسام محيي الدين، بواكير الفلسفة قبل طاليس، ط2، المؤسسة العربية للدراسات والنشر، بيروت، 1981م.

الأهواني، أحمد فؤاد، الكندي فيلسوف العرب، سلسلة أعلام العرب26-، وزارة الثقافة والإرشاد القومي، القاهرة، 1964م.

الإدريسي، محمد، نزهة المشتاق في اختراق الآفاق، ج1، عالم الكتب، بيروت، 1989م.

الإصطخري، أبو إسحاق، المسالك والممالك، دار صادر، بيروت، 2004م.

الإصطخري، أبو إسحاق، كتاب الأقاليم، تحقيق: مولر غوتا، 1893م.

الإيجي، عضد الدين، كتاب المواقف، تحقيق : عبد الرحمن عميرة، ط1، عدد الأجزاء : 3، دار الجيل، بيروت، 1997م.

البابا، محمد زهير، التعدين أساس علم الكيمياء، مجلة التراث العربي، العدد 79، أبريل، دمشق، 2000م.

البخاري، السيد الشريف، رسالة ملتقطة من رسالة السيد الشريف البخاري في الصناعة الفلسفية، مخطوط ضمن مجموع في مكتبة المتحف البريطاني، رقم (Or. MS. 13,006).

البغدادي، عبد القاهر، أصول الدين، إستانبول، 1928م.

البغدادي، عبد اللطيف، الإفادة والاعتبار في الأمور المشاهدة والحوادث المعاينة بأرض مصر، ط1، مطبعة وادي النيل، القاهرة، 1869م.

البغدادي، عبد المؤمن، مراصد الاطلاع على أسماء الأمكنة والبقاع، تحقيق: السيد علي محمد البجاوي، ط1، ج2، دار الجيل، بيروت، 1992م.

البيروني، أبو الريحان، الآثار الباقية عن القرون الخالية، تحقيق: إدوارد سخاو، ليبزغ، 1878م.

البيروني، أبو الريحان، التفهيم لأوائل صناعة التنجيم، مخطوطة موجودة في المكتبة البريطانية، رقم (Or 8349).

البيروني، أبو الريحان، الجماهر في معرفة الجواهر، دائرة المعارف العثمانية، حيدر آباد الدكن، 1939م.

البيروني، أبو الريحان، القانون المسعودي، ج1، ط1، حيدر آباد الدكن بالهند، 1952م.

البيروني، أبو الريحان، تحقيق ما للهند من مقولة مقبولة في العقل أو مرذولة، ط2، عالم الكتب، بيروت، 1982م.

البيروني، أبو الريحـــان، كتاب الإســـطرلاب، مخطوطة مكتبة الدولة، برلين، رقم (Petermann-I-672).

الجاحظ، أبو عثمان عمرو بن بحر، الرسائل الأدبية، دار ومكتبة الهلال، ط2، بيروت، 2002م.

الحلي، الحسن بن يوسف بن المطهر، كشف المراد في شرح تجريد الاعتقاد للطوسي، تحقيق: آية الله حسن زاده الآملي، مؤسسة النشر الإسلامي، (د.ت).

الحمـــوي، ياقوت، معجم البلدان، ج2، دار صادر، بيروت، 1995م.

الخازنـــي، أبو الفتح، ميزان الحكمة، تحقيق: فؤاد جميعان، شركة فن الطباعة، (د.ت).

الخوارزمي، محمد بن أحمد بن يوسف، مفاتيح العلوم، ط2، تحقيق: إبراهيم الأبياري، دار الكتاب العربي، القاهرة، 1989م.

الخوارزمي، محمد بن موسى، كتاب صورة الأرض، تحقيق: هانس فون مزيك، دار ومكتبة بيبلون، جبيل، 2009م.

الخيون، رشيد، معتزلة البصرة وبغداد، دار الحكمة، ط1، لندن، 1997م.

الرازي، فخر الدين، المباحث المشرقية في علم الإلهيات والطبيعيات، ط2 ج1، منشورات بيدار- قم، 1990م.

الرازي، فخر الدين، المنتخب من كتاب الملخص، مخطوط ضمن مجموع في مكتبة المتحف البريطاني، رقم (Or. MS. 13,006).

الرازي، فخر الدين، شرح الإشارات والتنبيهات لابن سينا، تحقيق: مهدي محقق، طهران، 1964م.

الرازي، فخر الدين، كتاب المحصل، تحقيق: حسين أتاي، ط1، مكتبة دار التراث، القاهرة، 1991م.

الرحال، محمد عادل، صناعة المعادن وتجارتها في مملكة أوجاريت في عصر البرونز الحديث بين (1400–1200 ق.م)، وزارة الثقافة، الهيئة العامة السورية للكتاب، دمشق، 2018م.

الرفاعي، أنور، تاريخ العلوم في الإسلام، دار الفكر، دمشق، 1973م.

الزركان، محمد علي، المصطلحات العلمية العربية القديمة في علم الجواهر والأحجار الكريمة، بحث منشور ضمن أبحاث المؤتمر السنوي العشرين لتاريخ العلوم عند العرب المنعقد في حلب – 1999م، إعداد: مصطفى موالدي ومصطفى شيخ حمزة، منشورات جامعة حلب، معهد التراث العلمي العربي، حلب، 2006م.

الزهاوي، جميل صدقي، المد وتعليله، مجلة العلم، ج8، المجلد 1، العدد 1، النجف، 1910م.

السويسي، محمد، آراء بعض المستشرقين حول التراث العلمي العربي والردّ عليها، بحث منشور ضمن كتاب مناهج المستشرقين في الدراسات العربية الإسلامية، ج2، صدر في إطار الاحتفال بالقرن الخامس عشر الهجري، المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، الرياض، 1985م.

الشريف الادريسي، محمد بن محمد، نزهة المشتاق في اختراق الآفاق، ط1، ج1، عالم الكتب، بيروت، 1989م.

الشكري، جابر، الكيمياء عند العرب، منشورات وزارة الثقافة والإعلام، بغداد، 1979م.

الشوك، علي، الثورة العلمية وما بعدها، دار المدى، دمشق، 2004م.

الصباغ، أحمد سالم، علم المعادن الفيزيائية، منشورات جامعة حلب، حلب، (د. ت).

