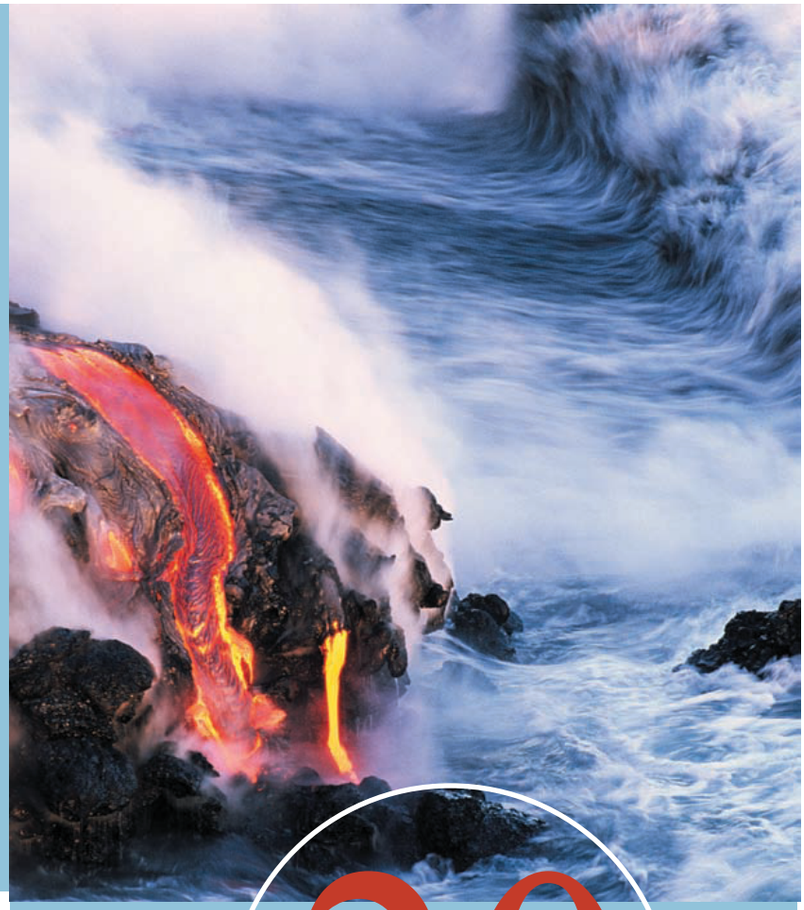
الجزء الثالث

علم الأرض

أنت على حقّ يا ميجان، إنه المكان الأفضل. نحن نقف على الغلاف الأرضيّ الصّلب، ولكن في كلّ لحظة، فإنّ الغلافين المائيّ والجوّيّ يعملان على تجوية الصّخور التي نقف عليها؛ فالغلاف المائيّ هو المكان الذي بدأت فيه الحياة على الأرض، في حين يوفر الغلاف الجوّيّ الأكسجين الذي تحتاج إليه النباتات، كما أنه يحمينا من الأشعة فوق البنفسجية الضارة. إنّ كوكبنا الأرض فريد في نظامنا الشّمسيّ، فهو بيتنا، ونحن نحتاج إلى تعلّم المزيد عنه لكي نستطيع الحفاظ عليه.

يا إيملي، شاطئ البحر هو أفضل مكان لرؤية تفاعل الغلاف الأرضيّ مع الغلافين الجوّيّ والمائيّ



الصّخور والمعادن

20

1.20 الغلاف الأرضيّ مكون من صخور ومعادن

2.20 المعادن

3.20 خصائص المعادن

4.20 تصنيف المعادن المكونة للصخور

5.20 تكوّن المعادن والصّخور

6.20 أنواع الصّخور

7.20 الصّخور النّاريّة

8.20 الصّخور الرّسوبيّة

9.20 الصّخور المتحوّلة

10.20 دورة الصّخر

■ الأرض نظـام عظيـم ومتداخل. وبوصفـه نظامًا، فإنّ موضوعاته يمكن أن تقسم إلى أغلفة هي: الغلاف الأرضيّ، والغلاف المائـيّ، والغلاف الجـوِّيّ. وكلّ غلاف من هذه الأغلفـة منفصـل لكنه يلامـس الأغلفة الأخـرى ويتفاعل معها. ولا تحدث العمليات الأرضيّة بعضها في معزل عن بعض؛ فالأحداث في أيّ غلاف تؤثر في واحد من الغلافين الآخريـن أو فيهمـا معًا. وسـندرس أولًا الغلاف الأرضيّ الـذي يتضمّن الأرض تحت أقدامنا – الصّخور والمعادن، وتكتونيّـة الصّفائح، والـزلازل، والبراكيـن. وكيف تؤثر عمليات التّعرية والترسيب في الأراضي. ثم نحول اهتمامنا إلـى الغلاف المائيّ الذي يتضمّن المـاء العذب؛ والأنهار، والجـداول والجليديـات، والمياه الجوفيـة، والمياه المالحة ومحيطـات الأرض. ثم ننهي دراسـتنا لـلأرض بالتركيز على *الغلاف الجوِّيّ*؛ المُناخ والطّقس. توجد العناصر التي تشـكّل الأرض في صخورها ومعادنها؛ فهي التي تشـكّل قشرة الأرض وستارها ولبّها.

تقع قشـرة الأرض فوق اثنتي عشرة أو أكثر من **الصّفائح التّكتونيّـة (Tectonic Plates)** التي تتحرك اسـتجابة للتّدفّق الحراريّ وتيـارات الحمـل في باطـن الأرض

(الشكل 1.20) . حيث يمكن لهذه الصّفائح أن تنقسم، أو تتصادم، أو ينزلق بعضها بجانب بعض. ومع حركة الصفيحة، فإنّ سطح الأرض يتغير. ويمكن رؤية الحرارة الهاربة من باطن الأرض على شكل ثورانات بركانيّة في بعض الأحيان تؤدي إلى نشوء صخور جديدة. أمّا الحركة الداخلية (الباطنية) فتنعكس إلى حركة خارجية سطحية (*زلازل*) تؤدي إلى تكسير الأرض وتشويهها. وعندما تلامس الصّخور المكونة لقشرة الأرض الغلاف المائيّ (الماء) والغلاف الجوّيّ (الهواء)، تبدأ عمليات التّجوية والتّعرية، فتتكسر الصّخور إلى قطع صخرية صغيرة. وتستمر العملية مع استمرار تفاعل الأغلفة الثلاثة معًا، مما يؤدّي إلى التأثير في الأراضي على سطح الأرض.

الشّكل 1.20
تتكون قشرة الأرض من مجموعة صفائح تكتونية تتحرك استجابة للتدفق الحراري وتيارات الحمل في باطن الأرض. ومع حركة الصّفائح يتغير سطح الأرض.

1.20 الغلاف الأرضيّ مكوّن من صخور ومعادن

نبدأ دراستنا لعلم الأرض بفحص الأرض أسفل أقدامنا: أي الغلاف الأرضيّ. يتكوّن هذا الغلاف من صخور. وتتكوّن الصّخور من معادن. تساعدنا معرفة الصّخور والمعادن على فهم تركيب غلافنا الأرضيّ ومكوناته. تمامًا مثل معرفتنا للأسمنت والحديد والزجاج التي تساعدنا على معرفة تركيب المباني. فمثلًا، يوفر نوع المعادن الموجودة في الصّخور البركانيّة دليلًا على أنّ صخورًا مصهورة تُقذف من باطن الأرض إلى سطحه. كما أنّ حجم حبات المعادن ونوعها في الصّخور المتحوّلة تدل على معدل التّبلور وظروف التكون (ضغط وحرارة) التي توافرت أسفل قشرة الأرض.

إنّ المعادن هي المكونات الأساسية للصخور، أمّا العناصر فهي المكونات الأساسية للمعادن. ومن مراجعتنا لجدول العناصر في فصل 12. يتضح أنه يحوي 112 عنصرًا معروفًا معظمها نادر الوجود. وقد تندهش إذا علمت أنّ 8 عناصر فقط، من بين هذا العدد الكبير، تشكّل 98% من كتلة الأرض (الشكل 20-2)! في حين تشكّل العناصر الأخرى مجتمعة 2% الباقية.

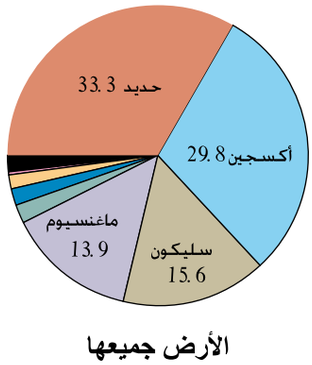
عناصر الأرض ليست موزعة بالتساوي. فمثلًا، يتركز معظم الحديد في باطن الأرض حيث يشكل اللب المركزي لها. أما العناصر الأخف مثل السليكون والأكسجين فهي موزعة بين الجزأين الأوسط والخارجي من الأرض. ولشرح هذا التوزيع؛ يجب أن ندرس أولًا بداية نشأة الأرض.

تكوّن نظامنا الشمسي قبل 4.5 بليون (مليار) سنة تقريبًا، عندما اندمج فتات الغبار والغازات والصّخور والفلزات في أثناء دورانها حول الشمس. فكوّنت الكواكب والكويكبات والمذنبات التي نعرفها اليوم. إحدى هذه الكتل الصخرية الناتجة أصبحت الأرض التي تكوّنت من تراكم قطع ذات أحجام مختلفة. وعندما تشكلت العناصر بداية، كانت موزعة بالتساوي لأنها الطريقة التي تجمعت بها. ولكن ذلك كلّه تغير.

ومع كلّ تصادم، تحررت حرارة بسبب تحول الطاقة الحركية إلى طاقة حرارية؛ أي حرارة الارتطام. ومع تغيّر الأرض، فإنّ قوة الجذب نحو مركز الكوكب جذبت قطعًا فتاتية أخرى، ثم ازداد الجذب بحيث أصبح كافيا لأن تنكمش الأرض البدائية نفسها إلى حجم أصغر، مما أنتج مزيدًا من الحرارة. أمَّا المصدر الثالث للحرارة فقد كان ناجمًا عن تحلل العناصر المشعة الموجودة طبيعيًّا والمنتشرة بشكل واسع. وعلى الرّغم من أنّ الحرارة المولّدة في أيّ متر مكعب من الصخر قليلة، إلا أنه عند التفكير في تريليونات الأمتار المكعبة من الصخر في الأرض، فإنّ كمية الحرارة المولدة ستكون كبيرة. هذه المصادر الثلاثة للحرارة؛ حرارة الارتطام، وحرارة الانكماش، وحرارة التحلل الإشعاعي – عملت مجتمعة على إيصال الأرض البدائية إلى درجة انصهارها.

ومن ثمّ، فإنه في حالة من الانصهار أو شبهه، وتحت تأثير الجاذبية، غاصت المواد الكثيفة والثقيلة الغنية بالحديد إلى مركز الأرض، أما المواد الأقلّ كثافة الغنية بالسليكون والأكسجين فصعدت نحو سطح الأرض (انظر فصل 5). ويمكن رؤية هذا النوع من الفصل على أساس الكثافة في خليط من الزيت والماء؛ فالماء الأثقل يغوص ليكوّن طبقة في القاع، أما الزيت الأقلّ كثافة فيصعد نحو الأعلى ليكوّن طبقة على السطح. وفي حالة الأرض، فقد أدّى الفصل بالكثافة إلى تكوّن *لبّ* غنيّ بالحديد عالي الكثافة، وستار صخريّ أقلّ كثافة، وقشرة صخرية أقلّ في الكثافة (الشكل 3.20).

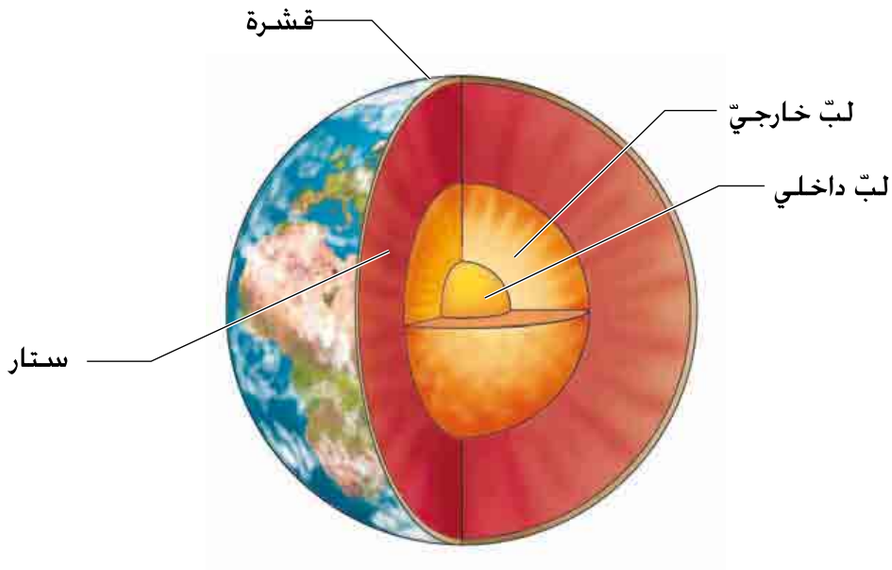
يبين الشكل 4.20 التكوين الحالي لقشرة الأرض. قارن تركيب قشرة الأرض مع تركيب الأرض كاملة لملاحظة أنّ العناصر نفسها تظهر في كليهما، ولكن بنسب مختلفة. وكما هو متوقع، فإنّ القشرة مكوّنة في معظمها من عناصر خفيفة؛ تقريبًا نصف كتلة قشرة الأرض أكسجين (O) وربعها سليكون (Si).



الأرض جميعها

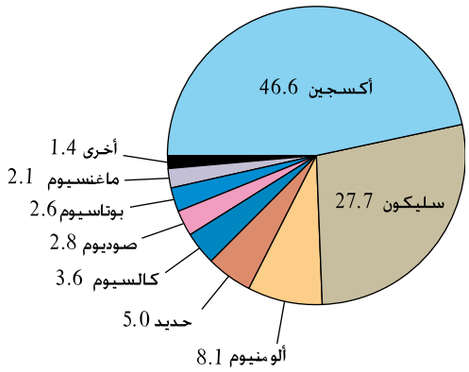
الشّكل 2.20

هناك 8 من العناصر الكيميائية فقط متوافرة بكثرة على الأرض.



الشّكل 3.20

تتكون الأرض في تركيب طبقي. تختلف الطبقات، وهي القشرة والستار واللب في التركيب والكثافة. متوسط كثافة الأرض 5.5 جم / سم^3. ولأنّ متوسط كثافة عينات من قشرة الأرض تساوي 2.7 جم/ سم^3 ، فإنّ المادة السفلى يجب أن تكون ذات كثافة عالية. ومع أنها لم تقس مباشرة فإنّ كثافة الستار 4.5 جم /سم^3 واللبّ (الداخلي الصلب والخارجي السائل) متوسط كثافته 13.5 جم / سم^3.



قشرة الأرض

الشكل 4.20

النسبة المئوية للعناصر في قشرة الأرض بحسب كتلتها. يشكل الأكسجين والسليكون أكثر من 75% من القشرة الأرضيّة.

لمعلوماتك

■ تصبح وفرة الأكسجين في قشرة الأرض أكثر بروزًا عندما نفكر في وجوده على شكل ذرات وليس على شكل كتلة: فمن بين كلّ 100 ذرة في قشرة الأرض، فإنّ 63 منها هي أكسجين. الأكسجين ليس فقط مهمًّا كمكون للهواء، ولكنه يشكل معظم قشرة الأرض أيضًا.

■ **نقطة فحص**

1. ينقسم باطن الأرض إلى طبقات كانفصال الزيت عن الخلّ إلى طبقات. ما الذي سبب حدوث ذلك؟
2. كيف يختلف تركيب كامل الأرض عن تركيب قشرتها؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. الجاذبية، وحرارة الارتطام، والانكماش الجذبي، والتحلل الإشعاعي جعلت كوكبنا طريًّا إلى درجة إمكانية تحرك مكوناته بسهولة. وتبعًا لذلك غاصت العناصر الكثيفة نحو مركز الأرض في حين صعدت الخفيفة نحو السطح.
2. يشكل الحديد ثلث كتلة الأرض ككل، إلا أنّ معظم هذا الحديد موجود في باطن الأرض. يسود الأكسجين والسليكون معظم الطبقة الخارجية للأرض. وكما سنرى، فهذا هو سبب وجود المجموعات الشائعة من المعادن المكونة للصخور — مجموعة السليكات — التي تحتوي على هذين العنصرين.

■ 2.20 المعادن

لمعلوماتك

توجد المعادن في الصّخور والمواد الغذائية وهي متشابهة ومختلفة. المعادن في الصّخور تشكّلت طبيعيًّا وهي غير عضوية، وصلبة متبلورة ولها تركيب كيميائيّ محدّد. ولكن المعادن في المواد الغذائية هي من صنع الإنسان، وغير عضوية تحوي عناصر مهمة للنشاطات الحيوية. وعلى أيّ حال، فالمعادن التي تستعمل في الإضافات الغذائية تأتي من المعادن الموجودة طبيعيًّا في قشرة الأرض.

المعادن جزء من غذائنا اليومي (فيتامينات، ومعادن)، وهي تزود الصناعة بالمواد الخام (ألومنيوم للعلب، الحديد للفولاذ، إلخ). ومن هذين المثالين البسيطين، يسهل رؤية أهمية المعادن في الغلاف الأرضيّ وفي حياتنا. ولكن، ما المعدن؟ **المعدن** مادة تشكلت طبيعيًّا، غير عضوية، صلبة متبلورة، مكونة من ذرات مرتبة، ويمكن معرفتها، ولها تركيب كيميائيّ محدّد.

إنّ هذا التعريف مباشر وواضح؛ فأن يكون المعدن طبيعيًّا يعني أنه لم يصنّع في مختبر. وعليه، فإنّ الزركونيا المكعبة والأحجار الكريمة المصنّعة ليست معادن. وأمّا أن يكون المعدن صلبًا متبلورًا فهذا يعني أنّ الذرات المكونة للمعادن دائمًا مرتبة بنسق هندسي. فالزّجاج مثلًا صلب، ولكنه لا يحوي تركيبًا بلّوريًّا، أي أنه *غير مبلور* لذا فهو ليس معدنًا. أنواع المعادن نفسها دائمًا لها الترتيب الهندسي للذرات نفسه. أمّا التركيب الكيميائي المحدد فيعني أنّ للمعادن مدى من التركيب الكيميائي ولكن بحدود ثابتة.

أما أنّ المعدن (*غير عضوي*) فيحتاج إلى تفسير؛ فغير عضوي يعني أنّ المادة المعدنية غير مكونة من جزيئات عضوية. وكلمة (*عضوي*) *لا* تعني شيئًا بالنسبة للعالِم، ولكنها تعني شيئًا آخر للإنسان العادي. فهي تعني للعالِم أنّ التركيب الكيميائيّ يحوي الكربون والأكسجين والهيدروجين.

تنشأ المواد العضوية غالبًا بواسطة الكائنات الحية. أما المواد غير العضوية فتنشأ عادة في خطوات لا تتطلب كائنات حية رغم أنها قد تكون عُمِلت من قبل كائنات حية. فصَدَفُ البحر واللؤلؤ كوّنتها حيوانات، ولكنها غير عضوية؛ لأنها مكونة من كربونات الكالسيوم التي تحوي كربون وأكسجين ولا تحتوي على هيدروجين.

■ **نقطة فحص**

1. هل يعدّ الماس الصّناعيّ معدنًا؟
2. الأوبسيدين نوع من الزجاج المتكون في البراكين، هل هو معدن؟
3. ما البلورة؟

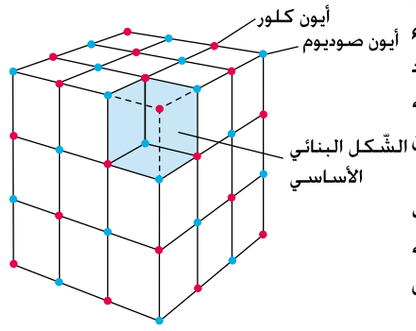
هل كانت هذه إجابتك؟

1. لا، حتى يعدّ معدنًا يجب أن يتكون طبيعيًّا.
2. لا، فعلى الرّغم من أن الأوبسيدين يتكوّن طبيعيًّا، وله تركيب كيميائيّ محدد، إلا أنه نوع من الزجاج – غير متبلور. إنه لا يحوي خصائص المعدن جميعها.
3. البلورة هي مادة صلبة لها بناء بلوري؛ أي أنّ الذرات والأيونات أو الجزيئات مرتبة في نسق متكرر.

■ 3.20 خصائص المعادن

تصنف المعادن وفقًا للتركيبين الكيميائي (أي العناصر الموجودة) والبلوريّ (كيفية ترتيب العناصر). للمعدن خصائص فيزيائية تعتمد على خصائصها الداخلية الدقيقة. إنّ الخصائص الداخلية الدقيقة مثل التركيب، والبناء البلوريّ، وقوة الروابط الكيميائية تحدد الشّكل البلوريّ، وتحدد أيضًا الصلابة (مقاومة الخدش)، والمكسر والانفصام (كيفية تكسّر المعدن)، واللون، والكثافة. ويمكن تعرف معظم المعادن عن طريق هذه الخصائص الفيزيائية المشاهدة.

وهناك خصائص فيزيائية أخرى يمكن أن تساعد على تعرف المعادن مثل اللمعان (طريقة عكس المعدن للضوء) والحكاكة (لون مسحوق المعدن). وسنناقش في هذا القسم الخصائص الفيزيائية للمعادن اعتمادًا على بنائها الداخلي.



(أ) الشّكل البنائي البلوريّ للهاليت

الشّكل البلوريّ

هل رأيت ملح طعام (هاليت) تحت عدسة تكبير؟ إذا كان الجواب نعم، فلا بدّ أنك شاهدت شكلها الهندسي الرائع (الشكل 5.20). تُعرف هذه البلورات بهذه الأشكال الهندسية الرائعة التي تظهرها. **فالشّكل البلوريّ *(Crystal Form)*** هو التعبير الخارجي للترتيب المنتظم لذراتها. وعندما تنظر إلى بلورة كاملة التشكل فإنّ ما تراه هو الترتيب الأصلي للذرات في البناء. ولكلّ معدن توافق فريد بين التركيب الكيميائي والشّكل البلوريّ (الشكل 5.20)

(ب) حبيبات من معدن الهاليت (ملح الطعام)

الشّكل 5.20

الشّكل البنائي الأساسي لمعدن الهاليت (ملح الطعام) هو مكعب. يتكرر هذا الشّكل في الأبعاد الثلاثة. ينعكس الترتيب الداخلي لبلورات الهاليت على حبات المعدن الكبيرة.

لمعلوماتك

■ المصطلح (عضوي) مشتق من كلمة (كائنات) بالإنجليزية. بعض الكائنات تكون معادن. فمثلًا، الكثير من الكائنات البحرية تصنع كربونات الكالسيوم (غالبًا أراغونيت) لصَدَفِها. كما أنّ المحار قد يكوّن اللؤلؤ الذي يتكوّن من الأرغونيت غالبًا. يمكن أن تترسب معادن الأوبال والفلوريت وبعض الفوسفات عن طريق الكائنات. فمثلًا، تحتوي الأسنان والعظام على معدن الأباتيت. وهذه المعادن يمكن أن تتكون من كائنات، ولكنها غير عضوية. وكقاعدة، فالمركبات العضوية التي تحوي الأكسجين، والكربون، والهيدروجين كلها مجتمعة ليست من المعادن. ومع أنّ المواد الهيدروكربونية للبترول والفحم تسمى معادن طاقة، فهي ليست معادن. ومع أنّ سكر الطعام($C_{12}H_{22}O_{11}$)متشكل طبيعيًّا وصلب ومتبلور، وله ترتيب داخلي منتظم من الذرات، إلا أنه لا يعدّ من المعادن.

تختلف المعادن بعضها عن بعض في أنواع العناصر المكونة لها أو/و في الترتيب الداخلي للذرات المكونة له

(أ) (ب) (جـ) (د) (هـ) (و)

الشّكل 6.20

يمكن تمييز العديد من المعادن من شكلها البلوريّ.
(أ) أميثيت، وهو النوع الأرجواني من الكوارتز له شكل سداسي مع نهايات زاوية. (ب) بايريت، أو "ذهب المجانين" له شكل مكعب عليه علامات متوازية تسمى حزوزًا. (ج) روزاسيت، له بلورات شعاعية خضراء مزرقة تتجمع على شكل كرات. (د) رودوكروسيت، اسمه يعني "لون وردي" له شكل بلوري معينيّ. ولبعض المعادن أشكال نمو مميزة.
(هـ) معدن الهيماتيت، ينمو عادة في تجمعات مثل العنب.
(و) الأسبست، معادن لها شكل ليفي.