الطحلاوي محمد رجائي، التأثير البيئي للتعدين ، جامعة أسيوط. 2014 م.

الطغرائي، مؤيد الدين، تراكيب الأنوار، مخطوط ضمن مجموع في مكتبة المتحف البريطاني، رقم (Or. MS. 13,006).

العانـي، دحام إسماعيل، موجز تاريخ العلم، ج1، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، الرياض، 2002م.

العراقي السيماوي، محمد بن أحمد، المكتسب في زراعه الذهب، مخطوط ضمن مجموع في مكتبة نور عثمانية، إستنبول، رقم (3633).

العقـاد، أنور عبد الغني، الجغرافية الفلكية، دار المريخ، الرياض، 1983م، هامش (39)، ص 100.

العلوي، جمال الدين، رسائل ابن باجة الفلسفية، ط1، دار الثقافة، القاهرة، 1983م.

العمـري، ابـن فضـل اللّه، مسـالك الأبصـار في ممالـك الأمصـار، تحقيـق: كامـل سـلمان الجبـوري ومهـدي النجـم، ط1، ج 4، دار الكتـب العلميـة، بيـروت، 2010م.

العمـري، عبداللّه 1414هـ، المسح الجاذبي (التثاقلي). دورة معهد الدراسات المساحية والجغرافية العسكري – إدارة المساحة العسكرية – الرياض. 66 صفحة.

العمـري، عبداللّه محمـد. الجيوفيزياء التطبيقية. جامعة الملك سعود. فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية. ردمك: 978-603-507-981-5 , 2021 م.

العمري، عبداللّه محمد. وسائر بصمه جي. كروية الأرض وتطبيقاتها من المنظورين التاريخي والعلمي. جامعة الملك سعود. فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية –الرياض. ردمك: 8-9496-03-603-978, 2021 م.

الفرغاني، أحمد بن محمد بن كثير، كتاب الفرغاني في الحركات السماوية وجوامع علم النجوم، بتفسير الشيخ الفاضل يعقوب غوليوس.

الفضلي، إبراهيم جواد والسبتي، غسان محمد، المنقول والمدلول في الأفكار والمعارف الجيولوجية عند العرب، بحث منشور ضمن أبحاث المؤتمر السنوي السادس لتاريخ العلوم عند العرب، تحرير خالد ماغوط ومحمد عليّ خياطة، منشورات معهد التراث العلمي العربي، جامعة حلب، 1984م.

الفنـدي، محمـد جمـال وأحمـد، إمـام إبراهيـم، البيرونـي، سلسـلة أعـلام العـرب (77)، دار الكاتـب العربـي، القاهـرة، 1968م.

الفيومي، محمد إبراهيم، المعتزلة، دار الفكر العربي، القاهرة، 2010م.

القزويني، زكريا بن محمد بن محمود، عجائب المخلوقات وغرائب الموجودات، تحقيق: محمد ابن يوسف القاضي، مكتبة الثقافة الدينية، القاهرة، 2006م، ص 142-143.

القزويني، زكريا بن محمد، عجائب المخلوقات وغرائب الموجودات، تحقيق ومراجعة: سعد كريم الفقي، وكرم السيد الأزهري، دار ابن خلدون، الإسكندرية، (د.ت).

الكرخي، أبو بكر، أنباط المياه الخفية، ط1، مطبعة دار المعارف، حيدر آباد الدكن، 1892م.

الكندي، أبو يعقوب، رسائل الكندي الفلسفية، تحقيق: عبد الهادي أبو ريدة، القاهرة، 1950م.

الكندي، أبو يعقوب، رسالة في العلة الفاعلة للمد والجزر، نسخة موجودة ضمن مجموع أياصوفيا رقم (AYASOFYA4832) .

الكنـدي، يعقوب بن إسحق، كتاب الكندي في الصناعة العظمى، تحقيق: عزمي طه السيد أحمد، قبرص، دار الشباب، 1987م، ص 143

الماجدي، خزعل، موسوعة الفلك، ط1، دار أسامة، عمّان، 2001م.

المرزوقي، أبو علي، الأزمنة والأمكنة، تحقيق خليل المنصور، ط1، دار الكتب العلمية، بيروت، 1996م.

المسعودي، أبو الحسن، أخبار الزمان، ط2، المكتبة الحيدرية، النجف الأشرف، 1966م.

المسـعودي، أبـو الحسـن، مـروج الذهـب ومعـادن الجوهـر، ج1، ط1، اعتنـى بـه وراجعـه: كمـا حسـن مرعـي، المكتبـة العصريـة، صيدا-بيـروت، 2005م.

المغربـي، رضـوان مامـو، محمـد معتـز كـريم الديـن، زاهـر إسـحاق، محمـد أنـس الخـن، إبراهيـم الزيبـق، دار الرسـالة العالميـة، دمشـق، 2013م.

المقدسـي البشـاري، أبـو عبـد اللّه محمـد بـن أحمـد، أحسـن التقاسـيم في معرفـة الأقاليـم، ط3، مكتبـة مدبولـي القاهـرة، 1991م.

المقدسـي، المطهر بن طاهر، البدء والتاريخ، ج2، مكتبة الثقافة الدينية، بور سعيد.

المقريـزي، تقـي الديـن، المواعـظ والاعتبـار بذكـر الخطـط والآثـار، ج1، ط1، دار الكتـب العلميـة، بيـروت، 1998م.

الهاشـمي، محمد يحيى، حـــول كتب الأحجار العربية، مجلة فكر وفن، العدد 6، 1 يونيو، ألمانيا، 1965م.

الهمـــداني، أحمد بن محمد، الجوهرتان المائعتان العتيقتان المائعتان من الصفراء والبيضاء، تحقيق: محمد محمد الشعيبي، دار الكتاب، دمشق، 1983م.

الهمـداني، ابن الحائك، صفة جزيرة العرب، مطبعة بريل، ليدن، 1884م.

الـورد، عبد الأمير محمد أمين والفضلي، إبراهيم جوّاد، الأصول العربية لعلم الأراضة (الجيولوجيا)، بحث منشور ضمن أبحاث الندوة العالمية الأولى لتاريخ العلوم عند العرب، جامعة حلب، حلب، 1977م.

بدوي، عبد الرحمن، الأفلاطونية المحدثة عند العرب، كتاب الروابيع، وكالة المطبوعات، الكويت، 1977م.

بدوي، عبد الرحمن، خريف الفكر اليوناني، ط5، مكتبة النهضة المصرية، القاهرة، 1970م.

بدوي، عبد الرحمن، شروح على أرسطو مفقودة في اليونانية (ورسائل أخرى)، دار المشرق، بيروت، 1971م.

برنـال، جون، العلم في التاريخ، ترجمة: شكري إبراهيم سعد، ج1، المؤسسة العربية للدراسات والنشر، بيروت، 1981م.

برهييـه، إميل، تاريخ الفلسفة، ج2،3، ترجمة:جورج طرابيشي، ط2، دار الطليعة، بيروت، 1988م.

بلدي، نجيب، تمهيد لتاريخ مدرسة الإسكندرية وفلسفتها، دار المعارف بمصر، القاهرة، 1962م.

بونهيـم، ماري-إنج وبفيرش، لوقا، عالم المصريين، ترجمة وتعليق: ماهر جويجاتي، المركز القومي للترجمة، العدد 2033، ط1، القاهرة، 2014م.

بيرلمان، ياكوف، الفيزياء المسلية، ج2، ط3، ترجمة: داوود سليمان المنير، دار مير للنشر، موسكو، 1977م.

بيكون، فرنسيس، الأورغانون الجديد، ترجمة: عادل مصطفى، رؤية للنشر والتوزيع، القاهرة، 2013م.

بينيس، سولومون، مذهب الذرة عند المسلمين، ترجمة: عبد الهادي أبو ريدة، القاهرة، 1948م.

تارن، و. و، الحضارة الهلنستية، ترجمة: عبد العزيز توفيق جاويد، المركز القومي للترجمة، العدد 1954، ط1، القاهرة، 2015م.

تعيلب، على 1966م. الجاذبية مفتاح دراسة القشرة الأرضية. مجلة علوم وتكنولوجيا. العدد 36.

جابر بن حيان، مختار رسائل جابر بن حيان، عني بتصحيحها ونشرها: بول كراوس، مطبعة الخانجي، القاهرة، 1935م.

جريبين، جون، الحياة السرية للشمس، ترجمة: لبنى الريدي، ط1، سلسلة الألف كتاب الثاني، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة، 2008م.

جيل، برتران، تاريخ التكنولوجيا، ط1، ترجمة: هيثم اللمع، المؤسسة الجامعية للدراسات والنشر، بيروت، 1996م.

جيمز، ت. ج. هـ.، كنوز الفراعنة، ترجمة: أحمد زهير أمين، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة، 1999م.

حسن، محمد يوسف، والنقاش، عدنان باقر، أثر التراث العربي في بعث الفكر الجيولوجي قبيل عصر النهضة مجلة المورد، مج 9، ع 1، وزارة الثقافة والإعلام، بغداد، 1980م.

حميد، انتصار أحمد حسن، الأحجار الكريمة في حضارة وادي الرافدين، ط1، دار المشرق الثقافية، دهوك، 2013م.

خشيم، علي فهمي، الجبائيان، الجامعة الليبية، بنغازي، 1968م.

دوكروك، ألبير، قصة العناصر، ترجمة: وجيه السمان، منشورات وزارة الثقافة، دمشق، 1981م.

ديكارت، رينيه، العالم أو كتاب النور، ترجمة: إميل خوري، ط1، درا المنتخب العربي، بيروت، 1999م.

راسل، برتراند، النظرة العلمية، ترجمة: عثمان نويه، دار المدى، دمشق، ط1، 2008م.

رونن، كولين، تاريخ عمر الأرض، مجلة آفاق علمية، العدد 24، مارس-إبريل، تصدر عن مؤسسة عبد الحميد شومان، عمّان، 1990م.

زيدان، محمود فهمي، الاستقراء والمنهج العلمي، دار الجامعات المصرية، الإسكندرية، 1977م.

سارتون، جورج، تاريخ العلم، ترجمة: لفيف من العلماء، ج3، ط1، المركز القومي للترجمة، العدد 1638، القاهرة، 2010م.

سباهي زادة، محمد بن علي البرسوي، أوضح المسالك إلى معرفة البلدان والممالك، تحقيق: المهدي عبد الرواضية، ط1، دار الغرب الإسلامي، بيروت، 2006م.

ستيس، ولتر، تاريخ الفلسفة اليونانية، ترجمة: مجاهد عبد المنعم مجاهد، دار الثقافة، القاهرة، 1984م.

سـزكين، فؤاد، تاريخ التراث العربي (أحكام التنجيم والآثار العلوية)، ط1، المجلد 7، ترجمة: عبد الله حجازي، جامعة الملك سعود، الرياض، 1999م.

سـزكين، فؤاد، تاريخ التراث العربي (الرياضيات حتى نحو 430 هـ)، مجلد5، ج1، ترجمة: عبد الله عبد الله حجازي، وحسن محيي الدين حميدة، ومحمد عبد المجيد علي، جامعة الملك سعود، الرياض، 2002م.

سـعيّد، جلال الدين، فلسفة الرواق، مركز النشر الجامعي، تونس، 1999م.

سعيدان، أحمد سعيد، «الأصول الإغريقية للعلوم الرياضية عند العرب»، مجلة معهد المخطوطات العربية، مج7، ج2، نوفمبر 1961م.

سوسـة، أحمد، العرب واليهود في التاريخ، ط2، المركز العربي للإعلان والنشر، دمشق، 1981م.

شـلتوت، مسلم، الفلك والمراصد الفلكية في مصر الفاطمية الإسلامية، المعهد القومي للبحوث الفلكية والجيوفيزيقية، حلوان. 2009م.

شيخ الربـوة، شمس الدين محمد الدمشقي، نخبة الدهر في عجائب البر والبحر، نشره م. فرين، ثم أغسطس مهرن، إعادة طبعة بطرسبورغ. منشورات معهد تاريخ العلوم العربية والإسلامية، جامعة فرانكفورت، 1865م.

صادق، سمير حنا، نشأة العلم في مكتبة الإسكندرية القديمة، ط1، دار العين، القاهرة، 2003م.