ولسوء الحظ، يندر وجود أشكال بلورية مكتملة في الطبيعة بسبب الحيز المتاح؛ لأنّ معظم البلورات تنمو في حيز صغير.

وكما أنّ الأبنية مكونة من مواد مختلفة كبعض الصّخور، والحجارة والأخشاب، فإنّ المعادن كذلك مكونة من عناصر مختلفة. فبعض المعادن تتكون من العناصر نفسها، لكن الترتيب الذري الداخلي مختلف، مما يجعلهما معدنين مختلفين. لذا، نذكرك بالتشابه مع الأبنية. فالتصاميم المختلفة، باستخدام المواد نفسها تؤدي إلى معادن مختلفة. وأحيانًا يكون هناك معدنان أو أكثر يحتويان على العناصر نفسها، والنسب المئوية نفسها، ولكن ذراتها مرتبة بشكل مختلف بعضها عن بعض، وعليه، فإنّ بناءها البلوريّ وخصائصها تكون مختلفة. مثل هذه المعادن تسمى متعددة الأشكال *polymorphs.* (*poly* متعدد و *morph* شكل). فالجرافيت والماس من المعادن المتعددة الأشكال، لأنهما يتكونان من العنصر نفسه وهو الكربون، إلا أنّ ذرات الكربون مرتبة بشكل مختلف فيهما. لذا، فإنّ للجرافيت والألماس خصائص مختلفة تمامًا (الشكل 7.20). ولأنّ تكوّن هذين المعدنين المتشابهين – المختلفين - يعتمد على درجة الحرارة والضغط، فإنّ المعدن متعدد الشّكل يعدّ مؤشرًا جيدًا على الظروف الجيولوجية السائدة في زمن التكوين وأماكنه.

■ **نقطة فحص**

يمكن تعرف العديد من المعادن من خلال خصائصها الفيزيائية.
- الشّكل البلوريّ، والصلابة، والمكسر، والانفصام، واللمعان، واللون، والحكاكة، والكثافة. لماذا يصعب تعرف المعدن عن طريق الشّكل البلوريّ؟

هل كانت هذه إجابتك؟

إن وجود بلورات مكتملة الشّكل نادر في الطبيعة؛ لأنّ المعادن تنمو في حيّز ضيق عادة.

القساوة

لا تشير القساوة إلى سهولة كسر المعدن، ولكن إلى مقاومته للخدش. فمثلًا بلورة الكوارتز تخدش بلورة الفلسبار؛ لأنّ الكوارتز أقسى من الفلسبار. قابلية المعدن لخدش معدن آخر ومقاومة المعدن للخدش من قبل معدن آخر هما مقياسا القساوة.

(أ) ألماس (ب) جرافيت

الشّكل 7.20

كلّ من الجرافيت والماس كربون نقي.
(أ) الماس أقسى مادة معروفة، وله بناء متماثل متراص بإحكام. (ب) لمعدن الجرافيت بناء مفتوح متطبق، وهو معدن طري جدًا. عند دلك الجرافيت بين الأصابع، تنزلق جزيئاته بعضها فوق بعض مثل أوراق اللعب لتعطي إحساسًا بالانزلاق. هذا التأثير الزلق هو الذي يجعله جيدًا كمشحّم جاف. كما ينزلق الجرافيت بسهولة عند ضغطه على ورقة- تاركا أثرًا - مما يجعله يستعمل في أقلام الرصاص. (وهو أفضل من الرصاص في صناعة الأقلام لأنه أقلّ سمّيّة.

الجدول 1.20 مقياس موهو للقساوة

المعدن	القساوة	جسم له قساوة مماثلة
تلك	1	
جبس	2	ظفر الإصبع (2.5)
كالسيت	3	قطعة نقد نحاسية أو سلك نحاسي (3.5)
فلوريت	4	سكين فولاذ أو زجاج (5.5)
أباتيت	5	قطعة بورسلين (6.5)
فلسبار	6	
كوارتز	7	
توباز	8	
ماس	10	

نستخدم **مقياس موهو للقساوة *(Mohs Scale of hardness)*** (الجدول 1.20) لمقارنة قساوة معادن مختلفة.

لماذا تكون بعض المعادن أقسى من غيرها؟ تعتمد القساوة على قوة الروابط الكيميائية؛ فكلما زادت قوة الروابط، زادت قساوة المعدن. أما العوامل التي تؤثر في قوة الروابط فهي شحنة الأيونات، وحجم الأيون أو الذرة، والتّراصّ (فصل 15). توجد الروابط القوية عادة بين الأيونات العالية الشحنة؛ فكلما زاد الجذب، زادت قوة الرابطة. ويؤثر الحجم في قوة الرابطة لأنّ الذرات والأيونات الصغيرة يتراصّ بعضها قريبًا من بعض مقارنة بالكبيرة. إنّ المسافات التي تفصل الذرات والأيونات المتراصة بعضها قرب بعض قصيرة، لذا تكوّن روابط قوية؛ بعضها يجذب بعض بقوة أكبر؛ فالذهب ذو الذرات الكبيرة طري؛ لأنّ ذراته غير متراصة وروابطها ضعيفة. أما الماس ذو ذرات الكربون الصغيرة فله تركيب متراصّ. لذا، فهو صلب؛ إنه أقسى المعادن المعروفة (الشكل 7.20أ).

كلما زادت قوة الرابطة زادت القساوة.

الانفصام (Cleavage) والمكسر (Fracture)

إذا طرقت عينة من الكالسيت بالمطرقة فإنها تنكسر على طول *سطوحها الضعيفة* – وهي سطوح تكون الروابط على طولها ضعيفة أو قليلة العدد. ***الانفصام*** إذن، هو قابلية المعدن للكسر على طول سطوح الضعف في بنيته. ويتم تعرف هذه السطوح من خلال كلّ من التركيب البلوريّ وقوة الروابط الكيميائية.

لدى بعض المعادن قابلية أكبر على الانفصام مقارنة بمعادن أخرى. وبشكل عام، فإنّ المعادن التي تحتوي على روابط قوية بين سطوحها البلوريّة يكون انفصامها ضعيفًا. أما المعادن ذات الروابط الضعيفة على طول السطوح المستوية فيكون انفصامها واضحًا. فمعدن المسكوفيت (مايكا) والكالسيت لهما انفصام مميز. يتكون التركيب البلوريّ للمايكا من ذرات مرتبة على شكل صفائح. ترتبط الذرات داخل الصّفائح بروابط قوية، ولكن الروابط بين الصّفائح ضعيفة. لذا، فإنّ المسكوفيت ينفصم حيث الروابط ضعيفة بين صفائحها (الشكل 8.20). كما يمكنك فصل المسكوفيت إلى رقائق. وتستخدم رقائق المسكوفيت اللامعة لزيادة لمعان الدهان على الأجسام.

المعادن التي ليس لها ترتيب معين للروابط مثل الكوارتز لا تري انفصامًا وإنما مكسرًا. المكسر الناعم المنحني الذي يشبه الزجاج المكسور يسمى محاريًّا. فمعدن الكوارتز والأولفين له مكسر محاريّ (الشكل 9.20). ولكن معظم المعادن لها مكسر غير منتظم. إنّ درجة الانفصام أو المكسر ونوعهما دلائل مفيدة لتعرُّف المعادن.

(أ)

(ب)

الشّكل 8.20

إنّ انفصام المعادن مفيد جدًّا في تعرفها.

(أ) مسكوفيت معدن من مجموعة المايكا وله انفصام واضح في اتجاه واحد. وينكسر إلى صفائح. (ب) الكالسيت (كربونات الكالسيوم) له انفصام واضح بثلاثة اتجاهات (*ليس* بزوايا قائمة مثل المكعب). ينكسر إلى قطع معينية صغيرة.

الشكل 9.20
توضح عينة الكوارتز هذه شكلها البلوريّ ومكسرها المحاريّ. عندما ينكسر الكوارتز، فإنه يكوّن سطحًا أملس منحنيًا يشبه الزجاج المكسور. مكسر محاريّ.

■ **نقطة فحص**

1 . عند حكّ قطعة من الكاليست مع قطعة من الفلوريت، أيهما يخدش الآخر؟
2 . لمعدن المسكوفيت انفصام مميز، أما الكوارتز فله مكسر. كيف يرتبط ذلك بالبناء البلوريّ للمعدن؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1 . بالنظر إلى الجدول 1.20، نرى أنّ الفلورايت أقسى من الكالسيت. لذا، فإنه يخدشه.
2 . يتكون المسكوفيت على شكل بناء صفائحيّ. لذا، فالروابط بين الصّفائح أضعف من الروابط داخلها. تنفصم معادن المايكا بين الصّفائح. للكوارتز بناء أكثر تعقيدًا ولا يحوي تصفحًا أو سطوح ضعف. لذا، فإنه ينكسر.

اللون

على الرغم من أنّ اللون خاصية ملحوظة في المعدن، إلا أنه ليس مهمًّا في تعرُّفه. بعض المعادن كالنحاس والتركواز لهما لون مميز. ولكن معظم المعادن، إما أن توجد لها مجموعة من الألوان، أو أنها بلا لون. إنّ الشوائب الكيميائية في المعدن تؤثر في لونه. فمثلًا، المعدن الشائع الكوارتز SiO_2 يمكن وجوده بعدة ألوان اعتمادًا على الشوائب. لذا، قد يكون شفافًا أو دون لون إن لم يحتو على شوائب، وقد يكون أبيض حليبيًّا بسبب محتويات مائية صغيرة. والكوارتز ذو اللون الوردي ينتج من كميات قليلة من التيتانيوم، أما الكوارتز الأرجواني (أمثيست) فينتج عن كميات قليلة من الحديد. معدن الكورندروم Al_2O_3 أبيض اللون أو رمادي على الأغلب. ولكن الشوائب فيه تعطينا الياقوت الأحمر والأزرق (الشكل 10.20).

تعتمد كثافة المعدن على عدة عوامل مثل كتل ذراته، ودرجة التّراصّ لهذه الذرات والذي يعتمد بدوره على حجم الذرة.

الكثافة (Density)

الكثافة خاصية للمواد جميعها بما فيها المعادن. وبشكل عملي، فإنّ كثافة معدن تدلنا على مدى ثقله بالنسبة إلى حجمه. وبشكل أدق، فإنّ كثافة المعدن هي نسبة كتلته إلى حجمه. كثافة بعض المعادن مدرجة في الجدول 2.20. إنّ الكثافة المرتفعة للذهب 19.3 جم/سم^3 تؤخذ كإيجابية من قبل المنقبين عنه ؛ لأنّ قطع الذهب الصغيرة المختفية داخل خليط من الطين والرمل تستقر في قاع الوعاء عند تدوير الخليط بالماء. يخرج الماء والمواد الأقلّ كثافة عند تحريك الخليط. وبعد عدة مرات من التحريك والترسيب، يبقى في قاع الوعاء المواد ذات الكثافة العالية فقط ؛ إنّه الذهب.

ياقوت أحمر (روبي)

ياقوت أزرق (سافير)

الشكل 9.20
معدن الكورندوم Al_2O_3 يوجد في عدة ألوان نتيجة الشوائب الكيميائية. إنّ إضافة كميات قليلة من الكروم محلّ الألومنيوم يكوّن الحجر الكريم المعروف باسم ياقوت *(روبي)*. ومع إضافة كميات قليلة من الحديد والتيتانيوم ينتج الحجر الكريم الياقوت الأزرق *(سافير)*.

الجدول 2.20 كثافة معادن مختلفة جم/سم^3

بوراكس	1.7	بايري	5.0
كوارتز	2.65	هيماتيت	5.26
تلك	2.8	نحاس	8.9
مايكا	3.0	فضة	10.5
كرومايت	4.6	ذهب	19.3

4.20 تصنيف المعادن المكونة للصخور

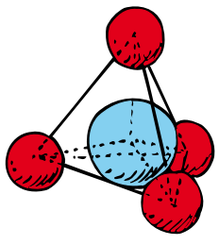
الخصائص الفيزيائية للمعدن تعود إلى كيميائية المعدن.

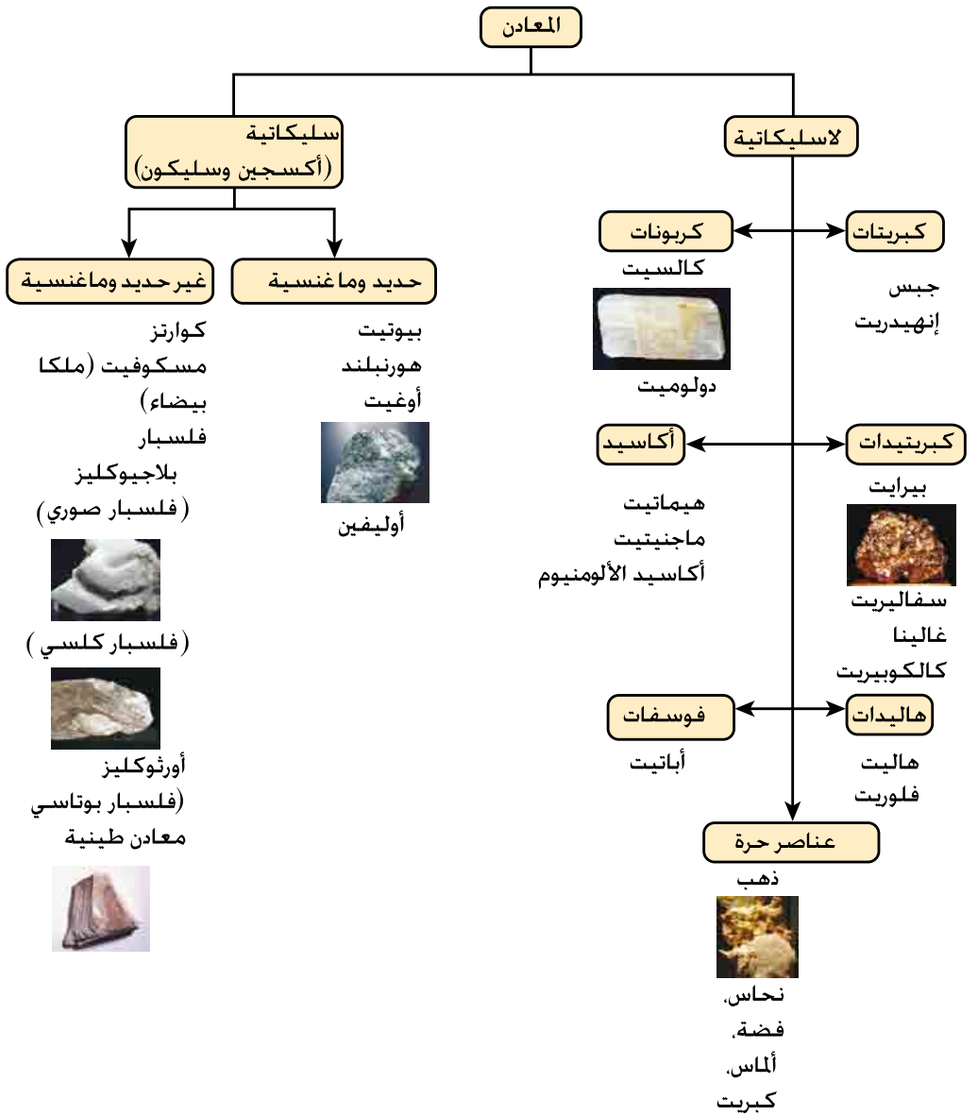
يوجد في الأرض أكثر من 4000 معدن معروف. ويتم اكتشاف معادن جديدة كلّ سنة. مع وجود العديد من المعادن، كيف يمكن تصنيفها بطريقة بسيطة ومنظمة؟ بداية، فإنّ معظم المعادن نادرة. وفي الواقع، هناك بضع عشرات من المعادن فقط تكوّن معظم الصّخور المنكشفة على سطح الأرض. وهذه هي *المعادن المكونة للصخور*.

تُصنّف المعادن اعتمادًا على التركيب الكيميائي. ينتج عن النوعين الرئيسين للمعادن: مجموعة معادن السليكات (***Silicates***)، ومجموعة معادن اللاسليكات (***nonsilicates***) (الشكل 11.20). انظر الشكل 4.20. وستفهم كيف توصل علماء الأرض إلى هذا التقسيم البسيط. فالأكسجين هو العنصر الأكثر وفرة في قشرة الأرض، في حين يأتي عنصر السليكون في الترتيب الثاني. المعادن التي تحوي عنصري السليكون Si والأكسجين O كجزء من تركيبها الكيميائي تسمى السليكات. أما المعادن التي لا تحوي هذين العنصرين فتسمى لاسليكاتية. للسليكون قابلية انجذاب كبيرة نحو الأكسجين. وفي الحقيقة،

لمعلوماتك

المعادن السليكاتية جميعها لها البناء التركيبي الأساسي للذرات نفسه، وهو رباعي الأوجه المكون من أكسجين وسليكون. ترتبط أربع ذرات أكسجين مع ذرة سليكون. $(SiO_4)^{4-}$ الرابطة القوية التي تربط الأكسجين بالسليكون مشابهة للمادة اللاحمة التي تربط القشرة الأرضيّة بعضها ببعض.





الشّكل 11.20
تصنيف المعادن الشائعة المكونة للصخور .

لمعلوماتك

هناك العديد من التعريفات في هذا الفصل، فلا تجهد نفسك في حفظ مصطلحات كثيرة. اجعل المصطلحات تساعدك على الفهم. فالمصطلحان *حديدوماغنسية* و *لاحديدوماغنسية* طويلا اللفظ؛ لذا فعليك استخدامهما بسهولة. حديدو تعني الحديد. *لاحديدو* تعني لا حديد.

فإنّ للسليكون ميلًا شديدًا إلى الترابط مع الأكسجين بحيث إنه لا يوجد في الطبيعة كعنصر نقي، ولكنه مرتبط مع الأكسجين *دائمًا*. لذا، فإنّ مجموعة السليكات هي الأكثر شيوعًا، وتشكل أكثر من 90%من قشرة الأرض. كما أنّ معظم السليكات تحوي باقي العناصر الثمانية الشائعة التي تتضمن Mg ، Fe ، Al ، Ca ، غير أنّ وحدتي البناء الأساسية للسليكات *جميعها* هما Si، و O.

تقسم السليكات إلى مجموعتين هما: *سليكات حديدوماغنسية*، و*سليكات لاحديدوماغنسية*. وكما يشير الاسم، فإنّ السليكات الحديدوماغنسية تحوي الحديد (Fe)، والماغنسيوم (Mg) أو كليهما، إضافة إلى ذرات الأكسجين والسليكون الأساسية. الأوليفين معدن سليكاتي حديدو ماغنيسي $(Mg,Fe)2SiO_4$. وبسبب وجود الحديد والماغنسيوم، فإنّ معادن الحديدوماغنسية السليكاتية تكون ذات كثافة عالية، ولونها قاتم. أما معادن السليكات اللاحديدوماغنسية، فلا تحوي كميات مهمة من الحديد والماغنسيوم. لذا، فهي قليلة الكثافة عمومًا، وذات لون فاتح. إنّ المعدن الأكثر شيوعًا في القشرة الأرضيّة هو الفلسبار، وهو معدن سليكاتي لاحديدوماغنيسي يحوي كلًا من الألومنيوم والصوديوم والبوتاسيوم و/ أو الكالسيوم، إضافة إلى السليكون والأكسجين. ويشكل الفلسبار أكثر من 50% من قشرة الأرض. أما الكوارتز (SiO_2) ثاني المعادن شيوعًا في القشرة، فيتكون من أكسجين وسليكون فقط. فإذا قمت بعملية جمع للصخور والمعادن، فلا بد أن يوجد في مجموعتك فلسبار وكوارتز.

تشكل مجموعة المعادن اللاسليكاتية 8% من كتلة القشرة الأرضية، وتتضمن الكربونات والأكاسيد، والكبريتيدات، والعناصر الحرة مثل الذهب والفضة وغيرها. الكربونات هي المعادن اللاسليكاتية الأكثر شيوعًا. والمعدنان الشائعان من الكربونات هما الكالسيت والدولوميت. يتكون الكالسيت من كربونات الكالسيوم $CaCO_3$. أما الدولوميت فهو خليط من كربونات الكالسيوم وكربونات الماغنسيوم $CaMg(CO_3)_2$. الكالسيت والدولوميت هما المعدنان الرئيسان الموجودان في مجوعة صخور تسمى *الحجر الجيري*.

أما في معادن الأكاسيد، فإنّ الأكسجين يكون مرتبطًا مع فلز أو أكثر كالحديد، والكروم، والمنجنيز، والقصدير، أو اليورانيوم. إنّ مجموعة معادن الأكاسيد مهمة اقتصاديًّا لأنها تحوي *خامات* مفيدة عديدة. والخام ترسب معدنيّ غنيّ بالفلزات الثمينة التي يمكن استخراجها، وتحقيق أرباح منها. معادن الكبريتيدات مهمة كخامات راسبة أيضًا. والمعدن الكبريتيدي الأكثر شيوعًا هو البايريت (ذهب المجانين) FeS_2.

مثال شائع للتبلور هو بلورات الثلج التي تتشكل في الماء عندما تقل الحرارة عن صفر °س. فكما يوجد ماء وثلج هناك ماجما وصخر.

لمعلوماتك

- تؤثر سرعة التبريد في حجم البلورة. فالتبريد السريع يكوّن عددًا كبيرًا من البلورات الصغيرة. أما التبريد البطيء فيسمح للعناصر بالهجرة لمسافات كبيرة والاندماج لتكون بلورات كبيرة. عندما تبرد المادة المصهورة بسرعة كبيرة بحيث لا تملك الذرات وقتًا لتترتب بنسق بلوري يتشكل الزجاج حيث ذراته غير منتظمة مثل زجاج النوافذ العادي.

5.20 تكون المعادن والصّخور

حتى الآن، استكشفنا تعريف المعدن وخصائصه المختلفة وتصنيف المعادن. ونحول اهتمامنا الآن إلى كيفية تشكل المعادن. وبعد فهم كيفية تكوّنها، نتقدم خطوة نحو معرفة كيفية تكون الصّخور. فالصّخور في النهاية مكوّنة من معادن.

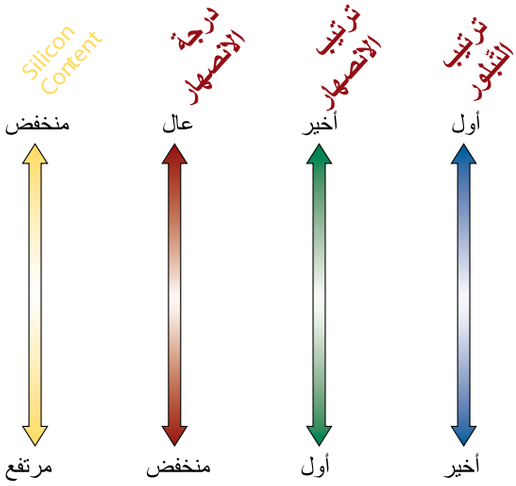
تتشكل المعادن عن طريق **التّبلور (*crystalization*)**؛ أي نمو مادة صلبة متبلورة من سائل أو غاز. يبدأ التّبلور عندما تبدأ الذرات في الترابط بعضها مع بعض بنسق هندسي. ومع زيادة عدد الذرات والروابط تتشكل بلورة بحواف تعكس شكل النسق الهندسي. ومع زيادة عدد الذرات المرتبطة في البلورة المكررة النسق الموجودة تنمو البلورة.

تتبلور المعادن من مصدرين مختلفين عادة هما **الماجما (*Magma*)** – صخر مصهور – والمحاليل المائيّة. وكما سنرى، فالصّخور *النّارية* تتشكل من الماجما، ولكن بعض الصّخور *الرّسوبيّة* تتشكل من المحاليل المائيّة.

التّبلور في الماجما

تتكون الماجما بشكل رئيس من العناصر الموجودة في مجموعة معادن السليكات – سليكون وأكسجين، إضافة إلى كلّ من: الألومنيوم، والبوتاسيوم، والصوديوم، والكالسيوم، والحديد والماغنسيوم. عندما تبدأ الماجما تبريد، تفقد الذرات في السائل الساخن طاقتها الكامنة. ثم تعمل قوة الجذب على سحب الذرات إلى بنية متبلور منتظمة. تتبلور المعادن من الماجما المتبردة بطريقة منظمة اعتمادًا على ترتيب درجة انصهارها.

تعتمد درجة تبلور المعادن السليكاتية على كمية السليكات في المعدن. ومع تبريد الماجما، فإنّ أول معدن يتبلور تكون له أعلى درجة انصهار وأقلّ كمية *سليكا* (Si مرتبط مع O)، بعكس آخر المعادن تبلورًا حيث له أقلّ درجة انصهار، وأكبر محتوى من السليكا (الشكل 12.20). لذا فالمعادن الغنية بالسليكا تنصهر على درجات حرارة أقلّ من المعادن القليلة السليكا. خذ في الحسبان معدني الكوارتز والفلسبار. عندما ينصهر صخر يحوي الكوارتز والفلسبار معًا، فإنّ الكوارتز ينصهر قبل الفلسبار؛ لأنّ الكوراتز يحوي كمية أكبر من السليكا (في الواقع الكوارتز هو سليكا نقية). وفي ماجما تبرد، يتبلور الكوارتز بعد الفلسبار عند درجات حرارة أقلّ.



الشّكل 12.20
المعادن الغنية بالسليكا ذات درجة انصهار قليلة. تكون أول المعادن انصهارًا، أما آخر المعادن فتكون تبلورًا. المعادن الفقيرة بالسليكا لها درجة انصهار مرتفعة هي آخر المعادن انصهارًا وأولها تبلورًا.

تتكون الماجما من سائل – النسبة المنصهرة – وبلورات مكونة حديثًا. وعمومًا عندما تتبلور المعادن في ماجما متبردة، تترسب العديد منها من السائل المنصهر. كما أنّ بعض السائل المتبقي قد يهاجر من المنطقة التي بدأت فيها عملية التّبلور. والنتيجة هي أنّ السائل المنصهر يصبح منفصلًا عن البلورات المكونة حديثًا مما يسمح بتغير تركيب السائل المتبقي مع استمرار عملية التّبلور.

يتغير تركيب السائل بسبب إزالة بعض مكوناته، وانضمامها إلى المعادن المتشكلة بداية. أما المكونات التي لم تصبح جزءًا من المعادن الجديدة، فتبقى في السائل وتنضم إلى المعادن المتكونة أخيرًا. يحدث ذلك لأنّ معظم المعادن ذات التراكيب المختلفة لا تتبلور بعشوائية، ولكن بترتيب يعتمد على درجة الحرارة كما شُرح سابقًا. تحوي المعادن المتكونة في النهاية سليكا أكثر وتجمعًا مختلفًا من العناصر – بنسب مختلفة- مقارنة مع المعادن المتكونة في البداية. ثم يصبح السائل المتبقي فقيرًا بالمكونات المعدنية التي تبلورت، وغنيًّا بالمكونات التي ستتبلور.

ولتسهيل فهم عملية التّبلور في ماجما تبرد، انظر في المثال التالي: افترض أنّ لديك قطع لعبة الكروت، 12 قطعة حمراء و 12 قطعة سوداء. اخلط القطع الـ 24 معًا لتكون مجموعة واحدة تمثل الماجما قبل تكون أيّ معدن. إذن، يتكون السائل من 50% قطع حمراء و 50% قطع سوداء. افترض أنّ 3 قطع حمراء وقطعتين سوداوين تم إزالتها لتكوين معدن. يبقى 9 قطع حمراء و10 سوداء في السائل المتكون حاليًّا من 19 بطاقة، يتكون السائل الآن من 47% حمراء و53% سوداء. لذا أصبح السائل يحوي نسبة أقلّ حمراء، ولكنه غني بالسوداء؛ أي أنّ تركيبها تغير. إذا كانت القطع السوداء تمثل جزيئات السليكا، فهل ترى الآن أنّ عملية التّبلور جعلت الماجما غنية بالسليكا؟ تسمح عملية التّبلور هذه لماجما واحدة أن تكوّن مجموعة من المعادن والصّخور النّاريّة.

كما أنّ الثلج ينصهر على درجة الحرارة نفسها التي تجمد عندها الماء، فإنّ درجة انصهار المعدن هي درجة بدء التّبلور نفسها من الماجما الساخنة.

الشّكل 13.20

تترسب كربونات الكالسيوم من الماء الذي يقطر في الكهف مكونًا هوابط بشكل القمع تتدلى نحو الأسفل في سقف الكهف، وصواعد تمتد نحو الأعلى من الأرض.

■ **نقطة فحص**

1. الأوليفين والبيروكسين من المعادن الحديدوماغنسية السليكاتية التي تتبلور من الماجما المتبردة. في سلسلة التّبلور، يتبلور الأوليفين أولًا، ثَمَّ البيروكسين. أي المعدنين يحوي سليكا أكثر؟
2. يتطلب وجود درجة انصهار عالية وجود درجة حرارة عالية للانصهار. إنّ درجة انصهار منخفضة تعني حرارة قليلة لتنصهر المعادن. كيف تفسر أنّ درجة الانصهار العالية تعني التّبلور أو لا؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1 . يحتوي معدن البيروكسين على كمية سليكا أكثر من الأوليفين. ومع تبرد الماجما، فإنّ معادن تحوي سليكا أقلّ تتبلور قبل المعادن التي تحتوي على سليكا أكثر.

2 . عندما تكون الحرارة مرتفعة، فإنّ مكونات المعادن المحتملة تكون في الحالة السائلة. تذكر أنّ الماء يتجمد على الحرارة نفسها التي ينصهر عليها الثلج. لذا، فكّر في نقطة الانصهار على أنها مساوية لنقطة التجمد؛ أي التّبلور. يتكون الثلج عندما تنخفض حرارة الماء أقلّ من نقطة التجمد/ الانصهار. عندما تبدأ الماجما بالتبرد، فإنّ المعادن ذات درجة الانصهار المرتفعة تتبلور أولًا؛ لأنّ درجة حرارة الماجما انخفضت عن درجة تجمدها / انصهارها. المعادن ذات درجة الانصهار المنخفضة لا تتكون بعد؛ أي أنها تبقى في الحالة السائلة. لا يمكن أن تبدأ التّبلور حتى تصل إلى درجات حرارة منخفضة. لذا، فإنّ المعادن ذات درجات الانصهار المنخفضة تتبلور أخيرًا. عندما يتم ذلك كله، فإنّ الماجما تتحول إلى صخر.

التّبلور في المحاليل المائيّة

تتبلور المعادن في المحاليل المائيّة بطريقتين: الأولى، مرتبطة مع المراحل الأخيرة من تبلور الماجما – تحوي الماجما عادة 1% - 6% ماء. عندما يتصلب جسم من الماجما، فإنّ هذا الماء الساخن جدًّا يتحرك خلال الشقوق في الصخر الجديد، وعادة في الصّخور المجاورة – *نشاط حرمائي**. تحوي هذه المحاليل المائيّة العديد من المكونات المعدنية الذائبة. وتصبح هذه المحاليل مشبعة كيميائيًّا مع انخفاض الحرارة، مما يسبب ترسب العديد من المعادن. وعادة ما تترسب هذه المعادن في الشقوق وأحيانًا داخل الصخر نفسه. هناك العديد من ترسبات الخامات المهمة في هذه الأيام نجدها بهذه الطريقة.

وبالطريقة نفسها التي تكوّن المعادن الحرمائية، فإنّ **الرّسوبيّات الكيميائية *(Chemical sediments)*** تتكون بترسب المكونات المعدنية من المحاليل المائيّة. أما في الطريقة الثانية، فتتكون الرّسوبيّات الكيميائية عند درجات حرارة أقلّ كثيرًا من حرارة باطن الأرض، كما هو الحال في حرارة جسم مائي على سطح الأرض. تقسم الرّسوبيّات الكيميائية إلى نوعين، هما الكربونات والمتبخرات.

الكربونات معادن وصخور تتكون من كربونات الكالسيوم $CaCO_3$ التي تحوي معدن *الكالسيت*. كما أنّ معدن الدولوميت $CaMg(CO_3)_2$ أيضًا هو معدن كربونات شائع. ويمكن للكربونات أن تتكون بطريقتين هما: 1- ترسيب غير عضوي (لاحيوي). 2- ترسيب حيوي (عضوي)، كما سنرى لاحقًا في هذا الفصل. يتكون العديد من صدف البحر من كربونات الكالسيوم التي يأخذها الكائن من مياه البحر. إنّ صخور الكهوف مثل الصواعد والهوابط مثال على كربونات الكالسيوم المترسبة بشكل غير حيوي من الماء الذي يقطر من أعلى الكهف (الشكل 13.20). وتتشكل الصواعد والهوابط لأنّ المياه الجوفية (الفصل 23) تلتقط الكربونات والكالسيوم في أثناء حركتها خلال صخور الحجر الجيري في الكهف. يكون الماء الذي يقطر مشبعًا بالكالسيت الذائب. لذا، تتشكل الصّخور من نقط المياه عندما يزيل التبخر كميات قليلة من الماء في أثناء تقطر الماء.

أما *المتبخرات* فهي معادن وصخور تترسب عندما يتبخر جسم محجوز من ماء البحر أو ماء بحيرة مالحة. ومن الأمثلة على هذا: الجبس، والانهيدرايت، والهاليت. وتستعمل هذه الأسماء لكلّ من المعادن والصّخور المكونة من نوع واحد من المتبخرات. تترسب المتبخرات في المحاليل المائيّة بطريقة مشابهة لتبلور المعادن من نوع واحد من المتبخرات. تترسب المتبخرات في المحاليل المائيّة بطريقة مشابهة لتبلور المعادن من

* النشاط الحرمائي غني بالفلزات النادرة. تبقى هذه العناصر في وضع كيميائي مريح (مختبئة) في المحلول المائي حتى إذا أصبح تركيزها في المحلول غالبًا فإن ذلك يسمح لها بأن تكون معادنها الخاصة بها - كخام الذهب مثلا.

الماجما. ولكن يكمن الفرق في أنّ الذوبانية وليست نقطة الانصهار هي التي تحدد المعادن التي تتبلور أولا. ومع استمرار التبخر، فإنّ المعادن ذات الذوبانية الأقل؛ أي الأصعب في الذوبان كالجبس، يتبخر أولًا، تتبعه المعادن التي تذوب بسهولة (المعادن ذات الذوبانية الأعلى) مثل الانهيدريت ثم الهاليت. وعلى الرغم من أنّ الكربونات تشكل معظم الرّسوبيّات الكيميائية، فإنّ المتبخرات قليلة، لكنها مهمة.

■ **نقطة فحص**

1 . ما نوع المعدن المتشكل، عندما يتبخر الماء من جسم مائي؟
2 . المعدن ذو الذوبانية القليلة لا يذوب بسهولة. أما المعدن ذو الذوبانية العالية فيذوب. كيف يرتبط هذا العامل (الذوبانية) مع التّبلور؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1 . تترسب معادن المتبخرات من المحاليل مع تبخر الماء.
2 . المعادن التي تذوب بسهولة تبقى ذائبة فترة أطول من المعادن التي لا تذوب بسهولة. لذا، مع جفاف جسم مائي محصور، فإنّ أول المعادن تبلورًا هي المعادن التي لا تذوب بسهولة – أي ذات الذوبانية القليلة. في حين تبقى المعادن التي تذوب بسهولة (ذوبانية عالية) في المحلول لفترة أطول، أي أنها آخر المعادن تبلورًا.

رأينا الآن الطرائق المختلفة لتشكل المعادن، ويمكننا الآن تعرف إلى كيفية تشكيل الصخر من تجمع مجموعة من المعادن. نعلم أنّ المعادن التي تشكلت من تبلور الماجما تكون الصّخور النّاريّة. والمعادن التي تشكلت بالترسيب من الماء أو من تبخره تشكل بعض أنواع الصّخور الرّسوبيّة. وسنرى الآن أيضًا أن الصّخور النّاريّة تتفتت لتكون صخورًا رسوبية، وأنّ نوعًا ثالثًا من الصّخور؛ الصّخور المتحوّلة، ينشأ عن الصّخور الموجود سابقًا. فالمعادن بأشكالها المتعددة هي حجارة البناء للصخور المختلفة على الأرض.

■ 6.20 أنواع الصّخور

يعرف **الصّخر** بأنه تجمع معادن. بعض الصّخور عبارة عن تجمع قطع من صَدَف أحافير، أو مادة عضوية صلبة، أو تجمع اثنين أو ثلاثة من هذه المكونات. وكما أنّ المعادن مزيج أو مركبات كيميائية، يمكن التفكير كذلك في أنّ الصّخور مزيج فيزيائي. ففي بعض الصّخور، تلتحم الحبيبات معًا، وفي بعضها الآخر تكون الحبيبات ملتحمة بقوة. ويمكن أن نرى بلورات المعادن في العديد من الصّخور. يحوي الجرانيت، وهو أحد أكثر الصّخور شيوعًا في قشرة الأرض، بلوراتٍ مرئية من معادن الفلسبار، والكوارتز، والهورنبلند وغيرها (الشكل 14.20). وبالمقابل، فإنّ صخورًا كالبازلت مثلًا، أو الغَضار، أو الأردواز يصعب تمييز الحبيبات فيها؛ لأنها صغيرة جدًّا بحيث لاترى بالعين المجردة.

تقسم الصّخور إلى ثلاثة أنواع (الشكل 15.20) اعتمادًا على طريقة تشكلها.

فالصخور النّاريّة (*Igneous Rocks*) تتشكل بالتبريد والتّبلور من صخر ساخن مصهور. وتعني كلمة *ناريّ* أنّ هذه الصّخور تشكلت من النار. وقد تشكلت الصّخور النّاريّة *الجوفية* عندما برد مصهور صخري – ماجما – تحت سطح الأرض. أما الصّخور النّاريّة *البركانيّة* فتتشكل عندما يبرد مصهور صخري على سطح الأرض؛ لابة. والبازلت صخر بركاني شائع. أمّا **الصّخور الرّسوبيّة (*Sedimentary Rocks*)** فتتشكل على سطح الأرض، أو بالقرب منه من تلاحم *الرّسوبيّات* وتراصها – صخر، أو معدن، أو صدفة، أو مادة عضوية صلبة حُملت مع الماء أو الرياح أو الجليد، وترسبت في مناطق منخفضة. تتشكل الصّخور الرّسوبيّة أيضًا عندما تترسب المعادن من المحاليل المائيّة على سطح الأرض أو بالقرب منه. الحجر الرملي، والغضار، والحجر الجيري صخور رسوبية شائعة.

الشّكل 14.20
الصخر تجمع معدن أو أكثر، وأحيانًا قطع صدف و/أو مادة عضوية صلبة. هذا الجرانيت هو تجمع معادن الفلسبار، والكوارتز والهورنبلند.

في حين تتشكل الصّخور المتحوّلة (*Metamorphic*) من صخور قديمة، صخور موجودة أصلا (نارية أو رسوبية أو متحولة) تحولت في باطن الأرض بفعل الحرارة العالية أوالضغط العالي أو كليهما – دون كلمة انصهار، فإنّ الكلمة متحولة تعني التغير في الشّكل. فمثلًا، الرخام صخر متحول عن الحجر الجيري، والأردواز متحول عن الغضار.

■ 7.20 الصّخور النّاريّة

تتكون قشرة الأرض- بشكل رئيس- من صخور عديدة ذات أصل ناري. على القارات، الصّخور النّاريّة الشائعة هي الجرانيت والإنديزيت. أما على قاع المحيط، فالبازلت هو الصخر الشائع. والصّخور النّاريّة كلّها بدأت أصلًا من ماجما.

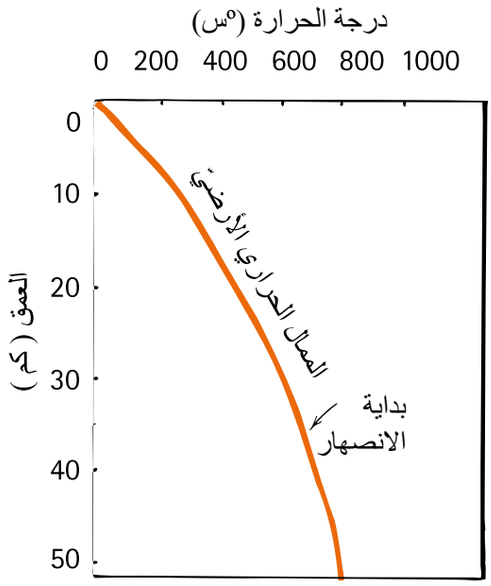
نشأة الماجما

تعلمنا أنّ العديد من المعادن تتشكل من تبريد الماجما. ولكن، أين تتشكل؟ هل توجد الماجما لأنّ باطن الأرض مصهور؟ الجواب لا؛ فباطن الأرض صلب تقريبًا وليس مصهورًا. والطبقة الوحيدة السائلة من الأرض مكونة من حديد مصهور وليس ماجما، ولا نجدها إلا على عمق 3000 كم تقريبًا.

الشّكل 15.20
أنواع الصّخور الرئيسة الثلاثة:
(أ) البازلت والجرانيت صخور نارية.
(ب) الحجر الرملي والحجر الجيري صخور رسوبية.
(ج) الرخام والأردواز صخور متحولة.

ببساطة، تنشأ الماجما عن صخور انصهرت. وكما يبرد الماء لتكوين ثلج، تبرد الماجما وتتصلب لتكون المعادن التي تصبح صخرًا في النهاية. ولكن كيف ينصهر الصخر ليصبح ماجما؟ تشير درجات الحرارة التي تم تسجيلها في المناجم والآبار إلى أنّ درجة حرارة الأرض تزداد خلال معظم القشرة الأرضيّة بمعدل 30°س لكلّ كيلومتر من العمق (الشكل 16.20). إلا أنّ الزيادة في الحرارة غير كافية لتسبب صهر الصّخور. كما أنّ الحرارة في بعض الأعماق أكبر من حرارة الماجما.

إذا كانت الحرارة على عمق معين أسخن من الماجما، فَلِمَ تكون الصّخور صلبة؟ يمكن الوصول إلى الإجابة باستخدام الماء كمثال مشابه. راجع (الدرس 7.7). يحدث تغير في حالة الماء عند تسخينه إلى درجة الغليان. ونعلم أنّ الماء يغلي عند درجة 100°س على مستوى سطح البحر. وإذا زدنا الضغط، فإنّ الحرارة يجب أن تكون أعلى للوصول إلى الغليان. لذا، فإنّ تغير الحالة يحتاج إلى ضغط وحرارة. وفي حالة الصّخور الساخنة في الأعماق، تكون تحت ضغط كبير بسبب وزن الصّخور فوقها — عندها يكون الضغط كافيًا لمنع الانصهار، حتى على درجات حرارة أعلى من انصهار الماجما.



الشّكل 16.20
تزداد درجة الحرارة داخل الأرض بمعدل 30°س لكلّ كيلو متر من العمق من السطح إلى عمق القشرة الأرضيّة القارية (يكون الممال الحراري أقلّ كثيرًا في القشرة العميقة وفي الستار). تسمى هذه الزيادة في الحرارة مع العمق *الممالَ الحراريَّ الأرضيَّ*.

ولكن الصّخور تنصهر أحيانًا لتكون الماجما. وهناك ثلاثة أسباب لتفسير هذا: السبب الرئيس متعلق بكمية الماجما المتكونة. حيث ترتفع الصّخور الحارة إلى الأعلى، من الأعماق إلى مستويات ينخفض فيها الضغط لبدء الانصهار*.

آلية أخرى لتكوين الماجما هي إضافة ماء إلى الصخر مما يؤدي إلى تقليل درجة الانصهار. ولفهم الانصهار الناتج عن حث السوائل يمكن استخدام الماء كمثال.

* تسلك الطبقة الواقعة تحت القشرة- الستار- سلوك مادة صلبة لدنة. ومع أنّ الحركة بطيئة جدًّا، إلا أنّ الصّخور تنساب بتيارات الحمل التي تجعل المادة الساخنة ترتفع والباردة تهبط.

إذا وجدت مادة غريبة في الماء، فإنها تقلل من درجة تجمدها (يجب أن تكون أبرد حتى تتجمد). وبالطريقة نفسها فإنّ المادة الغريبة تقلل نقطة انصهار الثلج. فمثلًا، إذا وضع الملح على ثلج بدرجة صفر °س، فإنه يؤدي إلى انصهاره مع أنّ الحرارة لم تتغير. يقلل الملح من درجة تجمد الماء. لذا، فإنّ صفر°س لم تعد منخفضة لدرجة تكفي لإبقاء الماء متجمدًا. وفي حالة الصخر، فإنّ الماء مادة غريبة تقلل درجة انصهار الصخر – مما يكفي لصهره.

ينشأ عن هاتين الطريقتين ماجما تصعد نحو الأعلى خلال الصّخور القديمة. وهذا يوصلنا إلى الطريقة الثالثة – وهي أنّ الصخر ينصهر إذا ارتفعت درجة حرارته، غالبًا، بسبب وجود مواد أسخن صعدت من مناطق أعمق. وسنقوم باستكشاف أول طريقتين بتفاصيل أكبر في الفصل 22 حيث يمكننا ربطهما بنموذج تكتونية الصّفائح. أما الآن فسنحدد نقاشنا في المعلومات العامة عن الماجما من الصّخور المصهورة.

تذكّر دائما أنّ الصخر هو تجمع من المواد الصلبة. لذا، فإنّ صهر الصخر إلى ماجما يحدث على مدى حراري واسع. فمع تسخين الصخر، فإنّ أول المعادن انصهارًا هي المعادن ذات درجة الانصهار المنخفضة. وهو مشابه لعملية التّبلور من الماجما، ولكن تغيّر الحالة يحدث بترتيب معكوس. إذا انصهرت المعادن جميعها في الصخر في آن واحد، فإنّ تركيب الماجما المتكونة سوف يكون مشابهًا لتركيب الصخر الأصلي. إلا أنّ الانصهار لا يحدث هكذا لأن القاعدة هي **الانصهار الجزئي (*Partial melting*)**.

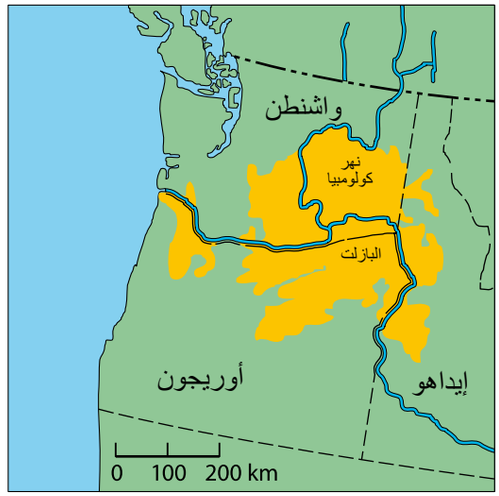
فالماجما الناتجة عن الانصهار الجزئي للصخر تتكون من الأجزاء المعدنية التي انصهرت فقط، أي المعادن ذات درجات الانصهار المنخفضة. وعليه، فإنّ الماجما المتكونة لها تركيب مختلف عن الصخر الذي انصهر جزئيًا وكونها. وبهذه الطريقة، فإنّ الماجما تتكون بتراكيب مختلفة. ولأنّ الماجما تبرد لتكون صخورًا نارية، فإنه يوجد العديد من هذه الصّخور. ثمّ إنّ هناك أهمية أخرى للانصهار الجزئي، وهي أنّ الماجما المتكونة حديثًا تحوي سليكا أكثر من الصخر الأصلي؛ لأنّ المعادن الغنية بالسليكا تنصهر أولا. فالمعادن الفقيرة بالسليكا تبقى غير مصهورة.

ولتمثيل طريقة الانصهار الجزئي بشكل واضح، نفترض وجود وعاء يحوي كميات متساوية من الماء، وكذلك الزبد والجبن. بداية، نقوم بتجميد الخليط، والخليط المتجمد هو الآن صخر يتركب من 33% ماء. وبداهة، نعلم أنّ درجات انصهار الجليد والزبد والجبن مختلفة. وعند تسخين المزيج المتجمد، فإنّ أول المواد انصهارًا هو الماء. والمواد التي انصهارها أصعب كالزبد والجبن تبقى غير منصهرة في "الصخر". لدينا الآن سائل مكون من 100% من الماء، أي أنّ نسبة الماء في السائل أعلى من نسبة الماء التي كانت في "الصخر".

أنواع ثلاثة من الماجما، أنواع ثلاثة رئيسة من الصّخور النّاريّة

هناك ثلاثة أنواع رئيسة من الماجما هي: *بازلت*، *وأنديزيت*، *وجرانيت*. وعمومًا، فإنّ الأنواع المختلفة من الماجما توجد في أماكن مختلفة جيولوجيًّا. وسنربط هذه الأنواع الثلاثة من الماجما بالصّفائح التّكتونيّة في الفصل 22.