صبحي، أحمد محمود، وحملها الإنسان، ط1، دار النهضة العربية، بيروت، 1997م.

صروف، يعقوب، بسائط جيولوجية، وزارة المعارف العمومية، القاهرة، 1932م، ص 10.

ضاي، ميادة، الملامح الهندسية لعلم الأراضة في التراث العربي، رسالة ماجستير غير منشورة، معهد التراث العلمي العربي، جامعة حلب، حلب، 1994م.

طوقان، قدري حافظ، تراث العرب العلمي في الرياضيات والفلك، مطبعة المقتطف، القاهرة، 1941م.

طوقان، قدري حافظ، المهدون للاكتشاف والاختراع، مجلة الرسالة، العدد 72، القاهرة، 1934م.

عبد الباقي، أحمد، معالم الحضارة العربية في القرن الثالث الهجري، ط1، مركز دراسات الوحدة العربية، بيروت، 1991م.

عبد الحميد، هشام كمال، تكنولوجيا الفراعنة والحضارات القديمة، ط1، مكتبة النافذة، القاهرة، 2008م.

عبد العليـــم، أنور، البحار في كتب البلدان، مجلة قافلة الزيت، العدد 7، المجلد 31، رجب 1403هـ، إبريل/ مايو، تصدر عن شركة أرامكو، الظهران، 1983م.

عبد العليم، أنور، الملاحة وعلوم البحار عند العرب، سلسلة عالم المعرفة، العدد13-، تصدر عن المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب، الكويت، 1979م.

عبد النبي، مصطفى يعقوب، الأصول العربية لأسماء المعادن في اللغات الأجنبية، مجلة آفاق الثقافة والتراث، السنة 17، العدد 65، ربيع الثاني/ مارس، مركز جمعة الماجد، دبي، 2009م.

عبـده، طلعـت أحمـد محمـد، وحوريـة محمـد حسـين جـاد اللّه، جغرافيـة البحـار والمحيطـات، دار المعرفـة الجامعيـة، الإسـكندرية، 1997م.

عفيفـي، زينب، الفلسفة الطبيعية والإلهية عند الفارابي، دار الوفاء، الإسكندرية، 2002م.

عفيفي، محمد الصادق، تطور الفكر العلمي عند المسلمين، مكتبة الخانجي، القاهرة، 1977م.

علـي، شفيق عبد الرحمن، الجغرافية الفلكية، دار الفكر العربي، القاهرة، 1978م.

علي، ماهر عبد القادر محمد، محاضرات في الفلسفة اليونانية، دار المعرفة الجامعية، الإسكندرية، 1985م.

عـوض اللّه، محمد فتحي، الإنسان والثروات المعدنية، عالم المعرفة 33-، سلسلة كتب ثقافية شهرية يصدرها المجلس الوطني للثقافة والفنون، الكويت، 1980م.

عويضـة، كامل محمد محمد، زينون، دار الكتب العلمية، ط1، بيروت، 1994م.

عويضـة، كامل محمد محمد، كارل بوبر فيلسوف العقلانية، دار الكتب العلمية، بيروت، ط1، 1995م.

غريغوريان، أ.ت. وروجانسكايا، م.م.، الميكانيك والفلك في الشرق في العصر الوسيط، ترجمة: أمين طربوش، منشورات الهيئة العامة السورية للكتاب، دمشق، 2010م.

غصيب، هشام، دراسات في تاريخية العلم، ط1، دار التنوير العلمي - المؤسسة العربية للدراسات والنشر، عمّان - بيروت، 1993م.

غنيمة، عبد الفتاح مصطفى، فلسفة العلوم الطبيعية النظريات الذرية والكوانتوم، (د. د.)، (د.ت).

فارنتن، بنيامين، العلم الإغريقي، ترجمة: أحمد شكري سالم، ط1، ج1، المركز القومي للترجمة، القاهرة، 2011م.

فروخ، عمر، تاريخ الفكر العربي إلى أيام ابن خلدون، دار العلم للملايين، بيروت، 1969م.

فلوطرخس، كتاب فلوطرخس في الآراء الطبيعية التي ترضى بها الفلاسفة، ضمن كتاب أرسطوطاليس في النفس، تحقيق: عبد الرحمن بدوي، مكتبة النهضة المصرية، القاهرة، 1954م.

فوربس، ر.ج.، وديكستر، إ.ج.، تاريخ العلم والتكنولوجيا، ط2، ترجمة: أسامة أمين الخولي، ج1، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة. 1992م.

فولمـــان، ويليام تي، وداعاً نظرية مركزية الأرض، ترجمة: أسامة فاروق حسن، ط1، مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة، 2015م، ص 31.

قاسم، محمد محمد، مدخل إلى الفلسفة، ط1، دار النهضة العربية، بيروت، 2001م.

قنواتـي، جورج شحادة، تاريخ الصيدلية والعقاقير في العهد القديم والعصر الوسيط، مؤسسة هنداوي، القاهرة، 2017م.

كارنــاب، رودلف، الأسس الفلسفية للفيزياء، ترجمة: السيد نفادي، ط1، دار التنوير، بيروت، 1993م.

كرم، يوسف، تاريخ الفلسفة اليونانية، مطبعة لجنة التأليف والترجمة، القاهرة، 1936م.

كروزيه، موريس، تاريخ الحضارات العام، ط2، نقله إلى العربية: فريد داغر وفؤاد أبو الريحان، منشورات عويدات، بيروت – باريس، 1986م.

كوب، كاتي ووايت، هارولد جولد، إبداعات النار، ترجمة: فتح الله الشيخ، ط1، سلسلة عالم المعرفة، رقم 266، المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب، الكويت، 2001م.

كوت، ميشيل، التراث الثقافي للماء، ط2، المجلس الدولي للآثار والمواقع، شارنتون لو بونت، 2019م.

كورباير، ريتشارد، بلا قيود، ترجمة: دينا عادل غراب، مؤسسة هنداوي، القاهرة، 2020م.

كومنس، نيل كومنس، ماذا لو لم يوجد القمر؟، مجلة علوم وتكنولوجيا، تصدر عن معهد الكويت للأبحاث العلمية، العدد 39، الكويت، يناير 1997م.