إنّ أكبر المناطق في باطن الأرض هي الستار الصلب، وهو مكوّن من صخور نارية ذات نسبة سليكا قليلة. وعندما تتعرض هذه الصّخور للانصهار الجزئي، تتكون ماجما بازلتية قليلة السليكا نسبيًّا، تحوي 50% سليكا تقريبًا. وإذا تصلّبت على سطح الأرض، كوّنت لابة بازلتية، وهو الصخر الناري القاتم اللون المعروف *بالبازلت*، وهو الصخر الذي تتكون منه جزر هاواي وقشرة المحيط. تحوي الماجما الأنديزيتية 60% سليكا. يتكوّن صخر الأنديزيت من لابة أنديزيتية أخذت اسمها من جبال الأنديز في أمريكا الجنوبية. تحوي الماجما الجرانيتية 70% سليكا، وإذا بردت ببطء يتكون *الجرانيت* وصخور جرانيتية مشابهة. وتتكون الصّخور النّاريّة في القشرتين القارية والمحيطية معا من 80% من البازلت، و 20% من الأنديزيت، و10% من الجرانيت.



الشكل 17.20
يغطي البازلت المتدفق الذي كوّن هضبة كولومبيا أكثر من 200000 كم^2 من سطح الأرض.

(أ)

(ب)

(جـ)

الشكل 18.20
الأنواع الثلاثة من البراكين:
(أ) براكين الدروع، مثل مونا لوا الذي لديه منحدرات قليلة الميل 1 - 10° عن الأفق. (ب) مخروط الرماد، كفوهة سنست في أريزونا، له ميل حاد 25 - 40° وشكل الفوهة كالوعاء. (جـ) المخاريط المركبة كجبل بكترسكي في فوجي أيضًا حاد. وبالمعدل، فإنّ ميل البراكين المركبة يبدأ من 30° عند القمة ويقل تدريجيًّا حتى يصل 10° عند القاع.

■ **نقطة فحص**

1 . إذا كان 80% من الصّخور النّاريّة قد نشأ عن ماجما بازلتية، فلماذا نرى كثيرًا من الجرانيت؟
2 . إذا كانت الماجما البازلتية قد نشأت عن الانصهار الجزئي لصخور الستار، فكيف تكونت معظم الماجما الجرانيتية؟

هل كانت هذه إجابتك؟

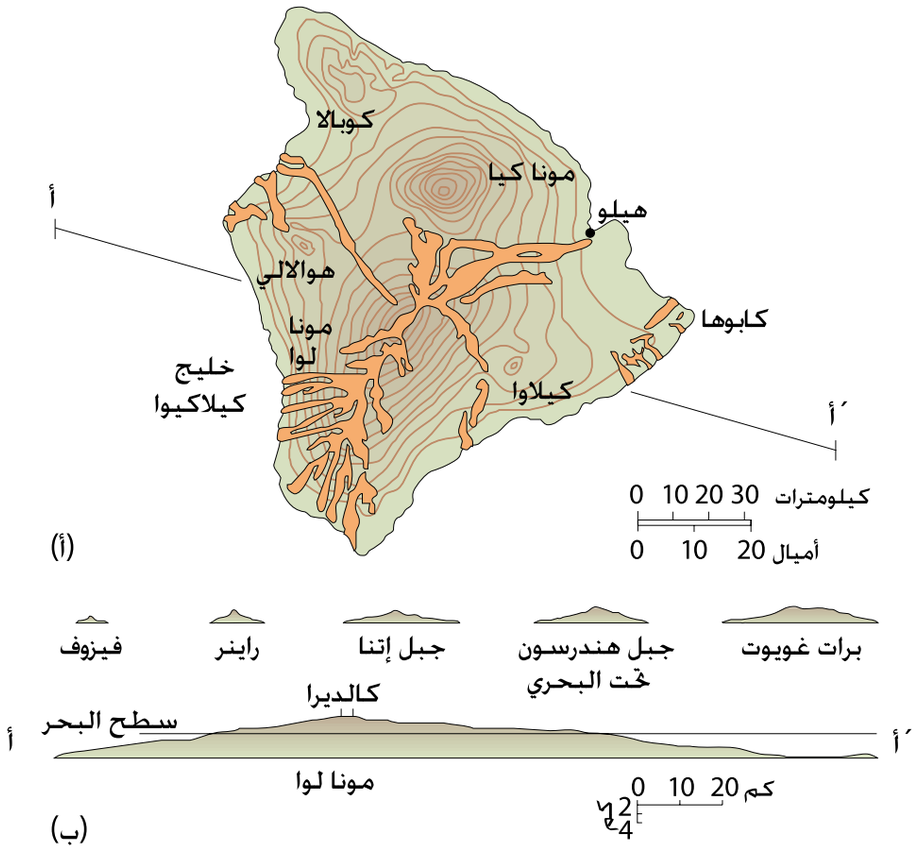
1 . البازلت هو الصخر الناري الشائع على قاع المحيط. انظر إلى مجسم كرة أرضية لترى أنّ المحيطات تغطي 71% من سطح الأرض. ونرى الكثير من الجرانيت لأنه الصخر الأكثر شيوعًا على القارات.
2 . عندما تصعد الماجما نحو سطح الأرض، فإنها تلامس الصّخور المجاورة. تحوي الصّخور القشرة القارية كمية من السليكات أكبر من الستار. ويتم صهر الصّخور الغنية بالسليكا جزئيًّا عن طريق الماجما الصاعدة نحو الأعلى وانضمامها إلى المصهور، مما يزيد محتوى الماجما من السليكا. إضافة إلى أنّ عملية التّبلور تزيد محتوى الماجما من السليكا. ومع بدء تبلور الماجما وانفصال السائل عن البلورات، يصبح السائل أكثر غنى بالسليكا. وفي النهاية يتم تكوين ماجما جرانيتية (70% سليكا) وعندما تبرد ينشأ صخر الجرانيت.

الصّخور النّاريّة على سطح الأرض

تقسم الصّخور النّاريّة إلى نوعين اعتمادًا على مكان تشكلها؛ فالصّخور النّاريّة الناتجة عن ثوران المصهور الصخري على سطح الأرض تسمى **صخورا بركانيّة (*Volcanic Rocks*)** (أو *سطحية*). أما **اللابة (*Lava*)** فهي الماجما المصهورة عندما تندفع من باطن الأرض إلى السطح وتنساب عليه. يطلق مصطلح لابة على الصخر المصهور وعلى الصخر الصلب الذي يتكون منه.

يمكن للابة أن تندفع خلال الشقوق في سطح الأرض، أو خلال فوهة مركزية؛ بركان. وعلى الرغم من أنّ اندفاع الماجما من الشقوق أكثر شيوعًا، إلا أنّ ثورات البركان مألوفة لنا أكثر لأننا نراها بشكل أخّاذ. يحدث معظم اندفاع الشقوق تحت الماء حيث تندفع اللابة البازلتية في أماكن تباعد قاع المحيط بعضها عن بعض. كما يحدث ثوران الشقوق على اليابسة. وقد تدفقت كميات كبيرة من اللابة التي تسمى *البازلت الفيضي* على فترات عبر تاريخ الأرض وغطت مساحات واسعة مكونة سهول اللابة. وقد نتجت هضبة كولومبيا في المحيط الهادي الشمالي الغربي عن بازلت فيضي كثيف (الشكل 17.20). وكذلك هضبة الديكان في الهند.

البراكين فوهات يصعد منها الماجما إلى سطح الأرض، وتثور على شكل لابة. وهناك ثلاثة أنواع من البراكين هي: الدروع، ومخروط الرماد، والمركبة (الشكل 18.20)



الشّكل 19.20

(أ) مونا لوا بركان دروع على جزيرة هاواي، وهو أكبر بركان على الأرض. (ب) عند مقارنته بالبراكين الكبيرة الأخرى يظهر حجمه واتساعه المثيران.

تنشأ براكين الدروع عن تدفق منتظم للابة بازلتية سهلة التّدفّق، حيث تتدفق خارجًا في الاتجاهات جميعها لتكوّن مخروطًا ذا جوانب قليلة الانحدار. يعدّ بركان مونا لوا في هاواي أكبر بركان على الأرض، وهو بركان دروع يرتفع 4145م فوق سطح البحر، وأكثر من 9750م فوق قاع المحيط (الشكل 19.20) .

أما *براكين مخروط الرماد* فتكون ذات حواف حادة، ولكنها صغيرة مقارنة ببراكين الدروع. إنّ مخاريط الرماد غير محصورة بنوع واحد من اللابة، بل تتكون من تراكم رماد وفتات، وصخور تفجرت من فوهة واحدة لتكوّن مخروطًا متماثلًا منحدر الجوانب. وهناك مثالان معروفان لمخاريط الرماد هما: فوهة سَنْسِت في أريزونا، وباريكوتن في المكسيك.

في حين ينشأ بركان *المخروط المركب* عن طبقات متتابعة من اللابة والرماد والطين. للمخاريط المركبة قمة ذات حواف حادة وجوانب قليلة الانحدار. ومن الأمثلة على المخاريط المركبة بركان جبل سانت هيلينز في ولاية واشنطن وهو نشط. ثار البركان بقوة عام 1980 ، وغيّر حياة آلاف البشر، وحوّل أكثر من 200 ميل مربع إلى أرض محروقة بعد أن كانت غابة.

تثور البراكين المركبة بانفجار؛ لأنّ الماجما واللابة فيها لا تتدفق بسهولة. تقوم الماجما اللزجة بحجز الغازات التي تزيد الضغط داخل البركان. ويمكن مقارنة الغازات في الماجما بالغازات في زجاجة مياه غازية. فإذا قمنا بتغطية الزجاجة وتحريكها بقوة، فإنّ الغازات تنفصل عن السائل مكوّنة فقاعات. وعند إزالة الغطاء، يتحرر الضغط، وتنفجر الغازات والسائل من الزجاجة. تسلك الغازات في الماجما السلوك نفسه. وفي بداية البركان، يزداد كلّ من الضغط والحرارة، وتنفجر الماجما اللزجة والصّخور فوقها إلى غبار وحجارة. وعندما تتحد مع الرماد البركاني، فإنّ هذا الخليط يتمدد ويدمر كلّ شيء في طريقه. ومن أمثلة ذلك النشاط الذي حدث في جبل فيزوف عام 1979م، وجبل بيلي 1902م، وسانت هيلينز 1980م.

وهناك ثلاثة أنواع من الصّخور البركانيّة هي: بازلت، وأنديزيت، وريوليت. يتكون الريوليت عند ثوران لابة غرانيتية على سطح الأرض، ويوجد بأشكال مختلفة (الشكل 20.20). ويمكن أن يكون صخرًا بركانيًّا ناعم الحبيبات، أو أن تبرد اللابة بسرعة لتكون زجاجًا بركانيًّا أو خفافًا إذا وجدت فراغات صغيرة بسبب فقاعات الغاز في الصخر، أو أوبسيدين إنْ لم توجد فراغات، أو رمادًا بركانيًّا إذا ثار منفجرًا.

لمعلوماتك

تتكون الصّخور البركانيّة مثل البازلت على سطح الأرض حيث تبرد بسرعة، ولها بلورات مجهرية. تتكون الصّخور الجوفية مثل الجرانيت تحت سطح الأرض حيث تبرد ببطء. لذا، فإنّ لها بلورات ترى بالعين المجردة.

(أ)

(ب)

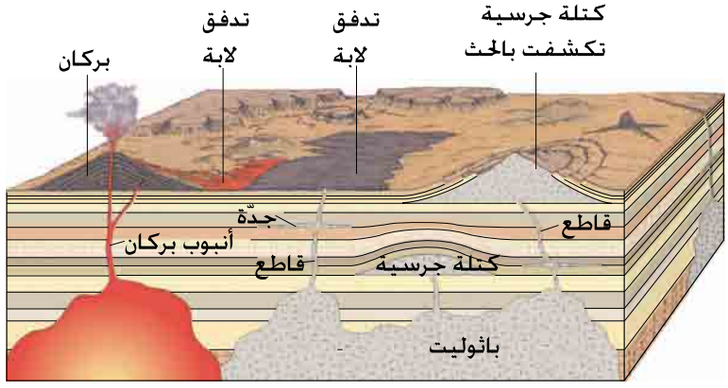
(جـ)

الشّكل 20.20

يوجد الصخر الناري ريوليت بعدة أشكال هي:
(أ) ريوليت ناعم الحبيبات (ب) خفاف (جـ) أوبسيدين

الصّخور النّاريّة تحت سطح الأرض

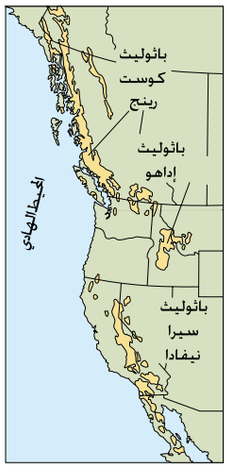
عندما تبرد الماجما تحت سطح الأرض، يسمّى الصّخر النّاريّ المتشكّل **صخرًا جوفيًّا (*Plutonic Rock*)** (أو محقونًا). وقد اشتقت كلمة *plutonic* من كلمة (بلوتو) التي تعني إله العالم السّفلي. تسمى الصّخور الجوفية جميعها المحقوناتِ (جمع محقون). ولأنها صخور جوفية، فإنه لا يمكن دراستها إلا بعد أن تتكشّف بالرفع والحتّ على سطح الأرض. ويعدّ الجرافيتُ الصّخرَ الجوفيَّ الأكثر شيوعًا.



الشّكل 21.20

مقطع يوضح مظاهر نارية جوفية.

توجد المحقونات بأشكال وأحجام مختلفة، تتراوح بين أشكال أنابيب صغيرة تسمى *قواطع*، إلى أجسام كبيرة تدعى *باثوليثا* (الشكل 21.20). وتعدّ الباثوليث أكبر المحقونات، وقد تغطي مساحة أكبر من 100 كم^2 على سطح الأرض، وتتكوّن من أحداث جوفية في أثناء ملايين السنين – وتكون مركز العديد من الجبال الرئيسة حول العالم. وعمومًا، فهي تمثل حجرات الماجما المتبلورة التي غذّت لمدة طويلة براكين مجوّاة. كما أنّ العديد من الجبال الحالية ما هي إلا لبّ باثوليث متكشف كان يشكّل جبالًا أكبر، وأزيلت بالحتّ منذ مدة طويلة. بعض الباثوليث الكبيرة في أمريكا الشمالية هو باثوليث كوست وينج والسيرانيفادا (الشكل 22.20). ومن المثير حقًّا معرفة أنّ السيرانيفادا ترتفع مع الزمن – بعد أن تبلورت الماجما – لأنّ معدل الرفع أكبر من معدل التّعرية.



الشّكل 22.20

مقطع يوضح مظاهر نارية جوفية.

8.20 الصّخور الرّسوبيّة

تعدّ الصّخور الرّسوبيّة الأكثر شيوعًا في الجزء العلويّ من القشرة؛ فهي تغطي ثلثي سطح الأرض مكونة طبقة رقيقة فوق الصّخور النّاريّة والمتحوّلة القديمة. ولأنّ الصّخور الرّسوبيّة تحوي بقايا كائنات وصخور قديمة، فإنها تعطي معلومات عن الأحداث الجيولوجية التي حدثت على سطح الأرض.

الشّكل 23.20
الصّخور على قمة هذا الجبل في منطقة ويلز تم تفتيتها بالتّجوية الميكانيكيّة. في هذه البيئة الباردة يتجمد الماء في شقوق الصخر، ويتمدد، مما يسبب تكسر الصخر.

لمعلوماتك

عندما يتجمد الماء فإنّ جزيئات الماء ترتّب نفسها في بناء بلوريّ ذي ستة جوانب وتحوي فضاء كبيرًا. لذا فإنّ الماء يتمدد مع التجمد. وفي الطبيعة، تقوم عملية التجمد بتفتيت الصخر ميكانيكيًّا. يحدث وتد الجليد عندما يتسرب الماء إلى الشقوق الصغيرة ثم يتجمد، ويتمدد فيتسع الشق. وفي النهاية، ومع تكرار التجمد فإنّ الشقوق تكسر الصخر.

تكوّن الصّخر الرّسوبيّ

يتكوّن الصّخر الرسوبيّ بعملية طويلة تتكون من أربع مراحل هي: *تجوية*، *وتعرية*، *وترسيب*، *وتصخّر*. **فالتّجوية (*weathering*)** هي تفتّت الصّخر في مكانه على سطح الأرض أو بالقرب منه. تقوم العوامل مثل الماء، والرياح، والجليد، والسوائل الكيميائية بتجوية الصخر، أي تفتيته إلى قطع صغيرة، وتشقق سطحه، وبري حوافّه، وفي بعض الأوقات تغيّر تركيبه الكيميائي. وهناك نوعان من التّجوية هما: *الميكانيكيّة*، *والكيميائية*. وكلاهما يؤدي إلى تكوين رسوبيات. تقوم *التّجوية الميكانيكيّة* بتفتيت الصّخور فيزيائيًّا إلى قطع صغيرة (الشكل 23.20). فمثلًا، تجمد الجليد وانصهاره يمكن أن يوسع الشقوق الموجودة في صخر. أما في *التّجوية الكيميائية*، فنجد أنّ التفاعل مع الماء يحلل الصخر، تمامًا كما تقوم البكتيريا بتحليل المادة العضوية، ولكن بتفاعلات كيميائية مختلفة (الشكل 24.20). وبما أنّ الماء السائل وبخار الماء موجودان في كلّ مكان (عدا الماء السائل في الأقطاب)، فإنّ التّجوية الكيميائية تنتج رسوبيات أكثر من التّجوية الميكانيكيّة.

الشّكل 24.20
صخور الجرانيت في صحراء موجافا في كاليفورنيا تم بريها إلى أشكال دائرية بالتّجوية الكيميائية. يقوم ماء المطر بتحليل الطبقة الخارجية من الصخر مما يجعل الصخر سهل التّعرية. يقوم المطر بتعرية الصخر بإزالة الطبقات الخارجية الضعيفة تاركة كتلًا دائرية الشّكل. يحدث التّدوير لأنّ التّجوية الكيميائية تكون أسرع عندما تزداد المساحة المعرضة للتجوية، تضم الحواف والزوايا أكبر مساحة سطحية.

مع تجوية الصخر فإن يتعرى أيضًا. **التعرية (*Erosion*)** عملية يحدث فيها إزالة ونقل أجزاء الصخر التي تم تجويتها بواسطة الماء، أو الرياح أو الجليد. الفرق الأساسي بين التجوية والتعرية أن التعرية لا تحدث في كل مكان. بل تتطلب الحركة. فالماء الجاري هو العامل السائد في التعرية. تكون القطع الناتجة عن التجوية الميكانيكية للصخر ذات حواف حادة عندما تنشأ في البداية. وفي أثناء عملية النقل، وبخاصة الماء، تقوم القطع المختلفة بالتصادم والتكسر، ما يؤدي إلى تصغير حجمها وبري حوافها الحادة. وعندما تتوقف عملية النقل تبدأ عمليتا الترسيب والتصخر.

التوضع *deposition* هو المرحلة التي تستقر فيها الحبات المعراة. تترسب المواد على شكل طبقات أفقية، وكل طبقة أحدث من التي تحتها. وكلما زاد حجم الرسوبيات كلما كان التيار أقوى ليقدر على حملها. ومع تباطؤ التيار فإن الحبات الكبيرة تترسب أولًا بينما تبقى الحبات الصغيرة محمولة مع التيار. وبهذه الطريقة يتم فرز الرسوبيات بحسب الحجم (الشكل 25.20).

في عملية **الترسيب *sedimentation***، تترسب الرسوبيات أفقيًّا طبقة تلو الأخرى. ومع تراكم الرسوبيات تبدأ في التحول إلى صخر رسوبي. عندها نقول إن الرسوبيات قد **تصخرت *lithified***، يعني ننها بدأت تتحول إلى صخر. يحدث التصخر عن طريقة عمليتي **التراص *compaction*** **والسمنة *-ce mentation.*** المرحلة الأولى هي التراص. فمع ضغط وزن الرسوبيات العليا على الطبقات الأعمق ، تتراص حبات الرسوبيات معًا. ويعمل التراص على إخراج الكثير من الماء من الفراغات بين حبات الرسوبيات. عادة ما يحتوي الماء المسامي المتبقي مواد ذائبة مثل السليكا، وكربونات الكالسيوم وأكاسيد الحديد. يمكن لهذه المركبات أن تترسّب من المحاليل وتملأ جزئيًّا المسامات بمادة المعدن.تقوم مادة المعدن بلحم الحبات معًا وتصبح مادة لاحمة. هذه هي عملية السمنتة. تعد مادة السيليكا أكثر المواد اللاحمة ديمومة، وتكون أكثر الصخور الرسوبية صلابة ومقاومة. عندما يكون أكسيد الحديد مادة لاحمة فإنه يؤدي إلى تكون الصبغة الحمراء أو البرتقالية التي تُرى عادة في الصخور الرسوبية. إن لون الصخور في الحديقة العامة برايس كانيون في يوتا تعطي مثالًا جميلًا للتلون بأكسيد الحديد (الشكل 26.20).

(أ) رسوبيات جيدة الفرز

(ب) رسوبيات رديئة الفرز

الشّكل 25.20
الرواسب التي تتكون من حبات متشابهة في الحجم والشّكل تسمى *جيدة الفرز*. في حين تحوي الرّسوبيّات رديئة الفرز حبات مختلفة الأشكال والأحجام. وعمومًا فإنّ الرّسوبيّات رديئة الفرز نقلت مسافة قصيرة قبل الترسيب، أما الرّسوبيّات الجيدة الفرز والاستدارة، فقد نُقلت مسافة طويلة قبل الترسيب.

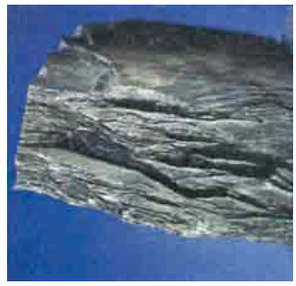
لمعلوماتك

يعطينا حجم الرّسوبيّات وشكلها دلائل على نقل الرّسوبيّات. رسوبيات الجليد الرديئة الفرز زاويّة لأنها حجزت داخل الجليد في أثناء النقل. أمّا رسوبيات الرياح فجيدة الفرز وصغيرة. الرياح تنقل حبات صغيرة.

الشّكل 26.20
إنّ سبب وجود الألوان الحمراء والبرتقالية في الصّخور الرّسوبيّة في يوتا هو وجود أكسيد الحديد.

لمعلوماتك

الكائنات الحية وبخاصة المجهرية منها متوافرة في الأنهار والبحيرات والمحيطات. وهي تأخذ الماء، وتستخدم المعادن الذائبة فيه لبناء صدفها وهياكلها وجدران خلاياها. وقد تكوّن مقدارًا كبيرًا من الكالسيت بهذه الطريقة. وعند موت هذه الكائنات فإنها تترسب على القاع مكوّنة طبقات رسوبيات كيميائية.



(أ)

(ب)

(ج)

الشّكل 27.20

أنواع الصّخور الرّسوبيّة الفتاتية:
(أ) الغَضار أكثر الصّخور الرّسوبيّة شيوعًا، ويتكون من حبات ناعمة بحجم الطين. (ب) الحجر الرملي مكوّن من حبات بحجم الرمل. (جـ) الكونغلوميرات مكوّن من حبات رديئة الفرز دائرية بحجم الحصباء، مع وجود الرمل والطين.

الجدول 3.20 تصنيف الصّخور الرّسوبيّة الفتاتية

رسوبيات	حجم الحبات	الصخر
خشن		
حصاة: جلمود	256 ملم	كونغلوميرات
حصاة: حصاة كبيرة	64 ملم	
حصاة		
	2 ملم	
رمل	0.062 ملم	حجر رملي
طين: غرين	0.0039 ملم	حجر غريني
طين: طين		حجر طيني
ناعم		

■ **نقطة فحص**

أي أنواع التّجوية تكوّن معظم الرّسوبيّات: الكيميائية أم الميكانيكة؟

هل كانت هذه إجابتك؟

انظر إلى عوامل التّجوية لترشدك في تفكيرك. الماء هو العامل الأساسي في التّجوية. يتفاعل الماء السائل وبخار الماء مع الصخر لتكسيره. أما التجمد والانصهار اللذان يؤديان إلى تكسير الصخر فهما أقلّ شيوعًا. وبهذه الطريقة، فإنّ الماء يقوم بعمل مزدوج. ولأنّ الماء السائل وبخار الماء موجودان في كلّ مكان تقريبًا، فإنّ التّجوية الكيميائية هي المكوّن الرئيس للرسوبيات.

تصنيف الصّخور الرّسوبيّة

تقسم الصّخور الرّسوبيّة إلى مجموعتين استنادًا إلى مكوناتها هما: *فتاتية وكيميائية*. تتكون الصّخور الرّسوبيّة الفتاتية من قطع صغيرة من صخر مجوّى، قطع صدف و/أو مادة عضوية صلبة. تصنف الصّخور الرّسوبيّة الفتاتية بحسب حجم الحبات (الجدول 3.20). يعدّ التصنيف منطقيًّا؛ لأنه يساعدنا على معرفة بيئة الترسيب التي تكوّن فيها الصخر. فمثلًا، تترسب الحبات ذات الأحجام الكبيرة في بيئة قوية كالأنهار الهادرة، وتترسب الحبات الصغيرة في الماء في بيئات هادئة، كوسط بحيرة أو وسط محيط. فإذا انتقلنا من الحبات الصغيرة إلى الكبيرة، فإنّ الأنواع الرّسوبيّة الفتاتية الشائعة هي *الغَضار* (يتضمن في هذا الكتاب الحجر الطيني)، *والحجر الرملي*، *والكونغلوميرات* (الشكل 27.20).