كوهين، مايكل، الميكانيكا الكلاسيكية، ترجمة: محمد أحمد فؤاد باشا، مؤسسة هنداوي، القاهرة، 2014م.

لانداو، ل. وكيتايجورودسكي، أ، الفيزياء للجميع، ترجم بإشراف: داود المنير، ط3، دار مير، موسكو، 1978م.

ليستيين، ريمي، أبناء الزمان، ترجمة: محمد حسن إبراهيم، منشورات وزارة الثقافة، دمشق، 1998م.

مجلة آفاق علمية، العدد 17، السنة 3، كانون الثاني–شباط، تصدر عن مؤسسة عبد الحميد شومان، عمان. 1989م.

مجلة علوم وتكنولوجيا، تصدر عن معهد الكويت للأبحاث العلمية، العدد 112، الكويت، إبريل 2004م.

محمدين، محمد محمود، التراث الجغرافي العربي، ط3، دار العلوم للطباعة والنشر، الرياض، 1999م.

مطـر، أميرة حلمي، الفلسفة اليونانية، ط2، دار قباء، القاهرة. 1998م.

مطلب، محمد عبد اللطيف، تأريخ علوم الطبيعة، وزارة الثقافة والفنون، بغداد، 1978م.

مفلح، عصام، سيمياء العرب والنهضة العلمية، مجلة المعرفة، العدد 605، السنة 52، وزارة الثقافة، دمشق، شباط 2014م.

موريه، ليون، الوجيز في الجيولوجيا، ترجمة: يوسف خوري، وعبد الرحمن حميدة، ط1، دار طلاس، دمشق، 1987م، ص 22.

موسى، حسين يوسف وعبد الفتاح الصّعيدي، الإفصاح في فقه اللغة، ج 2، ط4، مكتب الإعلام الإسلامي، قم، 1990م.

موقع الإيمان على شبكة الإنترنت - تصميم مركز البحوث - جامعة الإيمان - بإشراف الشيخ عبدالمجيد الزنداني.

نصر، سيد حسين، مقدمة إلى العقائد الكونية الإسلامية، ط1، ترجمة: سيف الدين القصير، دار الحوار، اللاذقية، 1991م.

نصـر، محمد عبدالفتاح. الجاذبية الأرضية. 1991م. دورة معهد الدراسات المساحية والجغرافية العسكري - إدارة المساحة العسكرية - الرياض. 83 صفحة.

هالـو، روبير، استقبال الخيمياء العربية في الغرب، بحث منشور في موسوعة تاريخ العلوم العربية، ج3، إشراف رشدي راشد، مركز دراسات الوحدة العربية - مؤسسة عبد الحميد شومان، ط2، بيروت، 2005م.

هـوث، جون إدوارد، الفن الضائع ثقافات الملاحة ومهارات اهتداء السبيل، ترجمة: سعد الدين خرفان، سلسلة عالم المعرفة، العدد441-، تصدر عن المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب، الكويت، 2016م.

هوفمـان، يانيش، النسبية وجذورها، ترجمة: مروان عريف، ط1، دار طلاس، دمشق، 2000م.

هونكه، زيغريد، شمس الله تسطع على الغرب، ط6، ترجمة: فاروق بيضون، بيروت، 1981م.

وجدي، موسوعة القرن العشرين، ط3، ج1، دار المعرفة، بيروت، 1971م.

يحياوي، صلاح، الإبداع مصادفة أم ذكاء أم ماذا؟، مجلة الفيصل، العدد 251، الرياض 1997م.

يعقـوب، مصطفـى، الأشـجار المتحجـرة، مجلـة القافلـة، يوليه/أغسـطس، العـدد3، المجلـد 44، الظهـران، 1995م.

يفوت، سالم، الجاذبية بين الدعاة والخصوم، مجلة المناظرة، العدد2، السنة1، الرباط، يونيه 1989م.

ثانيًا: المراجـــع الأجنبيـــة

Adams, Simon & David Lambert, (2006), Earth Science: An Illustrated Guide to Science, Chelsea House, New York.

Adams, Simon, & Lambert, David, (2006), Earth Science: An Illustrated Guide to Science, Chelsea House, New York.

Alan Chu, (2011), Photographic Moon, Hong Kong.

American Society of Civil Engineers (1994). The Glossary of the Mapping Sciences. ASCE Publications. p. 365. ISBN 978-0-7844-7570-6. Archived from the original on 17 April 2021. Retrieved 22 January 2019.

Barbieri, C. (2006), Fundamentals of Astronomy, CRC Press, p. 253, ISBN 978-0750308861

Bastin, J. A., Pandya, S. J., & Upson, D. A., Thermal Gradients in the Outer Lunar Layers, The Moon, Proceedings from IAU Symposium no. 47 held at the University of Newcastle-Upon-Tyne England, 22-26 March, 1971. Edited by S. K. Runcorn and Harold Clayton Urey. International Astronomical Union. Symposium no. 47, Dordrecht, Reidel, p.372

Batygin, Konstantin; Brown, Michael E. (20 June 2010). "Early Dynamical Evolution of the Solar System: Pinning Down the Initial Conditions of the Nice Model". The Astrophysical Journal. 716 (2): 1323–1331. arXiv:1004.5414. Bibcode:2010ApJ...716.1323B. doi:10.1088/0004-637X/716/2/1323. S2CID 7609851.

Bennett, Jeffrey O. (2020). "Chapter 8.2". The cosmic perspective (9th ed.). Hoboken, NJ: Pearson. ISBN 978-0-134-87436-4.

Billings, Charles E. (1973), "Barometric Pressure", in Parker, James F.; West, Vita R. (eds.), Bioastronautics Data Book, vol. 3006 (2nd ed.), Bibcode:1973NASSP3006.....P, NASA SP-3006

Boggs, S. W. (1945). ""This Hemisphere"". Journal of Geography. Informa UK Limited. 44 (9): 345–355. Bibcode:1945JGeog..44..345B. doi:10.1080/00221344508986498. ISSN 0022-1341.

Bolonkin, Alexander (2010), Non-Rocket Space Launch and Flight, Elsevier, ISBN 978-0080458755

Borowitz, Sidney; Beiser, Arthur (1971), Essentials of physics: a text for students of science and engineering, Addison-Wesley series in physics (2nd ed.), Addison-Wesley Publishing Company Note: this source gives a value of 2.7 × 1025 molecules per cubic meter.

Boss, A. P.; Durisen, R. H. (2005). "Chondrule-forming Shock Fronts in the Solar Nebula: A Possible Unified Scenario for Planet and Chondrite Formation". The Astrophysical Journal. 621 (2): L137. arXiv:astro-ph/0501592. Bibcode:2005ApJ...621L.137B. doi:10.1086/429160. S2CID 15244154.

Bouvier, A.; Wadhwa, M. (2010). "The age of the Solar System redefined by the oldest Pb–Pb age of a meteoritic inclusion". Nature Geoscience. 3 (9): 637–641. Bibcode:2010NatGe...3..637B. doi:10.1038/NGEO941. S2CID 56092512.

Braterman, Paul S., (2013), How Science Figured Out the Age of Earth, Scientific American, October 20.

Cajori, Florian (1917), A history of physics in its elementary branches: including the evolution of physical laboratories, New York: The Macmillan Company

Cartwright, David Edgar, (1999), Tides A Scientific History, Cambridge University Press, Cambridge.

Chamberlain, Joseph Wyan (1978), Theory of planetary atmospheres: an introduction to their physics and chemistry, international geophysics series, vol. 22, Academic Press, ISBN 978-0-12-167250-8

Charlotte Bigg, and H. Otto Sibum, Duke University press, Durham and London, 2010

Chrysostomou, A.; Lucas, P. W. (2005). "The Formation of Stars". Contemporary Physics. 46 (1): 29–40. Bibcode:2005ConPh..46...29C. doi:10.1080/00107 51042000275277. S2CID 120275197.

Clark A. M. (1993): Hey's Mineral Index, 3rd print, Chapman & London.

Claudio Vita-Finzi & and Dominic Fortes, (2013). Planetary Geology, 2nd edition, Dunedin Academic Press Ltd, London.

Collins, Martin J. (2007), "Mariner 2 Mock-up", After Sputnik: 50 years of the Space Age, HarperCollins, ISBN 978-0-06-089781-9

Conforti, B.; Bravo, Luigi Ferrari (2005). The Italian Yearbook of International Law, Volume 14. Martinus Nijhoff Publishers. p. 237. ISBN 978-90-04-15027-0. Archived from the original on 26 September 2020. Retrieved 27 August 2020.

Dales, Richard C., (1973), the Scientific Achievement of the Middle Ages, University of Pennsylvania Press.

Dalrymple, G. Brent (2001). "The age of the Earth in the twentieth century: a problem (mostly) solved". Special Publications, Geological Society of London. 190 (1): 205–221.

Daly, Chas. P., (1890), On The History of Physical Geography, American Geographical Society, Vol. XXII, No. I, Annual Address.

Darwin, George Howard, (1898), the Tides and Kindred Phenomena in the Solar System, Boston, Houghton.

Davidson, Martin, The Stars And The Mind, Scientific Book Club, London, 1947.

Davies, P. C. W. (1977), The physics of time asymmetry, University of California Press, ISBN 978-0-520-03247-7 Note: a light year is about 1013 km.

Davis, Jeffrey R.; Johnson, Robert; Stepanek, Jan (2008), Fundamentals of Aerospace Medicine (4th ed.), Lippincott Williams & Wilkins, ISBN 978-0-7817-7466-6

Dickson, Paul (2010), A Dictionary of the Space Age, New Series in NASA History, JHU Press, ISBN 978-0801895043.

Duda R., Rejl L. (1986): Minerals of the World, Hamlyn, Twickenham.

Dugas, Rene, (1957), A History Of Mechanics, Routledge &Kegan Paul ltd. London.

Dugas, Rene, 1957) A History Of Mechanics, Routledge &Kegan Paul ltd. London.

Eckert, Michael (2006), The dawn of fluid dynamics: a discipline between science and technology, Wiley-VCH, ISBN 978-3-527-40513-8

Edgar Williams, (2014), Moon, Reaktion books, London.

Ekers, Ron. "IAU Planet Definition Committee". International Astronomical Union. Archived from the original on 3 June 2009. Retrieved 13 October 2008.

Ekman, Martin, (1993), A concise history of the theories of tides, Surveys in Geophysics, Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands.

Ellery, Alex (2000), An introduction to space robotics, Springer-Praxis books in astronomy and space sciences, Springer, ISBN 978-1-85233-164-1

Faulkner, Danny, Falling Flat: Refutation of Flat Earth, Master Books, Green Forest, Arkansas, 2019, p. 8.

Feather Jr., Ralph M., & Zike, Dinah, (2005), Earth Materials and Processes, Glencoe/ McGraw-Hill, Columbus.

Fishbane, Paul and others, (2005), Physics for scientists and engineers, 3ed, Pearson, New Jersey.

Forbes, George, History of Astronomy, G. P. Putnam's Sons, New York, 1909.

Freedman, Roger A.; Kaufmann, William J. (2005), Universe (7th ed.), New York: W. H. Freeman and Company, ISBN 978-0-7167-8694-8

Gatti, Hilary (2002), Giordano Bruno and Renaissance science, Cornell University Press, ISBN 978-0-8014-8785-9

Genz, Henning (2001), Nothingness: the science of empty space, Da Capo Press, ISBN 978-0-7382-0610-3

Ghosh, S. N. (2000), Atmospheric Science and Environment, Allied Publishers, ISBN 978-8177640434

Glick, Thomas F. (ed.). (2014), Marina Tolmacheva, Geography, Chorography. Medieval Science, Technology, and Medicine: An Encyclopedia. Routledge.

Gokay, Bulent (2001). The Politics of Caspian Oil. Palgrave Macmillan. p. 74. ISBN 978-0-333-73973-0. Archived from the original on 25 March 2021. Retrieved 22 January 2019.

Goodman, John M. (2006), Space Weather & Telecommunications, Springer Science & Business Media, ISBN 978-0-387-23671-1

Gough, D. O. (November 1981). "Solar Interior Structure and Luminosity Variations". Solar Physics. 74 (1): 21–34. Bibcode:1981SoPh...74...21G. doi:10.1007/BF00151270. S2CID 120541081.