يتكون *الغضار* (أو *الحجر الطيني*) من تراكم وتراصّ حبات صغيرة من الغرين والطين، وتكون طبقاته رقيقة، ولها قابلية الانفصام إلى رقائق موازية للطبقات المترسبة. إنّ الحبات الصغيرة جدًّا تدلّ على ترسّب في بيئة هادئة متميزة بماء راكد كأحواض المحيطات العميقة، والسهول الفيضية، والدلتا، والبحيرات، والبحيرات الشّاطئية. يعطي لون الغضار دلائل على بيئة التكون؛ فالغضار الرمادي إلى الأسود يدلّ على وجود مادة عضوية تحفظ فقط في بيئة قليلة أو عديمة الأكسجين مثل المستنقعات. إذا وجدت كمية كبيرة من الأكسجين في بيئة الترسيب، فإنّ البكتيريا تعمل على تحليل المادة العضوية بسرعة كبيرة. يعدّ الغضار الأسود ذا أهمية تجارية لأنه الصخر الرئيس المولد للنفط الخام. يحوي الغضار الأحمر والبني أكسيد الحديد الثلاثي (أحمر) أو هيدروكسيد الحديد (بني).

وتشير هذه الأكاسيد إلى بيئة ترسيب غنية بالأكسجين، حيث إنّ الماء العميق مخلوط جيدًا مع ماء سطحي. والغضار الأخضر لا يحوي مادة عضوية، بل أكسيد أو هيدروكسيد الحديد.

تصنّف *الصّخور الرّمليّة* إلى ثلاثة أنواع استنادًا إلى مكوناتها المعدنية. فإذا كان الكوارتز هو المعدن الرئيس، فعندها يسمى الصّخر *حجرًا رمليًّا كوارتزيًّا*. يتكون الحجر الرملي الكوارتزي من حبات كوارتز دائرية جيدة الفرز. ويسمى الحجر الرملي الذي يحوي كميات من الفلسبار أركوزًا. تكون الحبات في الأركوز ذات حواف ليست جيدة الفرز، كما في الحجر الرملي الكوارتزي. أما الحجر الرملي المكون من خليط من المعادن وقطع صخرية ذات حواف فيسمى *غريواكيا*. يتكون الحجر الرملي في العديد من بيئات الترسيب التي تتضمن الكثبان الرملية، والشواطىء، والحواجز الرملية البحرية، وقنوات الأنهار، والوديان، والأودية تحت البحرية- أي في الأماكن جميعها التي يقوم الماء المتوسط القوة بترسيب حبات متوسطة الحجم.

تتكون *الكونغلوميرات* من قطع معادن وصخور بحجم الحصباء وأصغر. أما القطع الصخرية الكبيرة، فقد نقلت بتيار مائيّ كاف في قوته لحملها، ما يعني بيئة ترسيب قوية مثل الأنهار السريعة. ولأنّ هذه التيارات القوية تبري القطع الصخرية، فإن كانت استدارتها جيدة كان ذلك دلالة على المسافة التي نُقلت خلالها. توجد الكونغلوميرات عادة في قنوات الأنهار، وعلى الشواطىء السريعة التّعرية.

الشّكل 28.20
تكوّنت هذه "الفكوك" من الترافرتين في باموكال في تركيا بترسيب كربونات الكالسيوم $CaCO_3$ من مياه ينابيع معدنية حارة.

الصّخور الرّسوبيّة الكيميائية

تذكّر أنّ الرّسوبيّات الكيميائية ومن ثم الصّخور الكيميائية تتكون عن طريق ترسب المعادن من المحاليل المائيّة. تكونت بعض صخور الكربونات مثل الترافرتين من ترسيب غير عضوي لكربونات الكالسيوم (الشكل 28.20). أما المتبخرات مثل الهاليت، فتكوّنت أيضًا عن طريق الترسيب الكيميائي الناتج عن تبخر ماء مالح. وعمومًا فإنّ الصّخور الرّسوبيّة الكيميائية تتكوّن عندما لا توجد رسوبيات فتاتية.

يحدث الترسيب بشكل غير مباشر عندما تقوم الكائنات المائيّة بأخذ المكونات الذائبة واستخدامها في بناء الصدف أو أجزاء الجسم الصلبة، أو إكمال عمليات حياتية يتم فيها تكوين أجزاء صلبة ثم إطلاقها نحو الماء. تسمى الرّسوبيّات الكيميائية التي رسبتها الكائنات رسوبيات بيوكيميائية. ويتكون الحجر الجيري من معدن الكالسيت ($CaCO_3$) وهو أكثر صخور الكربونات شيوعًا. تتكون 90% من صخور الحجر الجيري نتيجة الأنشطة الحيوية. كما أنّ العديد من الكائنات البحرية تصنع صدفها من الكالسيت. وعند موت هذه الكائنات، يتراكم صدفها على قاع البحر، ويبدأ الصدف في الذوبان مكونًا رزغات كلسية غير متبلورة. تتبلور الرزغات في النهاية إلى كالسيت، ومن ثَمَّ يتكون الحجر الجيري. وبسبب التّراص وسهولة ذوبان كربونات الكالسيوم، فإنّ البناء الأساسيّ لصدف البحر يتدمر. أحيانًا، يحافظ الصدف وقطعه على شكله ويرى على شكل حجر جيري أحفوري متحجر، أي كوكينا (الشكل 29.20).

الشّكل 29.20
الكوكينا مثال على حجر جيري بيوكيميائي. يتكون الكوكينا من صدف وقطع صدف. وهو حجر جيري أحفوري – مليء بالأحافير!

يفضل المُناخ الدافئ ترسيب الكربونات؛ لأنّ الكربونات أكثر ذوبانية في الماء البارد منها في الماء الدافىء. تحتاج رسوبيات المتبخرات إلى مُناخ جاف يسبب تبخر البحيرات وماء البحر. ومع جفاف الماء، تترسب معادن المتبخرات وتبقى هناك. يدل وجود صخور المتبخرات والكربونات القديمة على القارات على أنّ بحارًا ضحلة غطت اليابسة على فترات في الماضي.

(أ)

(ب)

(ج)

(د)

الشّكل 30.20

بعض أنواع التحفّر.

(أ) يحدث *التمعدن* عندما تمتلئ تجاويف في بقايا كائنات بماء يحوي معادن ذائبة. والخشب المتحجر يتكون بهذه الطريقة. (ب) *طبعة* أو *قالب* مكون من كائن أو جزء منه تم دفنه قبل تحلله. ومع أنّ الكائن يتحلل في النهاية، إلا أنه يحفظ شكله بعد دفنه في الرّسوبيّات قبل تحلله. فيحفظ كقالب (جـ) يحدث *الاستبدال* عندما تستبدل بقايا كائن بمعدن. لقد قام البيريت باستبدال المادة الأصلية للكائن في هذه العينة. (د) يحدث *التفحم* عندما يتم حفظ الكائن على شكل طبقة رقيقة من الكربون.

■ **نقطة فحص**

1 . ما الذي يجعل الفحم مميزا بين الصّخور؟
2 . هل الفحم صخر رسوبيّ كيميائيّ أم فتاتيّ؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1 . لأنه يتكون من مواد عضوية وليس معادن.
2 . الفحم صخر رسوبيّ كيميائيّ، وبدقة أكثر بيوكيميائيّ.

الأحافير: دلائل على الحياة في الماضي

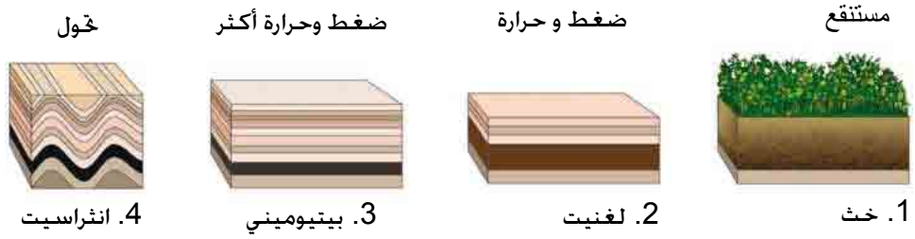
لأنّ الصّخور الرّسوبيّة (فتاتية وكيميائية) تتكوّن على سطح الأرض، فإنها تحوي عادة بقايا أشكال حياة – أحافير. لا تخبر الأحافير عن الحياة على الأرض فقط، ولكنها تعطي دلائل على الماضي الجيولوجي لها. وكما سنرى في الفصل 21، فإنّ الأحافير قد تعطي إجابات عن مكان ترسبت الرّسوبيّات وزمنها. كما أنها تساعد على مطابقة الصّخور في أماكن مختلفة لها العمر الجيولوجي نفسه. تتكون بعض الأحافير من كائنات كاملة، ولكن معظمها عبارة عن أجزاء من الكائن. وهناك أحافير أخرى عبارة عن طبعات عُمِلت في الصخر قبل أن يتصلب. تترك النباتات طبعات على شكل غشاء رقيق من الكربون. وتتحفر الكائنات بعدة طرق (الشكل 30.20)

■ 9.20 الصّخور المتحوّلة

ماذا يحدث لكتلة صخرية جُلِب إلى مكان ذي حرارة وضغط أعلى من البيئة التي تكونت منها؟ إنّ التّغيّر في الظروف الفيزيائية والكيميائية التي يتعرض لها الصخر تؤدي إلى تغييره. وهناك صخر جديد يتكون من صخر قديم. إنّ الصخر الجديد مستقر تحت الظروف الجديدة على الرغم من أنّ الصّخر الموجود لم يكن كذلك.

تسمّى التغيراتُ التي تحدث في الصخر بسبب تغير الظروف الفيزيائية والكيميائية **تحوّلا** . ويمكن أن تتعرض الصّخور جميعها للتحول، سواء أكانت نارية أم متحولة أم رسوبية. ويعدّ تحول طين الفخار مثالا يوميًّا على هذا. طين الفخار طريّ عند درجة الحرارة العادية، ولكنه يصبح خزفًا قويًّا عند تسخينه. وبالمثل، فإنّ الحجر الجيري إذا تعرض لضغط وحرارة كافيين يصبح رخامًا. كما أنّ الغضار يتحول إلى أردواز. قد تتعرض الصّخور لشد أو ضغط كبيرين. ومن المهم معرفة أنه في أثناء التحول لا تنصهر المعادن، فإذا انصهر المعدن ينتهي التحول، ويبدأ النشاط الناريّ. وفي التحول، يحدث التغير إما *بإعادة تبلور* المعادن الموجودة، أو *بتشوه ميكانيكي* للصخر.

تحدث عملية **إعادة التّبلور (*Recrystalization*)** عندما تتغير المعادن في الصخر؛ لأنّ المعدن تعرض لحرارة وضغط أعلى مما تعرض له عند تشكله. تهاجر مكونات للمعادن المتحوّلة وتعاود الاتحاد لتكوين معادن جديدة. وقد يحدث التحول مع تبادل السوائل أو دونها. مثلًا، افترض وجود صخر رسوبي يحوي سوائل كالماء أو ثاني أكسيد الكربون. قد تعمل السوائل الموجودة في مسام الصخر مُحفزاتٍ لتبدأ تفاعلات التحول أو تسرّعها . إذا كانت الحرارة والضغط مرتفعين بشكل كافٍ فإنّ الصخر يفقد المسامات بسبب طرد السوائل خارجه. وعندها يمكن للسائل المتحرر أن يتفاعل كيميائيًّا مع الصّخور المجاورة ليساعد على تشكيل المكونات الجديدة للمعادن المتشكلة. كما أنّ هذه السوائل يمكن أن تساعد على بدء تكوين ماجما بعيدًا عن موقع التحول لأنها تهاجر نحو الأعلى، وتساعد على عملية الانصهار (انظر الفصل 22). كما يمكن لتفاعلات التحول أن تحدث دون تدخل السوائل، عندما يكون التحول على درجات حرارة منخفضة.



الشّكل 31.20

تشكل الفحم. (1) يتشكل الخثّ من بقايا نباتات في مستنقع آسن. (2) يتم دفن الخثّ في الرّسوبيّات ويتعرض لدرجات عالية من الضغط والحرارة فيتحول إلى لغنيت وهو فحم بنّيّ طريّ. (3) ومع تقادم الزمن، ودفن وحرارة وضغط، يتحوّل إلى فحم طريّ أسود ذي طاقة عالية يستخدم لتوليد الطاقة. (4) يعمل التحول على تحويل الفحم البيتوميني إلى انثراسيت، وهو فحم أسود صلب ذو طاقة عالية.

يحدث التّشوّه الميكانيكي (*Mechanical deformation*) عندما يتعرض الصخر لإجهاد فيزيائيّ قد يصاحبه ارتفاع في الحرارة أو لا يصاحبه. فمثلا، الصّخور السطحية التي تدفن على أعماق كبيرة تتعرض لضغط مرتفع. قد يؤدي هذا الإجهاد إلى انسياب الصخر كالبلاستيك، بحيث ينثني وتتكون طيات. أو أنّ الضغط المتزايد قد يشوّه الصّخر ويجعله منبسطًا، أو يكسره ويطحنه إلى فتات. وتحدث هذه العملية في أعماق قشرة الأرض.

■ **نقطة فحص**

هل تعدّ عملية إعادة التّبلور نتيجة ارتفاع الضغط والحرارة معاكسة للانصهار الجزئي؟

هل كانت هذه إجابتك؟

لا؛ لأنّ عملية التّبلور من الماجما، وليست إعادة التّبلور، هي المعاكسة للانصهار الجزئيّ. تحدث إعادة التّبلور في الصخر بسبب تعرضه لضغط و/أو حرارة عاليين دون انصهار. وقد لا يتعرض الصخر لأيّ تغير كيميائي في أثناء إعادة التّبلور.

يتم إعطاء الطاقة للحيوانات والنباتات من الشمس قبل تحولها إلى أحافير. لذا، تعدّ الطاقة الشمسيّة مصدرَ الطاقة الناتجة في الوقود الأحفوري.

اربط مع علم الحياة

■ **الوقود الأحفوري**

عند موت النباتات والحيوانات القديمة، ثم تحلل معظم المادة العضوية المكونة لأجسادها عن طريق البكتيريا وتحويلها إلى مغذيات، تكون قد استهلكت. أما المادة العضوية التي أفلتت من تحلل البكتيريا، وحفظت على شكل مادة عضوية مبعثرة، أو تحولت إلى رسوبيات بيوكيميائية، فهي التي تتحول إلى فحم، أو نفط، أو غاز.

الفحم والنفط والغاز كلّها أحافير على أساس أنها بقايا كائنات. ومع ذلك، فإنّ هذه البقايا تغيرت مع الزمن بحيث لا يمكن تمييز شكل الكائنات التي تراكمت ولا تمييز تركيبها.

تشكّلت معظم ترسبات الفحم قبل 300 مليون سنة عندما غطت مستنقعات معظم سطح الأرض. ومع موت النباتات والأشجار، ترسبت بقاياها في قيعان المستنقعات. هذه البيئات الفقيرة بالأكسجين منعت التحلل وتراكمت بقايا النباتات على شكل طبقة بعد طبقة لتكون مادة عضوية كثيفة تسمى *الخثّ*. ومع الزمن، قامت رسوبيات من الرمل والطين بدفن هذا الخثّ. ومع مزيد من الدفن، فإنّ الزيادة في الضغط والحرارة جعلت الخثّ يتصخّر ليكوّن لغنيتًا وفحمًا بيتوميتًا. (الشكل 31.20). ومع أنّ الفحم يتكوّن من مادة عضوية وليس معادن، إلا أنه يعدّ صخرًا رسوبيًّا كيميائيًّا. وعندما يتعرض الصخر لضغط وحرارة أعلى فإنّ الفحم يصبح صخرًا متحولًا يسمى *الإنثراسيت*، وهو أعلى درجات الفحم.

مصدر النفط والغاز هو المادة العضوية المجهرية المتحفّرة الموجودة في الرّسوبيّات البحرية المدفونة. وعندما تتعرض هذه الرّسوبيّات المدفونة المحتوية على مادة عضوية لحرارة منخفضة فترة زمنية كافية، تحدث عمليات تغير كيميائية تؤدي إلى إنتاج النفط. وتحت الضغط الناتج عن الرّسوبيّات العليا، يتمّ عصر قطرات النفط من صخر المصدر إلى الصخر المسامي الذي يعلوه. معظم الصخر المسامي من الصخر الرملي الذي يصبح خزان نفط. وكما في تحول الصّخور، فإنه إذا ارتفعت درجة الحرارة على نحوٍ كافٍ يتكون الغاز الطبيعي وليس النفط.

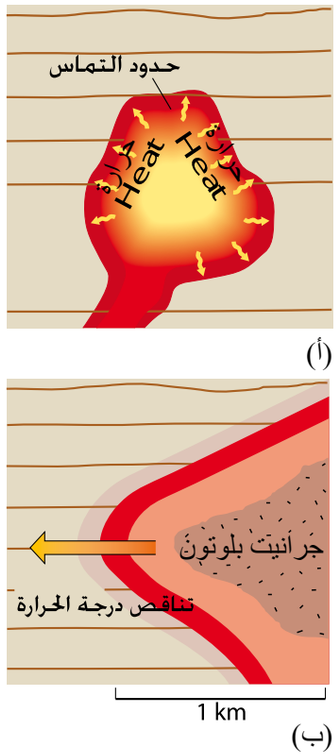
نوعا التّحوّل؛ تماسّي وإقليمي.

النوعان الشائعان من التّحوّل هما: *التّحوّل التّماسّي والإقليميّ*. وكلّ نوع منهما يختلف عن الآخر في التّشوّه الميكانيكيّ وإعادة التّبلور.

يحدث *التحول التماسي* عندما تندفع ماجما خلال جسم صخري (الشكل 32.20). تؤدي الحرارة المرتفعة للماجما إلى تكوين نطاق من التحول يحيط بالاندفاع. ويكون التحول أكبر ما يمكن على سطح التماس بين الاندفاع والصخر الأصلي المحيط به. وقد يتراوح عرض النطاق المتحول بين عدة سنتمترات إلى مئات الأمتار. فإذا كان الاندفاع الناري صغيرًا كالقاطع مثلًا، فإنّ النطاق المتحول يكون ضيقًا. وقد يشبه الصخر "المخبوز". وله نسيج ومظهر كالطوب العادي. ولكن مع اندفاع ناري كبير مثل الباثوليث، فقد يكون سُمك النطاق المتحول 100م أو أكثر. إنّ أحد أكثر التغيرات شيوعًا في أثناء التحول هو زيادة حجم البلورات بسبب إعادة التّبلور. يكون حجم البلورات أكبر على سطح التماس، ويقلّ كلما ابتعدنا عنه. كما أنّ المحتوى المائيّ في الصخر يتغير كذلك بزيادة البعد عن سطح التماس. فعلى التماس حيث الحرارة مرتفعة، يكون المحتوى المائيّ قليلًا؛ لأنّ الماء تمّ غليه وطرده. لذا، فإننا نجد معادن جافة ذات حرارة مرتفعة مثل الجارنت والبيروكسين على منطقة التماس. وبعيدًا عن التماس، نجد معادن غنية بالماء ذات حرارة منخفضة مثل المسكوفيت والكلوريت (معدن سليكات صفائحيّ آخر). يتميز التحول التماسي عادة بالحرارة المرتفعة والمحتوى المائيّ الكبير؛ تحدث العديد من التفاعلات الكيميائية ولا وجود لتشوه ميكانيكي.

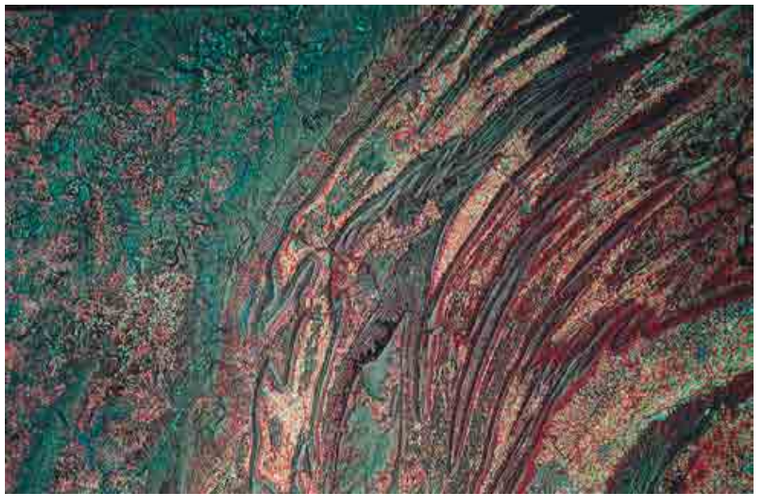
أمّا *التحول الإقليمي* فهو تحول الصخر عن طريق الحرارة والضغط على طول منطقة واسعة وليس بالقرب من تماس بين صخرين. ففي أثناء عملية بناء الجبال، فإنّ قشرة الأرض تتعرض للضغط مكونة كتلة ذات صخور عالية التّشوّه. ويمكن رؤية هذا التّشوّه في الصّخور المطوية والمكسرة في العديد من سلاسل الجبال (الشكل 33.20). توجد الصّخور المتحوّلة إقليميًّا في السلاسل الجبلية الرئيسة جميعها في العالم. وفي التحول الإقليمي، تنضم عملية إعادة التّبلور إلى التّشوّه الميكانيكيّ. ويمكن تسخين مقاطع صخرية كبيرة إذا دفنت لأعماق كافية في القشرة؛ لأنّ هذه القشرة أسخن في الأعماق.

يكون تأثير التحول التماسي أعلى ما يمكن في لبّ الجبال المشوهة، حيث ينشأ في الصّخور نسيج متورق مميز يتكون بسبب الضغوط المرتفعة الناتجة عن الصّفائح المتقاربة (الفصل 22). يتميز التحول الإقليمي أيضا بوجود نُطُق متتالية من المعادن. ومثال ذلك، أن تحوي منطقة مجموعة من المعادن، في حين تحوي صخور المنطقة المجاورة مجموعة مختلفة أخرى من المعادن. وبسبب المساحات الواسعة التي يغطيها التحول الإقليمي، تكون الأحزمة عريضة ومنتشرة. تعد مناطق التحول الإقليمي أراضي الصيد للباحثين عن المعادن النفيسة؛ لأنّ الضغط والحرارة المصاحبين للتحول يُنتجان معادن جميلة.



الشّكل 32.20

(أ) التحول التماسي هو نتيجة لاندفاع ماجما مصهورة داخل جسم صخري. (ب) يتكون حزام من التحول حول الصخر المندفع المتصلب. يكون التحول كبيرًا على منطقة التماس، ويقلّ بالابتعاد عنها.



الشّكل 33.20

تبين هذه الصورة الجوّيّة طيًّا إقليميًّا لصخور متحولة في جبال الأبلاش في وسط بنسلفانيا.

تصنيف الصّخور المتحوّلة

تعرف الصّخور المتحوّلة بمظهرها ومحتواها المعدني. ولتصنيف الصّخور المتحوّلة وتعرف لها، فإنها تصنف إلى مجموعتين: *متورّقة وغير متورّقة*.

الصّخور المتحوّلة المتورّقة. عندما يتعرض صخر إلى ضغط متزايد، فإنه يعيد ترتيب بعض معادنه في مستويات متوازية عند إعادة التّبلور. يكون امتداد السطوح المتوازية معامدًا على الاتجاه الرئيس لقوى التضاغط. وهذا يؤدي إلى مظهر متطبق يسمى *تورّقا*. والتّورّق مظهر من مظاهر الصّخور المتحوّلة تحولا إقليميًّا، وهو مختلف جدًّا عن التطبق الذي يُرى في الصّخور الرّسوبيّة؛ إذ لا ينشأ النسيج المتورق في الصّخور المتحوّلة عن الترسب. وبالأحرى، فإنّ معادن ذات بناء صفائحيّ، كالمايكا، تنمو وتوجه نفسها مع صفائحها في اتجاه متعامد مع الضغط الأعظم (الشكل 34.20). يسمى الصخر الجديد الذي يحتوي على رقائق متوازية من المايكا متورقًا. الصّخور المتحوّلة المتورقة الشائعة – الأردواز، الشيست، والنايس . حيث إنّ مصدرها صخور رسوبية تحتوي على تركيب كيميائي مناسب لتكوين المايكا (الشكل 35.20).