Grant, Edward (1981), Much ado about nothing: theories of space and vacuum from the Middle Ages to the scientific revolution, The Cambridge history of science series, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-22983-8

Greaves, Jane S. (7 January 2005). "Disks Around Stars and the Growth of Planetary Systems". Science. 307 (5706): 68–71. Bibcode:2005Sci...307...68G. doi:10.1126/science.1101979. PMID 15637266. S2CID 27720602.

Gunter Faure & Teresa Mensing, (2007). Introduction to Planetary Science: The Geological Perspective, Springer, Dordrecht.

Gupta, Manoj (2010). Indian Ocean Region: Maritime Regimes for Regional Cooperation. Springer. p. 57. ISBN 978-1-4419-5989-8. Archived from the original on 9 June 2020. Retrieved 22 January 2019.

Hardesty, Von; Eisman, Gene; Krushchev, Sergei (2008), Epic Rivalry: The Inside Story of the Soviet and American Space Race, National Geographic Books, pp. 89–90, ISBN 978-1-4262-0321-3

Hariharan, P. (2003), Optical interferometry (2nd ed.), Academic Press, ISBN 978-0-12-311630-7

Harris, Philip Robert (2008), Space enterprise: living and working offworld in the 21st century, Springer Praxis Books / Space Exploration Series, Springer, ISBN 978-0-387-77639-2

Harris, Rollin Arthur, (1898), Manual of tides, Part 1, Govt. Print. Off., Washington.

Harrison, Albert A. (2002), Spacefaring: The Human Dimension, University of California Press, ISBN 978-0-520-23677-6

Hibbard, M.J., (2002). Mineralogy: a geologist's point of view. Mc Graw Hill. 562P.

Holton, Gerald James; Brush, Stephen G. (2001), "Physics, the human adventure: from Copernicus to Einstein and beyond", Physics Today (3rd ed.), Rutgers University Press, 54 (10): 69, Bibcode:2001PhT....54j..69H, doi:10.1063/1.1420555, ISBN 978-0-8135-2908-0.

Jacqueline Mitton, DK, (2009). Eyewitness Moon, London.

John Wilkinson (2010), The Moon in Close-up, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Karleskint, George; Turner, Richard L.; Small, James W. (2009). Introduction to Marine Biology. Cengage Learning. p. 47. ISBN 978-0-495-56197-2. Archived from the original on 30 July 2022. Retrieved 27 August 2020.

Knell, S. J. & Lewis, C. L. E., (2001), Age of the Earth, The Geological Society of London, Cambrian Press, Aberystwyth.

Lakdawalla, Emily; et al. (21 April 2020). "What Is A Planet?". The Planetary Society. Archived from the original on 22 January 2022. Retrieved 3 April 2022.

Latest Published Data". The International Astronomical Union Minor Planet Center. Archived from the original on 5 March 2019. Retrieved 14 August 2023.

Lewis, George Cornewall, An Historical survey of the astronomy of the ancients, Parker, Son, and Bourn, London, 1862.

Lide, D.R. (2000) .CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press.

Linda T. Elkins-Tanton, (2006), Earth and the Moon, Chelsea House, New York.

Linton, C.M., From Eudoxus to Einstein: A History of Mathematical Astronomy, Loughborough University, 2007

Moody, Ernest Addison, (1975), Studies in medieval philosophy, science, and logic: collected papers, 1933-1969, Uni. Of California press.

Motomaro Shirao & Charles A. Wood, (2011), The Kaguya Lunar Atlas, Springer, New York.

O'Hara, Kieran D., (2018), A Brief History of Geology, University of Cambridge, Cambridge.

Our Planet, New Scientist, (2015), Reed Business Information Ltd, England.

Patterson, L.D., (1949), Hooke's Gravitation Theory and Its Influence on Newton. I: Hooke's Gravitation Theory, The University of Chicago Press, Isis, Vol. 40, No. 4, Nov.

Pav, Peter Anton, (1966), Gassendi's Statement of the Principle of Inertia, Isis, Vol. 57, No. 1, Spring, The University of Chicago Press.

Picturepedia, DK, (2015), London.

Pipken, B. W.,andTrent, D. D. (2001) Geology and the Environment. Brooks /Cole.541 pages.

Pluto and the Developing Landscape of Our Solar System". International Astronomical Union. Archived from the original on 30 January 2016. Retrieved 9 April 2022.

Plutoid chosen as name for Solar System objects like Pluto". Paris: International Astronomical Union. 11 June 2008. Archived from the original on 13 June 2008. Retrieved 11 June 2008.

Rambosson, Jean Pierre, (1875), Astronomy, Chapman & Hall, London.

Redfern, Martin, (2003), The Earth: A Very Short Introduction, Oxford University Press, Oxford.

Renee C. Weber, Pei-Ying Lin, Edward J. Garnero, Quentin Williams, Philippe Lognonné (2011), Seismic Detection of the Lunar Core, SCIENCE, VOL 331 21 JANUARY.

Reynolds, J. 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley &Sons. 796 p.

Romaine, Garret, (2017), Geology lab for kids, Quarto Publishing Group USA Inc.,

Ronald Greeley, (2013). Introduction to Planetary Geomorphology, , Cambridge University Press, 1st edition, Cambridge.

Rossi, Cesare & Russo, Flavio & Russo, Ferruccio, (2009), Ancient Engineers' Inventions, Springer, Italy.

Sambursky, Shmuel, (1975), Physical Thought, PICA press, New York.

Schiavon, Martina, Geodesy and Mapmaking in France and Algeria: Between Army Officers and Observatory Scientists, in the: the heavens on earth: Observatories and Astronomy in Nineteenth Century Science and Culture Edited by David Aubin,

Schröder, K.-P.; Connon Smith, Robert (May 2008). "Distant future of the Sun and Earth revisited". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 386 (1): 155–163. arXiv:0801.4031. Bibcode:2008MNRAS.386..155S. doi:10.1111/j.1365-2966.2008.13022.x. S2CID 10073988.

Scott, Elaine (2015), Our moon, Clarion Books, New York.

Smith, James R., Introduction to Geodesy: the history and concepts of modern geodesy, John Wiley & Sons, New York, 1997

Smithsonian Institution, (2011), Violent Earth, DK, London.

Smithsonian Institution, (2017). Super Earth Encyclopedia, DK, London.

Stow, Dorrik (2004). Encyclopedia of the Oceans. Oxford University Press. ISBN 978-0-19-860687-1.

Super Earth Encyclopedia, DK, Smithsonian Institution, (2017), London.

The Moon, (2019), 1st edition, Future PLC, Dorset.

Tom Kerss, HarperCollins Publishers, (2018). Moongazing: Beginner's Guide, New York.

Tsuboi, C., 1981 – Gravity. George Allen & Unwin Press, 254p.

Van Kooten, G.C. and Bulte; E.H. (2000) The Economics of Nature, Blackwell Publishers, 512p

Violent Earth, DK, Smithsonian Institution, (2011), London.

Vukas, B. (2004). The Law of the Sea: Selected Writings. Martinus Nijhoff Publishers. p. 271. ISBN 978-90-04-13863-6. Archived from the original on 25 March 2021. Retrieved 22 January 2019.

Webb, Paul. "1.1 Overview of the Oceans". Roger Williams University Open Publishing – Driving learning and savings, simultaneously. Retrieved May 10, 2023.

Wiedemann, E. (1921), Uber al-Kindi's Schrift uber Ebbe und Flut, Annalen der Physik, No. 67.

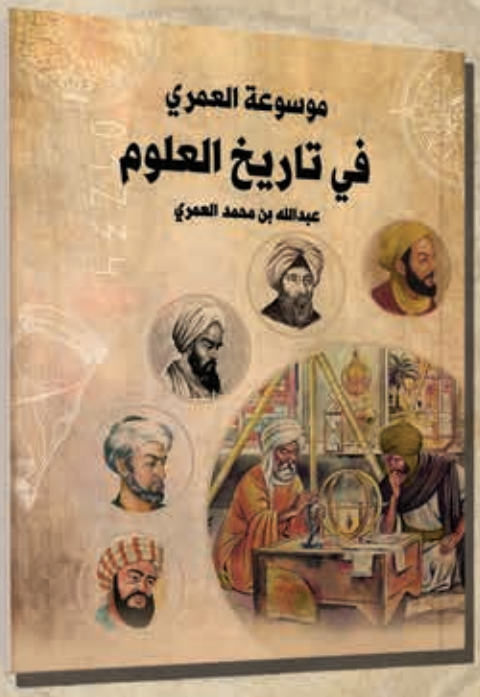
Williams, Edgar, (2014), Moon, Reaktion Books Ltd, London.

Woodward, John, (2008), Oceans, DK Eyewitness Books, New York.

Yi, Sukyoung; Demarque, Pierre; Kim, Yong-Cheol; Lee, Young-Wook; Ree, Chang H.; Lejeune, Thibault; Barnes, Sydney (2001). "Toward Better Age Estimates for Stellar Populations: The Y2 Isochrones for Solar Mixture". Astrophysical Journal Supplement. 136 (2): 417–437. arXiv:astro-ph/0104292. Bibcode:2001ApJS..136..417Y. doi:10.1086/321795. S2CID 118940644.

Zabludoff, Ann. "Lecture 13: The Nebular Theory of the origin of the Solar System". NATS 102: The Physical Universe. University of Arizona. Archived from the original on 22 August 2011. Retrieved 27 December 2006.

تم بحمد الله

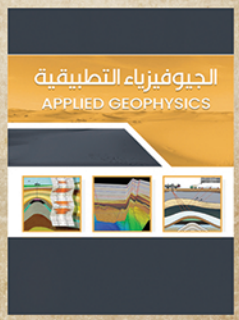


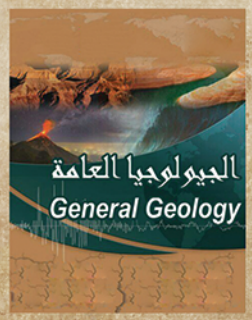
www.alamrigeo.com

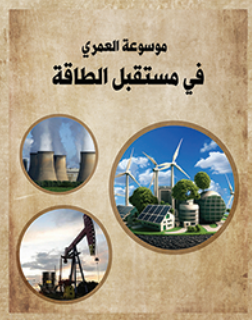
موسوعة العمري في الأرض والفضاء
Alamri's Encyclopedia of Earth and Space

يتمتع الأستاذ الدكتور عبدالله بن محمد العمري بمسيرة علمية حافلة امتدت لأكثر من خمسة وثلاثين عامًا، حيث شغل منصب أستاذ علم الزلازل ورئيس قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء في جامعة الملك سعود بالرياض، ويعمل مشرفاً على مركز الدراسات الزلزالية ورئيساً للجمعية السعودية لعلوم الأرض. يعمل العمري باحثاً رئيساً في 13 مجموعة عمل أمريكية وألمانية ومستشاراً محلياً ودولياً في العديد من الجمعيات والهيئات داخل المملكة العربية السعودية وخارجها. أسس ورأس تحرير أول مجلة عربية للعلوم الجيولوجية تحت إشراف الناشر الألماني Springer وتمحورت أبحاثه العلمية حول نمذجة ومحاكاة ميكانيكية الزلازل والحد من مخاطرها، واستكشاف المياه الجوفية العميقة وتحديد مكامن الطاقة الحرارية الأرضية. إلى جانب أعماله البحثية، يبذل العمري جهوداً حثيثة على نشر المعرفة، إذ ألف موسوعات وكتبًا تعليمية تخصصية تهدف إلى إثراء المكتبة العربية بمواد تعليمية متفردة، ومن أبرز إنجازاته تأسيس أول موسوعة جيولوجية رقمية للمملكة العربية السعودية في عام 2024، حيث اشتملت على جميع الثروات الاقتصادية والظواهر الجيولوجية فيها. ونشر أكثر من 220 ورقة بحثية وأنجز أكثر من 60 مشروعاً بحثياً و 74 تقريراً علمياً، بالإضافة الى تأليفه موسوعة تعليمية من 30 كتاباً و 5 موسوعات علمية تخصصية و 3 كتب أكاديمية في علوم الأرض . حصل على العديد من الجوائز ودروع التكريم المحلية والعالمية نظير إنجازاته العلمية المتميزة

إصدارات المؤلف







العبيكان للنشر
Obeikan Publishing

ردمك: 978-603-04-7895-8

www.alamrigeo.com