الأردواز صخر متحول متورق ذو أقلّ درجة تحول، وهذا يعني أنه تكون تحت ضغط وحرارة منخفضين نسبيًّا. الأردواز، وهو غضار متحول، صخر متورق مكون من حبيبات صغيرة ورقائق مايكا صغيرة أيضًا. إنّ الخاصية الملحوظة في الأردواز هي انفصامها الممتاز الذي يمكّنها من الانفصال إلى ألواح رقيقة. تصنع أفضل طاولات المسابح وألواح الطباشير من هذا الصخر الذي تم تعدينه في المناطق المتحوّلة، حيث الانفصام جيد. كما يستخدم الأردواز أيضًا في تبليط أرضية المباني وسقوفها.

أما *الشيست* فهو أحد أسهل الصّخور المتحوّلة تمييزًا؛ لأنّ مظهره حرشفيًّا مع مايكا كبيرة تعكس الضوء مثل النوافذ المغشاة. يتكون الشيست عند درجات حرارة وضغوط مرتفعة أكبر من الأردواز، مما يجعل حبات المعدن تنمو بشكل يكفي لتمييزها بالعين المجردة. يحتوي الشيست على 50% معادن صفائحية: مسكوفيت وبيوتيت غالبًا. تعطي رقائق المايكا الكبيرة سطحًا عالي الانعكاسية. وتسمى صخور الشيست بحسب المعادن الرئيسة في الصخر (بيوتوتيت شيست، ستاورولیت – جارنت شيست، وهكذا).

والنايس صخر متحول متورق يحوي طبقات متبادلة من معادن صفائحية قاتمة ومعادن حبيبية فاتحة. تعطي هذه الطبقات صخر النايس مظهره المخطط، الذي ينتج عن ظروف ضغط وحرارة أكبر من التي انتجت الشيست.

الشّكل 34.20

مع قيام القوى التضاغطية بعصر المعادن الصّفائحية فإنها ترتب الحبات بشكل متعامد مع اتجاه القوة الرئيسة. تشير الأسهم إلى اتجاه القوى التضاغطية.

(أ) (ب) (جـ)

الشّكل 35.20

صخور متحولة متورقة معروفة:(أ) أردواز (ب) شيست (جـ) نايس

إنّ أكثر المعادن الحبيبية شيوعًا في صخر النايس هما الكوارتز والفلسبار. وهما المعدنان الشائعان في صخر الجرانيت. وفي الواقع، فإنّ بعض أنواع النايس هو غرانيت متحول.

الصخور المتحولة غير متورقة. تتكون الصّخور المتحوّلة غير المتورقة بسبب زيادة الضغط والحرارة أو بسبب زيادة الحرارة فقط. وحتى تحت الضغط المرتفع، فإنّ التّورّق لا يحدث إنْ لم يكن التركيب الكيميائي مناسبا لتكوين المايكا (أو البلورات الخطّية الأخرى). وبالمثل، إذا كان التركيب الكيميائي مناسبًا، ولكن الضغط غير عالٍ بقدر كافٍ، كما هو الحال في التحول التماسي، فإنّ التورق لا يحدث أيضًا. وهناك صخران معروفان غير متورقين لا يمكن أن يصبحا متورقين هما الرخام والكوارتزيت.

الرّخام (الشكل 36.20 أ) حجر جيري متحول متبلور. والرخام النقي أبيض اللون، ومكوّن بنسبة 100% من الكالسيت الذي لا يُري استطالة أو تصفحًا. وبسبب لونه وطراوته (قساوته 3)، فإنه حجر بناء شائع. ويحتوي الحجر الجيري الذي تحول إلى رخام عادة على بعض الشوائب التي تنتج ألوانًا في الرخام. لذا، فإنّ الرّخام يختلف في لونه من الوردي، إلى الرمادي، إلى الأخضر أو حتى الأسود.

أمّا *الكوارتزيت* (شكل 36.20 ب) فهو حجر رملي كوارتزي متحول؛ لذا فهو صلب جدًّا (قساوته 7). لا يبدي معدن الكوارتز أيضًا استطالة أو تصفحا. ويمكن لعملية إعادة تبلور الكوارتزيت أن تكون كاملة بحيث إنه عند ضرب الصخر، فإنه ينكسر من داخل حبات الكوارتز وليس من بينها. ومع أنّ الكوارتزيت النقي أبيض اللون، ولكنه عادة ما يحتوي على شوائب تسبب ألوانًا مختلفة كالوردي، والأخضر أو الرمادي الفاتح.

(أ)

(ب)

الشكل 36.20
صخور متحولة غير متورقة
أ) رخام
ب) كوارتزيت

نقطة فحص

1 . متى يتجاوز الصّخر التّحوّل تحت ظروف قياسيّة (عالية جدًّا) من الحرارة؟
2 . لماذا تحدث عملية إعادة التّبلور في الصخر المتحول؟

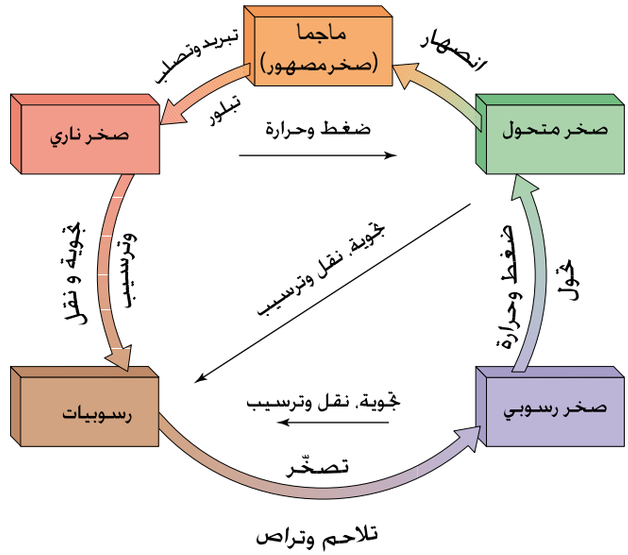
هل كانت هذه إجابتك؟

1 . عندما ينصهر الصخر يصبح ماجما. وعندما تبرد الماجما لتكوّن صخرًا، فإنّ الصخر الجديد يكون صخرًا ناريًّا.
2 . تحدث عملية إعادة التّبلور لأنّ الصخر تعرض لدرجات حرارة أو ضغوط مرتفعة.

10.20 دورة الصّخر

الأرض كوكب ديناميكيّ دائم التغير. تتحد العناصر المكونة من ذرات وجزيئات لتكون المعادن التي تكونت بعملية التّبلور من الماجما أو المحاليل المائيّة. تُعرف المعادن المتكونة عن طريق العناصر الموجودة فيها والظروف التي كونتها. وبدورها، تحدد هذه العوامل ترتيب الذرات في كلّ معدن وقوة الروابط التي تمسك هذه الذرات معًا. إنّ أكثر من 90% من معادن الأرض هي من مجموعة السليكات التي تتكون من سليكون وأكسجين إضافة إلى عناصر أخرى كالألومنيوم، والحديد، والكالسيوم، والصوديوم، والبوتاسيوم، والمغانسيوم. تتجمع المعادن لتكون صخورًا كالصّخور النّارية والرّسوبيّة والمتحوّلة التي نراها حولنا.

تكوّنت معظم المعادن (ومن ثم الصّخور) من التّبلور من الماجما. وتتكوّن الماجما عند صهر الصخر. ويعتمد نوع الماجما المتكوّنة على نوع الصّخور والمعادن التي انصهرت. ويمكن لنوع واحد من الماجما أن يتحول



الشّكل 37.20

دورة الصخر: إذا عرّضت الصّخر الناريّ لضغط وحرارة في جوف الأرض، يصبح صخرًا متحولا، قد يتحلل الصّخر الرسوبيّ أو المتحول على سطح الأرض ليكوّن رسوبيات تتحول إلى صخر رسوبي. وبصرف النظر عن المصدر، فإنّ الصخر المنصهر يندفع من أعماق الأرض، ويبرد ويتصلب ليكون قشرة تعالج مع الأزمنة عن طريق الجرف والتّعرية لتصبح ماجما في باطن الأرض

إلى أنواع مختلفة منها (بازلتية، إنديزينية، وجرانيتية) في أثناء الهجرة والتّبلور، ثم إلى أنواع مختلفة من الصّخور النّاريّة. ومع أنّ معظم قشرة الأرض مكونة من صخور نارية ومتحولة، إلا أنّ الصخر الذي نراه على السطح هو صخر رسوبي بشكل رئيس. يتكون الصّخر الرسوبي من بقايا صخر تم تجويته وتعريته. ويوفر هذا النوع من الصخر سجلًّا للتغيرات البيئية والحيوية على سطح الأرض. وعند دفن صخر رسوبي في أعماق الأرض أو تعرضه لبناء الجبال، فإنّ الضغط والحرارة العاليين يحولانه إلى صخر متحول. وتحت ظروف مناسبة، ينصهر الصخر المتحول، وينقلب إلى ماجما تصبح في النهاية صخرًا ناريّا لتكمل **دورة الصّخور**. (الشكل 37.20)

جرى التركيز في هذا الفصل على تكوّن المعادن والصّخور. وفي الفصل التالي، سنحول اهتمامنا إلى كيفية استخدام المعادن والصّخور لمعرفة تاريخ الأرض. وقد تعرضت أرضنا التي تشكلت قبل 4.5 مليار سنة للعديد من التغيرات في شكلها وفي أشكال الحياة. وسوف نتعرف هذه التغيرات من السجل الصخري؛ فهيّا إلى قراءة السجل الصخري.

مراجعة المصطلحات

الصّفائح التّكتونيّة: Tectonic plates
أجزاء تنقسم إليها قشرة الأرض، وتتحرك استجابة لتدفق الحرارة وتيارات الحمل في باطن الأرض.

المعدن: Mineral مادة صلبة تكوّنت طبيعيًّا، متبلورة، غير عضوية، ذات ترتيب ذري منتظم وتركيب كيميائي محدد.

الشّكل البلوريّ: Crystal form
التعبير الخارجي للترتيب الداخلي المنتظم للذرات في البلورة.

متعدد الأشكال: Polymorphs معدنان أو أكثر لهما العناصر نفسها وبالنسب نفسها، ولكن لهما بنية بلورية مختلفة.

مقياس موهو للقساوة: Mohs scale of hardness
ترتيب لقساوة المعادن التي هي مقاومة المعدن للخدش.

الانفصام: Cleavage قابلية المعدن للانكسار على طول سطوح ضعف.

المكسر: Fracture كسر لا يحدث على سطوح ضعف.

الكثافة: Density النسبة بين كتلة المادة وحجمها.
السّليكات: Silicate معدن يحوي السليكون والأكسجين وعدة عناصر أُخرى في تركيبه الكيميائي. مجموعة السليكات هي أكبر مجموعة من المعادن المكونة للصخور وأكثرها شيوعًا.
لاسليكات: Nonsilicate المعدن الذي لا يحوي سليكا (أكسجين + سليكون).
تبلور: Crystallization نمو لمادة صلبة من سائل أو غاز، حيث تتجمع ذراته بنسب كيميائية محددة، وبترتيب بلوري منتظم.
ماجما: Magma صخر مصهور في باطن الأرض.
الرّسوبيّات الكيميائية: Chemical sediments
رسوبيات تتكون من ترسب معادن من الماء على سطح الأرض.
ذائبية: Solubility قياس قابلية ذوبان المعدن. فالمعادن القليلة الذوبانية يصعب ذوبانها، أما العالية الذوبانية فسهلة الذوبان.
صخر: Rock تجمع معادن. تتكون بعض الصّخور من قطع صدف أحافير، أو مادة عضوية صلبة، أو أيّ تجمع منهما.
الصّخور النّاريّة: Igneous rocks
صخور تكونت عن طريق التبريد والتّبلور من مادة صخرية ساخنة مصهورة تسمى ماجما أو لابة.
صخر رسوبي: Sedimentary rocks
صخور تكونت من تراكم مواد مجوّاة (رسوبيات) تعرت بالمياه، أو الهواء أو الجليد.
صخور متحولة: Metamorphic rocks
صخور تكونت من صخور قديمة تغيرت عن طريق الضغط أو الحرارة العاليين أو كليهما.
انصهار جزئي: Partial melting
انصهار غير مكتمل للصخور، مما ينتج ماجما بتراكيب مختلفة.
صخور بركانيّة: Volcanic rocks
صخور نارية سطحية تشكلت من ثوران الصّخور المصهورة على سطح الأرض كالبازلت.

لابة: Lava ماجما مصهورة تتحرك نحو الأعلى في باطن الأرض وتطفو على السطح. يشير المصطلح لابة إلى الصخر المصهور والصّخور الصلبة التي تشكلت منها صخور جوفية.
صخور نارية: Plutonic rock
تشكلت من الماجما التي بردت تحت سطح الأرض كالجرانيت.
تجوية: Crystallization تفتت و/أو تحلل الصخر على سطح الأرض في موضعه.
تعرية: Erosion نحت أو حتّ الصّخور ونقلها بعيدًا. وهي العملية التي يتم فيها نقل الحبيبات بالماء أو الرياح أو الجليد.
ترسيب: Deposition مرحلة من مراحل تكون الصّخور الرّسوبيّة، والتي تبدأ فيها الحبيبات المنقولة بالتراكم.
توضّع: Sedimentation مرحلة من مراحل تكون الصخر الرسوبي حيث تتراكم الرّسوبيّات وتتصخر إلى صخر رسوبي خلال عملية التراص، وعادة التلاحم.
التّحوّل: Metamorphism التغير في الصخر الذي يحدث نتيجة تغير الظروف الفيزيائية والكيميائية.
إعادة تبلور: Recrystallization
عملية تحدث عند تعرض الصّخور لضغوط وحرارة مرتفعة. وتتغير فيها المعادن وعادة ما تكون مصحوبة بفقدان CO_2 أو H_2O.
تشوّه ميكانيكيّ: Mechanical deformation
تحوّل بسبب الإجهاد مثل زيادة الضغط.
دورة الصخر: Rock cycle
تتابع أحداث تتضمن تكون الصّخور، وتدميرها، وتحولها، وإعادة تشكلها بسبب تكون الماجما وتحركها، وتجوية الصّخور الموجودة، وتعريتها، ونقلها، وترسيبها وتحولها.

أسئلة مراجعة

1.20 الغلاف الأرضيّ مكون من صخور ومعادن

1 . كيف يسهم التمايز بالكثافة في تشكيل طبقات باطن الأرض؟
2 . ما مصادر الحرارة الثلاثة التي أسهمت في صهر الأرض الابتدائية، وفصلت طبقاتها بالكثافة؟
3 . ما العنصر الأكثر وفرة في الأرض جميعها؟
4 . ما العنصران الأكثر وفرة في قشرة الأرض بالترتيب؟

2.20 المعادن

5 . ما المعدن؟
6 . ماذا تشمل كلمة (*غير عضوي*) في تعريف المعدن؟

3.20 خصائص المعدن

7 . ما الخصائص الفيزيائية المستخدمة في تعريف المعادن؟
8 . تتميز المعادن بشكلها البلوريّ. ولكن معظم عينات المعادن لا تُظهر الشّكل البلوريّ، لماذا؟
9 . ما ظاهرة تعدد الأشكال؟

4.20 تصنيف المعادن المكونة للصخور

10 . ما الفرق بين المعادن السليكاتية واللاسليكاتية؟
11 . تقسم معادن السليكات إلى حديدوماغنسية ولاحديدوماغنسية. ما العاملان المساهمان في ذلك؟
12 . ما المعدنان الأكثر شيوعًا في القشرة بالترتيب؟

5.20 تكوّن المعادن والصّخور

13 . ما عملية التّبلور؟
14 . باختصار، صِفْ عمليتين تتكون منهما المعادن.
15 . مع تبلور المعادن من الماجما المتبردة، أي المعادن تتبلور أولًا: المعادن ذات السليكا القليلة أم الكثيرة؟
16 . عند تبخر الماء من جسم مائي، ما نوع الرّسوبيّات المتكونة؟

6.20 أنواع الصّخور

17 . ما الأنواع الرئيسة الثلاثة للصخور؟ وما أصلها؟

7.20 الصّخور النّاريّة

18 - ما الصّخور النّاريّة الشائعة؟ وأين تتكون عادة؟
19 - ما معنى الانصهار الجزئي؟
20 - ما نوع الماجما المتكونة من الانصهار الجزئي اعتمادًا على المحتوى السليكاتي في الصخر الأصلي؟
21 - ما الذي يسبب درجة انصهار الصخر؟
22 - هل تزداد الحرارة مع العمق في باطن الأرض أم تقلّ؟

8.20 الصّخور الرّسوبيّة

23 - كيف تكوّن التّجوية الرّسوبيّات؟ ما الفرق بين التّجوية والتّعرية؟
24 - ما الصخر الرسوبي الفتاتي؟
25 - ما الأنواع الثلاثة الشائعة من الصّخور الرّسوبيّة الفتاتية؟
26 - ما الصخر الكربوناتي الشائع؟
27 - كيف تتكون معظم صخور الكربونات؟

9.20 الصّخور المتحوّلة

28 - ما التحول؟ وما الذي يسببه؟
29 - ميّز بين الصّخور المتحوّلة المتورقة وغير المتورقة.
30- في التحول التماسي، توجد المعادن المحتوية على الماء، القليلة الحرارة بعيدًا عن نطاق التحول. أعطِ مثالين على هذه المعادن.

تمارين

مرة أخرى، لا ترهق نفسك في رؤية العدد الكبير من التمارين في هذا الفصل وغيره. إذا كان المقرر يغطي العديد من الفصول، فمدرّسك سيختار لك بعضها.

1. ● ماذا تسمى المعادن ذات المحتوى نفسه من العناصر، ولكن بترتيب مختلف؟
2. ■ ما الفرق بين المعادن المكونة للصخور والمعادن الموجودة في المواد الغذائية؟
3. ■ يستخدم السليكون في صناعة الرقائق في الحاسوب. هل يُعدن السليكون من الأرض مباشرة؟ برهن إجابتك.
4. ■ ما المعدنان المكونان لمعظم الرمل في العالم؟
5. ■ ما مجموعتا المعادن التي تزودنا بالخامات؟
6. ■ إذا احتوى صخر على معدن أ (30% سليكا) ومعدن ب (25% سليكا)، فأيهما ينصهر أولا مع ارتفاع الحرارة؟
7. ■ إذا احتوت ماجما على معدن أ (30% سليكا) ومعدن ب (25% سليكا)، فأيهما يتبلور أولًا إذا بردت الماجما؟
8. ♦ العوامل التي تحدد قوة الرابطة تحدد قساوة المعدن. ما هذه العوامل؟
9. ■ إذا احتوت ماجما على معدن أ (30% سليكا) و ب (25% سليكا)، فأيهما يتبلور أخيرا مع تبرد الماعما؟
10. ■ إذا احتوت ماجما على معدن أ (30% سليكا) و ب (25% سليكا)، فأيهما ينصهر أخيرًا مع زيادة الحرارة؟
11. ♦هل يؤدي التّبلور إلى إشباع الماجما بغير السليكا؟ برهن إجابتك.
12. ■ إذا كانت المعادن الغنية بالسليكا هي الأخيرة في التّبلور، فَلِمَ لا تكون الأخيرة في الانصهار؟
13. ♦ لماذا يكون معدن الهاليت آخر المعادن ترسبًا من مياه البحر المتبخرة؟
14. ● هل تتوقع وجود أحافير في الحجر الجيري؟ لماذا؟
15. ● كيف تكوّن الرّسوبيّات الكيميائية صخرًا؟ اذكر اسم صخرين رسوبيين كيميائيين.
16. ● لماذا لا يعدّ اللون مناسبًا دائمًا للتعرف إلى المعدن؟
17. ■ إذا كنت في العراء ووجدت معدنًا زجاجيًّا لامعًا، فما الفحص الذي تجربه لتعرف ما إذا كان هذا المعدن ماسًا؟
18. ● ما الذي يجعل الذهب طريًا للغاية (ينخدش بسهولة)، أما الكوارتز وا لماس فشديدا القساوة؟
19. ● تخيل أنّ لديك سائلًا ذا كثافة 3.5 جم/سم^3. فإذا علمت أنّ الأجسام ذات الكثافة الأعلى تغوص في السائل، فهل ستطفو قطعة من الكوارتز أم تترسب؟ وماذا عن قطعة كروم؟
20. ■ هل الانفصام هو الشّكل البلوريّ نفسه؟ لماذا؟
21. ♦ إذا لم يعدّ الزجاج البركاني أوبسيدين معدنًا. فلم يعدّ صخرًا؟
22. ■ اربط بين شكل حبات الرمل وفرزها بالطريقة التي يُرجح أنها قد نقلت بها.
23. ●في أيّ نوع من قشرة الأرض (قارية أو محيطية) نجد الصخرين البازلت والجرانيت عادة؟
24. ♦ ما العاملان اللذان يغيران درجة الانصهار سوى المحتوى السليكاتي؟
25. ■ أيّ الجملتين التاليتين صحيحة عن المعادن السليكاتية؟
(أ) تقل درجة الانصهار بزيادة نسبة السليكات. (ب) تزداد درجة الانصهار مع نقصان نسبة السليكا.
26. ● ما الصّخور التي تتكون منها جزر الهاواي؛ النّاريّة، أم الرّسوبيّة، أم المتحوّلة؟
27. ■ أين تتكون معظم الماجما؟
28. ■ ما أنواع التغير المميزة للتحول التماسي؟
29. ♦ هل يمكن وجود صخور متحولة على جزيرة ذات أصل بركاني؟ برهن إجابتك.
30. ■ أيّ المعادن ينصهر بسهولة؛ الغنية بالسليكا أم الفقيرة بها؟
31. ■ ما الذي يحدد درجة انصهار الصخر؟
32. ● ما مظاهر الصخر التي يدرسها الجيولوجي في الصّخور الرّسوبيّة الفتاتية؟

33. ♦ ما خصائص الصخر الرسوبي الفتاتي التي تسهل انسياب النفط بعد تكونه؟
34. ♦ أي الصّخور التالية يتجوّى أولًا في بيئة رطبة؟ ولماذا: جرانيت، حجر رملي، حجر جيري، هاليت؟
35. ■ ما الطريقتان اللتان تتحول فيها الرّسوبيّات إلى صخور رسوبية؟
36. ♦ لماذا تنتشر حبات الجرانيت في الكونغلوميرات أكثر من حبات الرخام؟
37. ♦ ما أنواع الصّخور التي تعدّ هدفًا لمستكشفي البترول؛ النّاريّة، أم الرّسوبيّة، أم المتحوّلة؟ ولماذا؟
38. ♦ اذكر نوعين من الصّخور الرّسوبيّة التي تعطي معلومات عن الأحداث الماضية على سطح الأرض؟
39. ● ما الأحفورة؟ كيف تستخدم في دراسة الجيولوجيا؟
40. ● ما نوع النّجوية الناشئة عن صخر تفتت إلى قطع صغيرة أو ذاب في حمض؟
41. ● ما نوع الصّخور الناتجة عن صخور أقدم؟ أيهما لا يتطلب حرارة وضغطا مرتفعين في أثناء تكونها؟
42. ■ ما خصائص الأردواز التي تجعله مناسبًا للتبليط؟
43. ● اذكر اسم معدني مايكا تسبب التورق في الصّخور المتحوّلة.
44. ■ كيف يختلف التورق عن التطبق الرسوبي؟
45. ■ لماذا توجد صخور مطوية ومكسرة في مناطق التحول الإقليمي؟
46. ● أين تكثر التّدفّقات البركانيّة على سطح الأرض؟
47. ● كلّ جملة تصف خاصية أو أكثر لصخر متحول. سمّ نوع الصخر المتحول الذي تم وصفه في كلّ جملة مما يلي:
أ) صخر متورق أحيانًا ينشأ عن الجرانيت.
ب) صخر صلب غير متورق مكون من معدن واحد تحت ضغط متوسط إلى مرتفع.
جـ) صخر متورق يُظهر انفصامًا ممتازًا يستخدم في الألواح.
د) صخر غير متورق مكوّن من معادن كربونات.
هـ) صخر متورق يحوي 50% معادن صفائحية، ويسمى بحسب المعادن الرئيسة فيه.
48. ■ ما الخاصية التي تساعد على تمييز الشيست والنايس عن الرخام والكوارتزيت؟
49. ♦ بما أنّ حرارة الأرض تزداد بازدياد العمق، فلم لا تنصهر الصّخور جميعها في باطن الأرض؟
50. ♦ هل تغلب الماجما على باطن الأرض؟
51. ● كيف يختلف النايس عن الجرانيت؟
52. ■ ما سبب تمييز الشيست بسهولة؟
53. ♦ إذا احتوى صخر على كوارتز وبايروكسين، فأيهما ينصهر أولًا إذا تم تسخين الصخر؟
54. ♦ إذا احتوت ماجما على كوارتز وأوليفين، فأيهما يتبلور أولًا عند تبريد الماجما؟
55. ● ما العمليتان اللتان يتغير بهما الصخر في أثناء التحول؟

مسألة

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

1. ■ للذهب كثافة 19.3 جم/سم^3، وعاء سعته 5 جالونات به ماء (كثافة الماء 1جم/سم^3) كتلته 18كجم. ما كتلة وعاء سعته 5 جالونات من الذهب؟

اختبار الاستعداد للقراءة

إذا تمكنت من استيعاب هذا الفصل جيدا، فعليك الإجابة عن 7 أسئلة من 10 على الأقلّ إجابة صحيحة. أما إذا أجبت عن أقلّ من ذلك ، فأنت بحاجة إلى مزيد من الدراسة قبل التقدم إلى الأمام.

اختر أفضل إجابة لكلّ سؤالٍ مما يلي:

1. السليكات أكبر مجموعة معادن؛ لأنّ الأكسجين والسليكون:
(أ) أقسى العناصر على سطح الأرض.
(ب) أكثر العناصر وفرة في القشرة.
(ج) يوجدان في معدن الكوارتز الشائع.
(د) مستقرة على سطح الأرض.
2. يؤدي تراص الرّسوبيّات إلى:
(أ) تكون الماجما.
(ب) التصحر.
(ج) تكوين الماء المسامي.
(د) التحول.
3. يتركز السليكون والأكسجين بالقرب من سطح الأرض، أما الحديد فموجود في لبّها؛ لأنّ:
(أ) مكونات الأرض انفصلت في البداية بحسب اختلاف الكثافة.
(ب) السليكون والأكسجين أقلّ كثافة من الحديد.
(ج) أ+ب.
(د) لا شيء مما ذكر.
4. المعادن التي تتبلور أولًا من الماجما المتبردة هي:
(أ) المعادن ذات درجة الانصهار الأكثر ارتفاعًا.
(ب) المعادن ذات درجة الانصهار العالية.
(ج) المعادن ذات الذوبانية الأعلى.
(د) المعادن ذات المحتوى الأعلى من السليكات.
5. العاملان اللذان يزدادان مع العمق في الأرض هما:
(أ) الضغط والمحتوى المائيّ.
(ب) الضغط والحرارة.
(ج) الحرارة والمحتوى المائيّ.
(د) محتوى السليكا والمحتوى المائيّ.

6- تشير درجة الاستدارة في الصّخور الرّسوبيّة إلى:
(أ) مدة النقل وطولها.
(ب) مكان تكوّن الحبات.
(ج) مكان ترسب الحبات.
(د) كيفية تراص الحبات وتلاحمها.
7- تتضمن خصائص التحول الإقليمي ما يلي:
(أ) طبقات صخرية مطوية ومكسورة.
(ب) صخورًا متورقة.
(ج) تتابعات أحزمة من المعادن.
(د) كلّ ما ذكر.
8- ترتب الأنواع الثلاثة من الماجما بحسب الزيادة في المحتوى السليكاتي كما يلي:
(أ) بازلت، أنديزيت، جرانيت.
(ب) جرانيت، أنديزيت، جرانيت.
(ج) بازلت، جرانيت، أنديزيت.
(د) أنديزيت، جرانيت، بازلت.

9- تنصهر الصّخور في باطن الأرض عندما:
(أ) تصعد نحو الأعلى إلى مناطق انخفاض الضغط.
(ب) يضاف الماء مما يقلل درجة انصهار الصخر.
(ج) أ+ب
(د) لا شيء مما ذكر.
10- تحوي الصّخور الرّسوبيّة عادة بقايا أشكال الحياة القديمة؛ الأحافير. وهذه الأحافير تساعدنا على فهم:
(أ) تاريخ الأرض الجيولوجي والبيولوجي.
(ب) تشكّلِ الأرض الأولي.
(ج) أحزمةِ المعادن المتتابعة.
(د) اختلافاتِ أشكال الحياة.

إجابات اختبار الاستعداد للقراءة

ب، 10 ج، 9 أ، 8 د، 7 د، 6 ج، 5 ب، 4 ب، 3 ج، 2 ب، 1

اكتشف المزيد

http://mincerals.usges.gov
الصفحة الرئيسية لمصادر المعارف، برعاية دائرة المسح الجيولوجي الامريكية والتي توفر احدث المعلومات الحيادية حول وجود، وجودة، وكمية، وتوفر مصادر المعادن. هذا الموقع على المواد المكتوبة، والتي تركز على البحث والاحصاءات.

http://webminceral.com
يوفر هذا الموقع الحائز على جائزة بيانات يكثفه حول عالم المعادلات. كما يشمل الموقع على لوحات تصنيف وقوائم مرتبة ابجدياً. قم بتصفح معرض صور المعادن الرائع والذي يشمل أصل المعادن ووصف المحتويات.

http://sln.fi.edu/fellows/fellol/oct9/create/index.html
جزء من موقع روك وندز برعاية مدرسة المجتمع المحلي في للوجووتي، وبين هذا الموقع تفاصيل تكون الصخور. قم بزيارة الصفحة الرئيسة لمعرفة المزيد عن حقائق الصخور إضافة إلى بعض مصادر التعليم المقترحة.

http://wrgis.wr.usgs.gov/docs/parks/rxmin/content.html
هذا الموقع مسعى تعاوني بين فريق عمليات المسح الجيولوجي الامريكي لسطح في القرب وخدمة الحديقة الوطنية، كما أنه يوفر معلومات مكثفة حول أنواع الصخور. كما يتضمن صورا وتوصيف، ولوحة تصنيف سهلة إضافة الى بعض المعلومات حول المعادن.

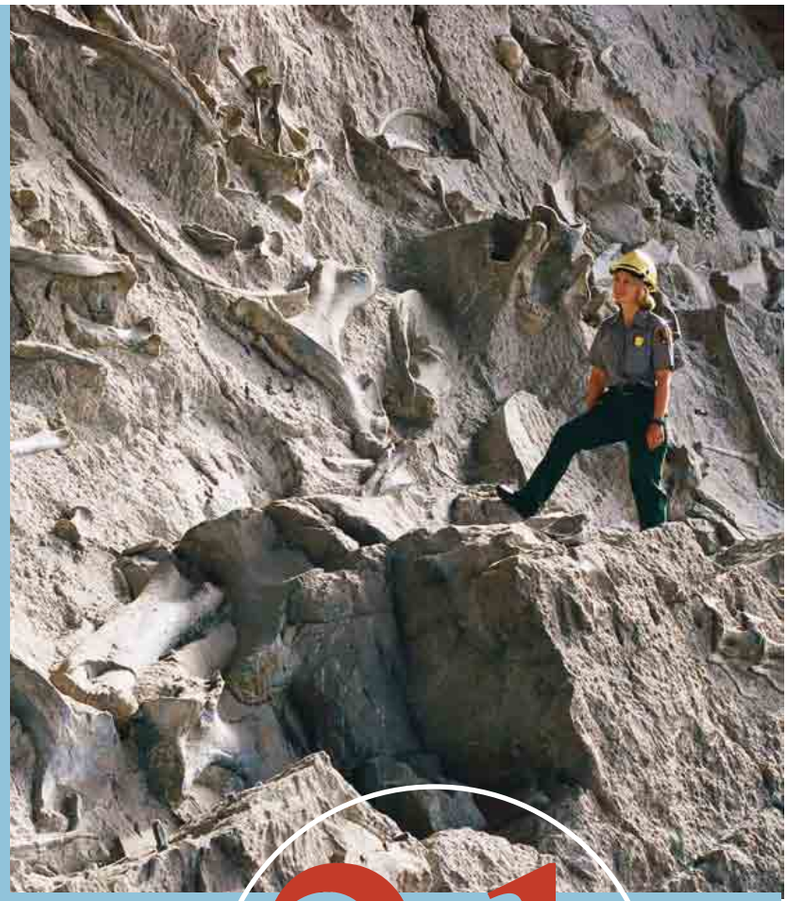
http://hvo.wr.usgs.gov
هذا الموقع هو الصفحة الرئيسة لمرصد بركان هاواي وهو برعاية دائرة المسح الجيولوجي الامريكي. تعرف على احدث المعلومات حول البراكين النشطة في هاواي اضافة الى تاريخ البراكين الخامدة والهزات الأرضية.

الفصل 20 مصادر على الشبكة

دروس تعليمية
- نشاط دورة حياة الصخور

أشرطة فيديو
- دورة حياة الصخور

اختبار قصير
بطاقات تعليمية
روابط



الزمن الجيولوجي
قراءة السجل الصخري

21

1.21 السّجل الصّخريّ – التأريخ النّسبيّ
2.21 التأريخ الإشعاعيّ
3.21 الزّمن الجيولوجيّ
4.21 زمن ما قبل الكامبريّ
(4500 – 543 مليون سنة خلت)
5.21 حقبة الحياة القديمة
(543 – 248 مليون سنة خلت)
6.21 حقب الحياة المتوسطة
(248 – 65 مليون سنة خلت)
7.21 حقبة الحياة الحديثة
(65 مليون سنة خلت حتى الآن)
8.21 تاريخ الأرض في كبسولة

■ يصل عمر الأرض إلى 4.5 مليارات سنة. ويسمى هذا الزّمن الشّاسع *الزّمن الجيولوجيّ* وهو صعب الاستيعاب. ولكن يمكن تخيله باستخدام التمرين التالي:

تخيّل أننا نستطيع ضغط 4.5 مليار سنة في سنة واحدة. إذن، فكوكب الأرض بدأ في التشكل من المادة الأولية في النِّظام الشّمسيّ بتاريخ 1/1. أما أقدم صخور الأرض، فقد ظهرت في نهاية شهر شباط (فبراير). ظهرت البكتيريا البسيطة في البحر في نهاية مارس، ولكن النباتات والحيوانات المعقدة لم تظهر إلا في نهاية تشرين أول، أو بداية تشرين الثاني (أكتوبر- نوفمبر). سادت الديناصورات الأرض في منتصف ديسمبر، واختفت في 26 من ديسمبر. في حين ظهر البشر في الساعة 11.50 بعد الظهر في 31 من ديسمبر. وساد التاريخ البشري المدون كلّه في آخر دقيقة من مساء ليلة نهاية السنة.

كيف يمكننا تفكيك هذا الزّمن الطويل والتحدث عن تاريخ الأرض؟ إنّ تاريخ الأرض مسجل في سجلها الصّخريّ، ويستخدم العلماء مبدأ النسقية لربط ما نعرفه عن عمليات الزّمن الحالي بالأحداث الماضية.

«الحاضر مفتاح الماضي»

ببساطة، ينصّ مبدأ النسقية على أنّ القوانين الطبيعية (كقوانين الفيزياء) التي نعرفها اليوم كانت ثابتة في أثناء الماضي الجيولوجيّ. يشبه السّجل الصّخريّ دفتر يوميات طويلًا ومفصلًا، يحوي تاريخ الأحداث التي شكلت الأرض. ومع ذلك، فإنّ هذا الدفتر غير مكتمل؛ إذ إنّ العديد من صفحاته مفقودة، وبخاصة الجزء الأقدم منها، كما أنّ العديد من الفترات مهترئة وممزقة ويصعب قراءتها. غير أنّ هناك صفحات كافية تم حفظها لتقدم لنا سجلًّا للأحداث في أثناء 4.5 مليار سنة من تاريخ الأرض.

1.21 السّجل الصّخريّ – التأريخ النّسبيّ

توفر طبقات الصخور الرسوبية دليلًا جيدًّا للأعمار النسبية للصخور؛ لأنّ الطّبقات الصّخريّة ترسبت بعضها فوق بعض. وبما أنّ الطبقة السفلى تكونت قبل الطّبقة العليا فهي إذن أقدم من الطّبقات التي تعلوها. وقد يكون أكثر عرض باهر للسجل الصّخريّ هو الأخدود العظيم لنهر كولورادو في أريزونا (الشكل 1.21). فالطّبقات المتكشفة في جدران الوادي وسموكها دليل على النشاط الجيولوجيّ العظيم عبر ملايين السنين. وتختلف الظّروف التي ترسبت خلالها الطّبقات الرسوبية بشكل كبير؛ لأنّها تتغير من فصل إلى آخر، ومن سنة إلى أخرى، ومن قرن إلى آخر.

تظهر بعض الطّبقات دورات مُناخية تمتد عصورًا. في حين تشير طبقات أخرى إلى أزمنة كانت فيها اليابسة مغطاة بمياه بحر ضحلة. وطبقات أخرى تشير إلى فترات زاد فيها هطول الأمطار مصاحبًا لعملية رفع المنطقة بعد ملايين السنين من ترسب الطبقة العليا. وقد قامت عمليات الحتّ من نهر كولورادو بقصّ الطّبقات المتراكمة من الصّخور الرّسوبيّة، كقصّ السّكين لطبقة الكعك، مكونة الوادي الذي نراه اليوم.

ولفهم تاريخ الأرض جيدًا؛ علينا معرفة عمر كلّ تكوين صخريّ. وكما سنناقش قريبًا، فإنّ العمر المطلق للصّخر يقاس من خلال *التأريخ الإشعاعيّ* (قياس النّظائر المشعة نسبة إلى الناتج عن التحلل). ولكن قبل وجود هذه التقنية لمعرفة العمر المطلق لصخر، اعتمد العلماء على التأريخ النسبيّ الذي يرتّب الصخور بتسلسل بحسب عمرها النسبي.

الشّكل 1.21
الطّبقات السفلى من الأخدود العظيم أقدم من الطّبقات العليا، والتي تمثل مبدأ التعاقب الطّبقيّ.

الشّكل 2.21

القواطع التي تقطع جسمًا صخريًّا تكون أحدث من الجسم المقطوع. في الشكل، القاطع أ يقطع القاطع ب، والقاطع ب يقطع القاطع جـ واستنادًا إلى مبدأ القاطع والمقطوع، فإنّ أ أحدث القواطع، يليه القاطع ب، في حين يعدّ القاطع جـ أقدمها. والطّبقات الأفقية التي قُطعت من القواطع الثلاثة جميعها أقدم من القاطع جـ.

وعليه، فإنّ العمر النسبيّ لا يتطلب الزّمن لوقوع الحدث، ولكن زمنه بالنسبة إلى فترات زمنية أخرى في التاريخ الماضي للأرض. يعتمد التأريخ النسبيّ الذي لا يزال مستخدمًا اليوم بشكل واسع على المبادىء الآتية:

1. **التّرسيب الأفقيّ (مبدأ الأفقية الأصليّة)(*Original Horizontality*):** تترسب الطّبقات الرسوبية أصلًا بشكل أفقيّ. لذا فإنّ الطّبقات المائلة التي نراها اليوم – من ميل قليل إلى شديد- تم تشويهها بالزلازل وبناء الجبال بعد ترسبها.
2. **التّعاقب الطبقيّ (*Super Position*):** في تعاقب طبقي لصخور رسوبية لم تتعرض للتشويه، كلّ طبقة تترسب فوق طبقة أقدم منها موجودة أسفلها. مثل الجرائد في الحاويات. حيث نجد الجرائد القديمة أسفل الأحدث منها.
3. **القاطع والمقطوع (*Cross-Cutting Relationships*):** أيّ اندفاع ناريّ، أو صدع يقطع صخورًا موجودة، هو أحدث من الصّخر الذي قطعه (الشكل 2.21).
4. **الاحتواء (*Inclusions*):** هي قطع صخر محتواة في صخر آخر؛ فأيّ قطع محتواة تكون أقدم من الصّخر الحاوي لها. تمامًا كالقطع الصّخريّة الصّغيرة المستخدمة في الأسمنت التي تشكلت قبل تشكّل الأسمنت نفسه. (الشكل 3.21).

الشّكل 3.21

الصخور المحتواة في الصّخر الرسوبيّ وجدت قبل تشكّل الصخر الرسوبي، مما يمثل مبدأ الاحتواء.

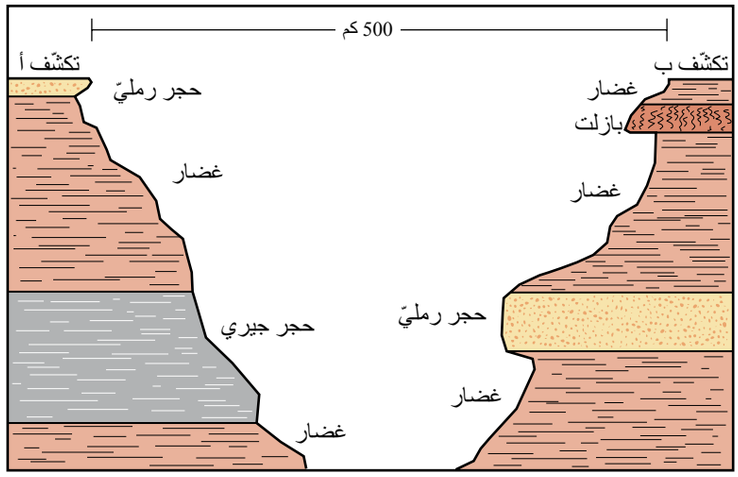
إنّ هذه المبادئ الأربعة واضحة. وتستخدم في معرفة أعمار التّكوينات الصّخريّة بعضها بالنسبة إلى بعض - أي لمعرفة أيّ التّكوينات كان أولًا، وأيّها ثانيًا وهكذا – لمنطقة معينة أو مقطع صخريّ. ولكن لإعادة بناء العمر النسبيّ للصخور لمنطقة أكبر، فإنّنا بحاجة إلى معلومات إضافية. مرة أخرى، يقدّم الوادي العظيم مثالًا نموذجيًّا. لا تمتد صخور الوادي العظيم فترة زمنية طويلة فقط، ولكنها تمتد أفقيًّا لمئات الأميال. لذا تُظهر امتداد بيئة التّرسيب. ولكن لا تري الطّبقات جميعها امتدادًا أفقيًّا كالموجودة في الوادي العظيم. وخلال فترات زمنية طويلة، يمكن لطبقات الصّخور أن تتكسر بالتّصدّع أو الطّيّ، أو أن تغطى برسوبيات أحدث. ولهذا فإنّ كلّ ما نراه هو صخور منفصلة. وفي مثل هذه الحالة، علينا استخدام مبدأ الاستمرارية الجانبيّة.

5. **الاستمراريّة الجانبيّة (*Lateral Continuity*):** ترسبت الطّبقات الرّسوبيّة في الاتجاهات جميعها على مساحة واسعة إلا إذا وجد بعض الحواجز. ويمكن لكلّ من التّصدّع والطّيّ والتّعرية فصل الطّبقات المستمرة أصلًا إلى تكشفات معزولة.

ويمكن استخدام الاستمرارية الجانبية في مطابقة التّكشّفات الصّخريّة المعزولة مع التّكشّفات الأخرى ولمساحات واسعة (الشكل 4.21). إذا احتوت التكشفات المعزولة على خصائص متشابهة (كاللون، والمعادن، وحجم الحبات، والمحتوى الأحفوري) وتتابع عمودي ثابت، فيمكن معرفة أنّها كانت يومًا ما متصلة.

الشّكل 4.21

يمكن استخدام الاستمراريّة الجانبيّة في معرفة العمر النسبي للصّخور في مناطق متباعدة. التكشفان أ، ب لهما خصائص مشتركة، ولكن أحدهما يبتعد عن الآخر ٥٠٠ كم. هل من الممكن أن يكون هذان التكشفان يومًا ما متواصلين؟ وبالنظر إلى التتابع الطبقي، هل يمكن أن تخبر أيّ الصخور أقدم، وأيّها أحدث؟



لذا، عندما تجتمع مع مبادئ تأريخ نسبي أخرى – التعاقب الطبقي والتّرسيب الأفقي- فإنّ الاستمرارية الجانبية تجعل تطبيق علاقات العمر النسبي متاحة فوق مساحة كبيرة.

وكما تم مناقشته في الفصل 20، فالأحافير هي بقايا أو طبعات حيوانات و/ أو نباتات قديمة تم حفظها في الصخر. ومن المعروف اليوم أنّ الأحافير تسجّل تطوّر الحياة على الأرض، ولكن في القرن الثامن عشر، كان يعتقد أنّ دراسة الأحافير مجرد فضول. ثم جاء وليم سميث (1839 – 1769) الذي كان مستكشفًا في مشروع قناة، وشاهد بعض طبقات الصّخور تحوي أنواعًا مختلفة من الأحافير، وأنّ هذه الطّبقات الحاوية أحافير تتبع نسقًا متتابعًا ثابتًا. كما أنّه لاحظ التتابع في أنواع الصّخور والأحافير لكلّ طبقة، ومن ثَمَّ استخدم الأحافير لعمل مضاهاة لطبقات الصخور في مناطق مختلفة. ليكتشف بعد ذلك أنه يمكن استخدام الأحافير لعمل ترتيب زمني لطبقات صخرية متتابعة. وخلُصَ إلى مبدأ تعاقب الحياة مستخدمًا هذه المعرفة العلمية.

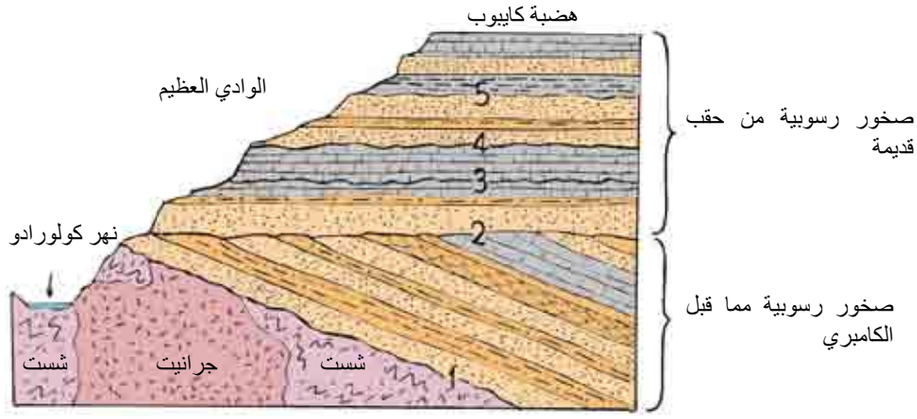
6. **مبدأ تعاقب الحياة (*Faunal Successions*):** تتبع المجموعات الأحفورية بعضها بعضًا بتتابع زمني محدد وغير منعكس. وتتغير مجموعات الأحافير مع الزّمن فينقرض بعض الأنّواع، وتظهر أنواع أخرى، وهذه التغيرات تنعكس في السّجل الصّخريّ. وتعمل الأحافير على توفير وسيلة لمعرفة العمر النسبيّ للصّخور.

إنّ ملاحظات سميث بأنّ الأحافير موجودة في الصخور بترتيب محدد لم تساعد فقط على التأريخ النسبيّ، ولكنها ساعدت أيضًا على مضاهاة الطّبقات الصّخريّة على مقياس عالمي. يمكن مضاهاة الأحافير – بعد تعرفها وتصنيفها – لحالات محددة في تاريخ الأرض الجيولوجيّ. وبعد أن وضع العلماء السّلّم الزّمني، فقد أصبح بالإمكان استخدام الأحافير في الصخور لمعرفة صخور أخرى بالعمر نفسه في منطقة أخرى في الأرض.

وبطرق عديدة، فإنّ دراسة السّجل الصّخريّ تشبه عمل متحرٍّ بوليسيّ يفكك لغز جريمة ما؛ فكلتا الدراستين تتطلب النظر في الدلائل. تمامًا مثلما يملك مختصّو التّحري فرضيات لحلّ ملابسات الجريمة، فإنّ علماء الأرض يعتمدون على مبادئ التأريخ النسبي، وعلاقات العمر، ومضاهاة طبقات الصخور. يقوم العلماء بمضاهاة الصخور، وتتابعها الطّبقيّ . والأحافير في طبقاتها. وكما في حلّ لغز جريمة ما، فإنّه لا يمكن حلّ القضية إلا بوجود دليل واضح. وعادة ما يكون لدى متحرّي علم الأرض دليل بسيط في البداية، ولكنه قد يفقد أحيانًا. قد تؤدي العمليات الداخلية في الأرض إلى طيّ طبقات الصّخور وتشويهها (الفصل 22). في حين تقوم العمليات الخارجية بتجوية الطّبقات وتعريتها (الفصلان 20، و 23). مهما كان السبب، فإنّ النتيجة تفتقد الدليل.

لمعلوماتك

للأحافير دلائل زمنية عظيمة، كما أنّ لها دلائل بيئية مهمة. فمثلًا، هناك أنواع معينة من المرجان الحديثة توجد في مياه دافئة استوائية. وعند وجود مرجان مشابهة متحفرة، نستنتج أنّ المنطقة -حيث وجد المرجان- كانت يومًا ما بحرًا ضحلًا دافئًا استوائيًا. كما تساعد الأحافير على حلّ مسائل تاريخ الأرض.



الشّكل 5.21

يمكن حلّ مسألة عمر الوادي العظيم من خلال تتابع الطّبقات الصّخريّة. كما في مناطق أخرى، فإنّ التتابع غير مستمر، وهناك فجوات زمنية. (1) لا توافق يفصل الصّخور المتحوّلة القديمة عن الصّخور الرّسوبيّة. (2) عدم توافق زاوي يفصل الطّبقات القديمة المطوية عن الطّبقات الرسوبية الأفقية. توجد الفجوات الزّمنية بين الطّبقات الرّسوبيّة الأفقية. عدم التوافق الحتّيّ (3) و(5) من الصعب تمييزها، وتتطلب عينًا جيدة ومعرفة في الأحافير.

الفجوات في السّجل الصّخريّ (Gaps in the rock record)

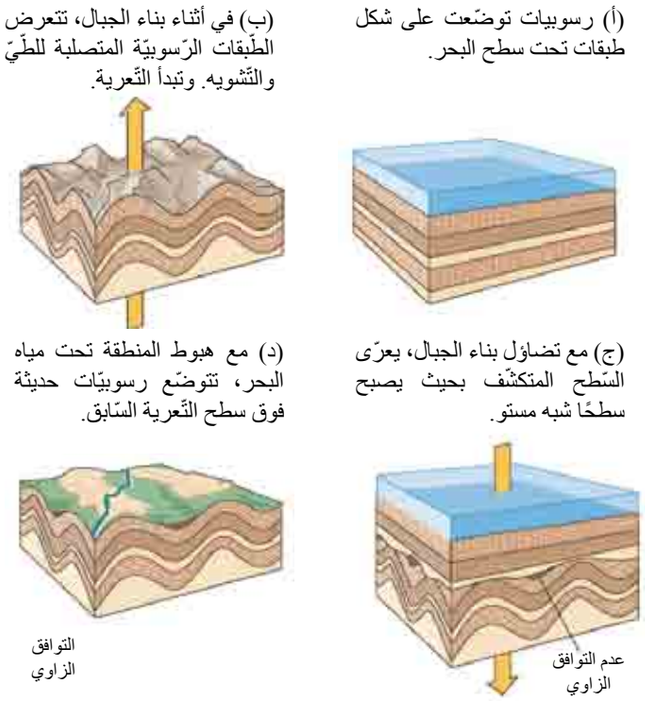
مع أنّ معظم طبقات الصّخور الرّسوبيّة ترسّبت دون انقطاع، فلا يوجد تتابع متواصل من زمن تكوّن الأرض إلى الوقت الحاضر. إنّ التّرسيب مستمر، ولكن عملية التجوية والتعرية، ونهوض القشرة، والعمليات الجيولوجيّة تقوم بإزالة طبقات الصّخور، أو أنّها تؤثّر في التّرسيب. وقد أدت هذه الأسباب إلى وجود انقطاعات أو فجوات في السّجل الصّخريّ، كما يبينه الشكل 5.21. نجد هذه الفجوات، التي ندعوها **عدم التوافق (*Unconformities*)** من خلال ملاحظة العلاقات بين الطّبقات والأحافير.

إنّ أسهل أنواع عدم التوافق تمييزًا هو عدم التّوافق الزّاويّ (*Angular unconformities*). في هذا النوع، يتم تغطية صخور مطوية أو مائلة رسوبية بطبقات أفقية أحدث سهلة التمييز؛ لأنّ الطّبقات الصّخريّة أسفل عدم التوافق تصنع زاوية نسبة إلى الطّبقات فوق سطح عدم التوافق. يتشكّل سطح عدم التوافق الزاوي عندما ترفع طبقات قديمة كانت أصلًا أفقيّة، وتميل بحركات في باطن الأرض (الشكل 6.21). وفي أثناء عملية الرفع وبعدها، تعمل التّعرية على تسوية السّطح المكون من طبقات مائلة تؤدي إلى تكوين سطح جديد منبسط. وبعد انتهاء فترة التعرية، تتوضّع طبقات رسوبية جديدة فوق الطّبقات المائلة، وتكون هذه الطّبقات الأحدث أفقية. عدم التوافق الزاوي هو «سطح التعرية» الذي يفصل الطّبقات المائلة عن الأفقية، ويمثل الفترة الزّمنية الطويلة التي حدثت خلالها عمليتا الرّفع والتّعرية. هل ترى أنّ عدم التوافق الزاوي عادة يمثل أحداث بناء جبال قديمة؟ إنّ جزء السّجل الصّخريّ الذي يمثل هذه الفترة الزّمنية مفقود الآن بسبب التعرية، وعدم التوافق هو الدليل الباقي.

وعند وجود صخور رسوبية فوق سطح تم تعريته في صخور متحولة أو نارية جوفية فإنّنا نسمي عدم التوافق *هنا لا توافق*. تكونت الصخور النارية أو المتحولة عميقًا تحت سطح الأرض، ولكنها أصبحت فوق السطح عندما ترسبت عليها الصخور الرسوبية. لذا فإنّ اللاتوافق يشير إلى أنّ عملية كبيرة من الرفع والتعرية حدثت قبل ترسب الطّبقات الرسوبية، مع وجود فترة طويلة من الزّمن الضّائع في السّجل الصّخريّ. ومن أنواع عدم التوافق كذلك *عدم التوافق الحتّيّ* الذي يكون عند وجود زمن ضائع بين طبقات رسوبية أفقية. ولأنّ الطّبقات أعلى السطح وأسفله تكون متوازية، فإنّ من الصعب تمييز هذا النوع من عدم التوافق.

الشّكل 6.21

تتابع الأحداث التي تنشىء سطح عدم التوافق الزاوي.



■ **نقطة فحص**

1. إذا قطع محقون جرانيتي مثل القاطع طبقات رسوبية، فأيهما أقدم: الطّبقات الرّسوبيّة أم الجرانيت؟
2. انظر إلى التّكشّفات أ و ب في الشّكل 4.21. التّكشّفات مفصولة بمسافة 500كم. هل من الممكن أن تكون هذه الطّبقات في يوم ما متواصلة؟ إذا كان الجواب نعم، فأيّ الطّبقات أقدم، وأيّها أحدث؟

هل كانت هذه إجابتك؟

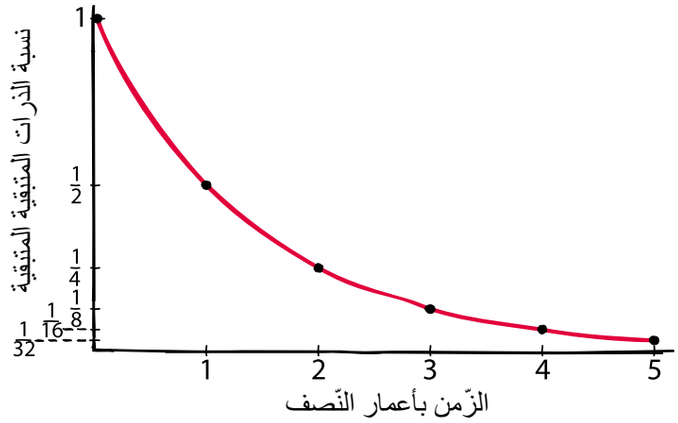
1. المحقون صخر حديث التّشكّل. لذا، فإنّ الطّبقات الرسوبية أقدم من المحقون الذي قطع الطّبقات.
2. نعم، إذا كانت متواصلة، فإنّ الحجر الرّمليّ في التّكشّف أ يطابق الحجر الرّمليّ المحصور بين طبقتي الغضار في التّكشّف ب. ولهذا، فإنّ الطّبقات الصّخريّة كلّها فوق الحجر الرّمليّ ب هي أحدث. أمّا بالنسبة إلى التّكشّف أ، فإنّ التّرسيب الأفقيّ والتّعاقب الطّبقيّ يدلنا على أنّ الغضار السّفلي هو الأقدم، ومن ثمّ الحجر الجيري، يليه الغضار، وأخيرا الحجر الرملي. نفترض التتابع نفسه في التّكشّف ب. لكننا لا نرى الحجر الجيري. وإذا وجدت الأحافير فهذا يدعم استنتاجنا.

■ 2.21 التأريخ الإشعاعيّ

يخبرنا التأريخُ النسبيّ أيَّ جزء من قشرة الأرض هو الأقدم أو الأحدث، ولكنه لا يخبرنا بالعمر الحقيقي للصخر: أي الزّمن الذي انقضى منذ تصلبه. وعليه، يمكن معرفة العمر الحقيقي للصخر باستخدام **التأريخ الإشعاعيّ *(Radiometric dating)***، وهي عملية تقيس نسبة النّظائر المشعة إلى الناتج عن التحلل. يشير عمر النّصف للنظير المشع إلى الزّمن اللازم لتحلل نصف المادة لإعطاء النظير الوليد (الشكل 7.21). ويمكن مشاهدة بعض النّظائر المعروفة المستخدمة في التأريخ ومعرفة الزّمن الجيولوجيّ في (الجدول 1.21).

لمعلوماتك

إنّ أقدم الصّخور التي عُثر عليها هي صخور النايس في أكاستا في شمال غرب كندا. حدّد عمر بلورات الزركون صخور التايس 4.03 مليار سنة- وهو العمر الأصلي قبل التّحول. وأقدم معدن عُثر عليه هو بلورة زركون في حجر رملي في أستراليا. عمر البلورة 4.4 مليار سنة. يشير وجود هذه البلورة إلى أنّ الأرض بردت أسرع مما نعتقد. العلم ليس ثابتًا، بل يتقدم مع الاكتشافات الحديثة كلّ يوم.



الشّكل 7.21
كمية المادة الأم مقارنة بعدد فترات عمر النّصف المتبقية مع تحلّل النظير الأم.

لتأريخ أجسام حديثة جيولوجيًّا، وخصوصًا لتأريخ المادة العضوية، فإنّ نظير الكربون - 14هو الاختيار الأمثل. للكربون – 14 عمر نصف قصير نسبيًّا (5760 سنة). لذا، فهو مفيد في تأريخ الأحداث الجيولوجيّة الحديثة التي تمّت خلال الـ 50000 سنة الأخيرة (انظر بند 4.13). ولكن لتأريخ مواد أقدم، تُستخدم عناصر مشعة كاليورانيوم. إنّ العديد من الصّخور الشّائعة تحوي كميات قليلة من اليورانيوم، ونحتاج إلى كمية قليلة لعمل تحاليل مختبرية. يتحلل اليورانيوم - 238 إلى النظير المستقر الرّصاص206. في حين يتحلل اليورانيوم - 235 إلى النظير المستقر الرّصاص - 207. لا يوجد أيّ مصدر طبيعيّ لهذين النّظيرين من الرّصاص، لذا فإنّ أيّ رصاص - 206 أو رصاص - 207 موجود في صخر اليوم كان في يوم ما يورانيوم. فمثلًا، إذا احتوت عينة على كميات متساوية من اليورانيوم – 235 والرّصاص - 207، فإنّ عمر العينة هو عمر نصف واحد لليورانيوم – 235 وهو 704 ملايين سنة. وإذا احتوت عينة من اليورانيوم على كمية قليلة من الرّصاص207-، فإنّ العينة أصغر عمرًا من عمر نصف واحد لليورانيوم (لم يتم مرور عمر نصف).

لمعلوماتك

يعتمد التأريخ الإشعاعيّ على افتراض أنه مع تبلور المعدن، فإنّ أي نظير وليد يتم العثور عليه هو من خلال الأم فقط. مما يعني أنه لا وجود للنظير الوليد في البداية. وهناك افتراض مهم آخر وهو عدم وجود تسرب للنظير الأم أو الوليد داخل المعدن أو خارجه. فمثلاً، إذا وجد معدن بالتحول فإنّ الساعة يتم إعادة بدئها مما يعقد تحديد العمر. في التأريخ الإشعاعيّ وطرق التأريخ الأخرى هناك القليل من عدم الدقة. إنّ إعادة التأريخ في عملية التأريخ النسبي والمطلق تزيد من الدقة.

■ **نقطة فحص**

1. هل يمكن استخدام الكربون – 14 لتحديد عمر صخور عمرها 100 مليون سنة؟
2. كيف يمكننا تحديد عمر صخور رسوبية؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. لا؛ لأنّ الكربون – 14 له عمر نصف مقداره 5760 سنة. ويمكن استخدامه لتحديد أعمار الصخور الحديثة فقط. أي كربون – 14 (مثلًا من الكالسيت) موجود في صخر قديم بهذا العمر يكون قد تناقص إلى كمية غير قابلة للقياس.
2. إذا علمنا العمر الأكبر (لا يمكن أن يكون عمر الصخر أكبر من عمر المعادن داخله) لأيّ طبقة تعلوه أو أدنى منه، فإنّنا نستطيع تقدير عمر الصخر الرسوبي ما بين هذين العمرين باستخدام مبدأ التعاقب الطبقي.

الجدول 1.21 النّظائر المستخدمة في التأريخ الإشعاعيّ

النّظيرة الأم المشعّة	النّظير الوليد المستقرّ	عمر النّصف
يورانيوم – 238	رصاص – 206	4.5 مليار سنة
يورانيوم – 235	رصاص – 207	704 ملايين سنة
بوتاسيوم – 40	أرجون – 40	1.3 مليار سنة
كربون - 14	نيتروجين – 14	5760 سنة

إنّ التّحلل الإشعاعيّ موجود في كلّ مكان. العناصر التي لها عدد ذريّ أكبر من 82 (الرّصاص) جميعها مشعة، ولكنها ليست بالضرورة خطيرة.

3.21 الزّمن الجيولوجيّ

تم تطوير سلم الزّمن الجيولوجيّ (الشكل 8.21) باستخدام التأريخ النسبي. ومن ثم إعطاء أعمار محددة لها باستخدام التأريخ الإشعاعيّ. يقسم سلّم الزّمن الجيولوجيّ تاريخ الأرض، 4.6 مليار سنة إلى وحدات زمنية بأحجام مختلفة. *الدهور* (جمع دهر) هي أكبر الوحدات في الزّمن الجيولوجيّ. وقد بدأ الدهر الذي نعيش فيه قبل 543 مليون سنة. ويسمى دهر الحياة الظاهرة. يقسم دهر الحياة الظاهرة إلى ثلاث حقب هي: حقبة الحياة القديمة، وحقبة الحياة المتوسطة، وحقبة الحياة الحديثة. وكلّ واحدة من هذه الحقب الثلاث تقسم بدورها إلى *عصور*، ومن ثم تقسم هذه العصور إلى *فترات*.

لاحظ أنّ معظم تاريخ الأرض موجود قبل حقبة الحياة القديمة. وتسمى هذه الفترة الزّمنية زمن ما قبل الكامبري (*Precambrian Time*) التي تمتد قرابة 4 مليار سنة من تاريخ الأرض. يقسم زمن ما قبل الكامبري إلى ثلاثة دهور هي: الهادي، والأركي، والبروتيروزي.

لمعلوماتك

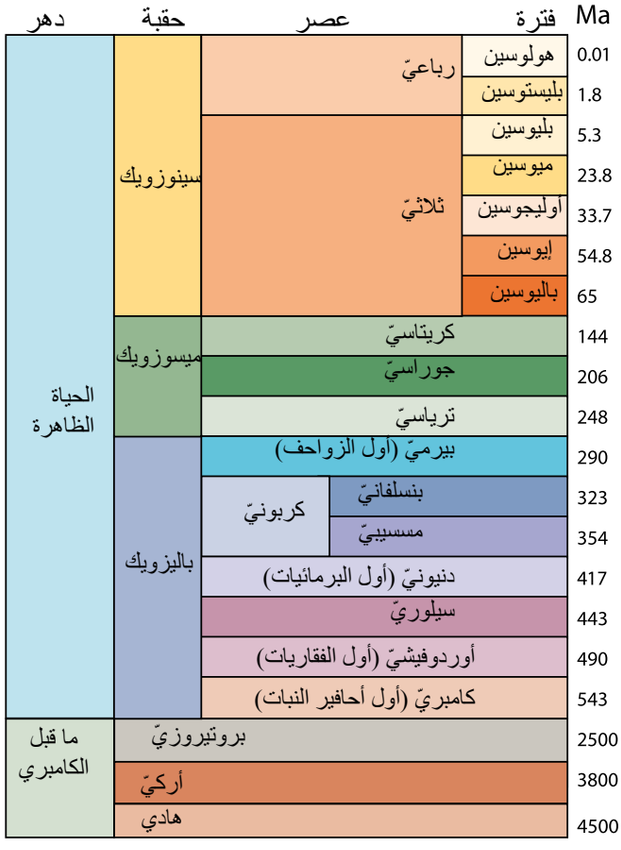
■ يمكن للتأريخ الإشعاعيّ أن يعطينا عمر معادن أو/و مادة عضوية، ولكنه لا يمكن أن يعطينا مباشرة عمر صخر رسوبي. تذكر أن الصخور الرسوبية مكونة من بقايا صخور قديمة. لذا يمكن تأريخ المعدن في الصخر وليس تأريخ الصخر الرسوبي. لا يمكن أن يكون عمر الصخر أكبر من عمر المعادن فيه (مبدأ الاحتواء). لذا كيف نحدد عمر الصخر الرسوبي؟ نستخدم التأريخ النسبي بالتعاون مع التأريخ المطلق لإعطاء حدود لعمر الصخر. كلما زادت التقنيات كان العمر أفضل.

■ نقطة فحص

1. صف الزّمن الحاليّ من تاريخ الأرض بالنسبة إلى وحدات الزّمن الجيولوجيّ من الدهر إلى الفترة.
2. الوحدات الزّمنية في سلم الزّمن الجيولوجيّ هي بوحدة Ma. فما معناها ؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. نعيش في دهر الحياة الظاهرة، في حقبة الحياة الحديثة، في العصر الرّباعيّ وفترة الهولوسين.
2. *Ma* تعني مليون سنة.



الشّكل 8.21

يقسم سلم الزّمن الجيولوجيّ تاريخ الأرض إلى وحدات زمنية بأحجام مختلفة. وحدة الزّمن فيه هي Ma (مليون سنة). فمثلًا، بدأت حقب الحياة القديمة قبل 543 مليون سنة.

4.21 زمن ما قبل الكامبريّ (4500 – 543 مليون سنة خلت)

يتراوح زمن ما قبل الكامبريّ من 4.5 مليار سنة، عندما نشأت الأرض، حتى 543 مليون سنة عندما ظهرت أشكال للحياة كثيرة وكبيرة. يشكّل زمن ما قبل الكامبريّ – وهو الزّمن الذي نعرف القليل عنه – 90% من تاريخ الأرض. إنّ معظم الصخور التي تشكّلت في هذا التّاريخ المبكر تم تعريتها، أو تحولها، أو إعادة تدويرها إلى باطن الأرض. ولم يكن للكائنات في ذلك الزّمن أعضاء صلبة لتتحفّر بسهولة. لذا فإنّ الأحافير في هذا الزّمن الهائل نادرة.

في بداية ما قبل الكامبري- دهر الهادي – كان زمن أنشطة بركانية وارتطام نيازك كثيرة* . واصلت قطعٌ صغيرة وكبيرة من فتات بين كوكبي، من بقايا تكوّن النّظام الشّمسي، الارتطامَ بالأرض وتحطمت تاركة ندبًا فيها. كانت الأرض كوكبًا خاليًا من المحيطات، مغطاة بالبراكين التي تنفث الغازات والبخار من باطنها. ثم تكونت تيارات حمل كثيفة من الكميات الهائلة من الحرارة التي انطلقت من باطن الأرض، وجعلت قشرة الأرض القديمة مضطربة. أما الغلاف الجويّ لدهر الهادي، فقد تكوّن معظمه من غازات اندفعت من البراكين. قد يكون ثاني أكسيد الكربون كوّن 80% أو أكثر من الغلاف الجوي. وقد شكّل بخار الماء معظم الباقي مع النيتروجين، والأمونيا، وثاني أكسيد الكبريت، وأكسيد النيتريك كمكونات ثانوية. ولم يكن هناك وجود لأكسجين حرّ.

وفي وسط ما قبل الكامبري – دهر الأركي- بدأ سطح الأرض يبرد (الشكل 9.21)، مما هيأ فرصة نشأة المحيطات. ومع درجات حرارة أقلّ، تكاثف بخار الماء وشكّل الغيوم. وهطل من الغيوم كميات مياه أمطار كانت كافية لتغطي سطح الأرض ببحار ضحلة. وبقي باطن الأرض حارًّا ونشيطًا، وشكلت الفوهات البركانية جُزرًا صغيرة التحمت فيما بعد بجزر صغيرة أخرى لتكون جزرًا أكبر.

أصبحت هذه الجزر الكبيرة مقدمة لتشكل القارات القديمة. ويمكن رؤية أدلة على الالتحامات القديمة في صخور مطوية ومتصدعة معينة (مثلًا طبقات الصخور بجانب أكاستا، كندا) التي تشكل الآن وسط القارات الحالية. بدأت الحياة في الظهور خلال الأركي، وأثر هذا الحدث في الأحداث اللاحقة جميعها. كان عمر الكائنات البسيطة الأولى التي وجد لها أحافير 3.5 مليار سنة. ** ستروماتوليت – وهي شبه الطحالب وتوجد كمستعمرات من البكتيريا مع رسوبيات كربوناتية في البحار الضحلة، وهي أقدم أحافير كائنات دقيقة معروفة.

الشّكل 9.21

يوضح هذا الرسم المظاهر المميزة لدهر الأركي، بما في ذلك قطع الفضاء مثل النيازك والمذنبات التي تتحطم على سطح الأرض. المادة الخضراء اللامعة على حافة الماء هي البكتيريا الأولية (أركايا) أما السيانوبكتيريا فموجودة في اللون الأخضر الغامق، التراكيب الدائرية في الماء تسمى ستروماتوليت.

لمعلوماتك

- في بداية تاريخ الأرض 4.5 – 4.3 مليار سنة، ارتطم نيزك بحجم المريخ بالأرض، مما أدى إلى زيادة الحرارة وتكوين جسم يدور حول الأرض ألا وهو القمر. كما أنّ الارتطام أدى إلى إمالة محور دوران الأرض حول نفسها 23.5 درجة. ودون هذا الارتطام، فإنّ محور دوران الأرض لن يميل نحو الشّمس، ولن يكون هناك فصول في الأرض.

* النيزك هو أيّ جسم صلب من الفضاء وقع على سطح الأرض دون أن يتبخر في الغلاف الجوي. وسوف نتعلم أكثر عن هذه الأجسام في الفصل 26 عندما ندرس تشكّل النّظام الشّمسيّ.

** ستروماتوليت لا تزال موجودة إلى الآن. وهي أحافير حية مهمة. يمكن أن توجد في البحيرات المالحة واللاغون المحصور، مثل خليج القرش في غرب أستراليا.

اربط مع الكيمياء

■ تكاوين الحديد المخطط

تحتفظ صخور الأرض بتاريخ الأرض. كما أنّ الغلاف الجوي للأرض الأولى يمكن تعرفه من المعادن في السّجل الصّخريّ. قبل 4 مليار سنة كان الغلاف الجوي يتكون من 80% ثاني أكسيد الكربون، و10% نيتروجين، و10%بخار ماء. أما اليوم، فالغلاف الجوي يتكون من 78% نيتروجين، و21% أكسجين. وهذا الاختلاف كبير. فماذا حدث لثاني أكسيد الكربون؟ من أين جاء الأكسجين الموجود حاليًّا كله؟ الجواب هو أنّ هناك عملية واحدة تفسر كلّ شيء وهي البناء الضوئي.

لقد ذاب معظم ثاني أكسيد الكربون في ماء البحر، وتفاعل مع الكالسيوم الذائب والماغنسيوم لتشكيل الحجر الجيري. لذا فإنّ مصدر أول صخور الحجر الجيري من الغلاف الجوي. ومع موت الكائنات التي تعمل بناء ضوئيًّا غاصت بقاياها إلى قاع البحر لتختلط مع الرسوبيات وتكوّن حجرًا جيريًّا آخر. كما أنّ الأكسجين ذاب أيضًا في الماء. وعندما بدأ إنتاج الأكسجين من البناء الضوئي، ذاب الكثير منه في ماء البحر. ولكن قبل زيادة تركيز الأكسجين، فإنّ البيئة الفقيرة بالأكسجين سمحت للحديد الذائب بالترسب في المحيطات. لذا، فإنّ الحديد المذاب كان شائعًا في البحار الأولى. وبعد أن زاد الأكسجين المذاب، تفاعل مع الحديد المذاب فتسبب في ترسيب الحديد. ومن ثم، فإنّه عندما كان الهواء لا يحتوي على أكسجين، أو أنه يحوي كميات قليلة، فقد كان هناك قليل من الأكسجين في ماء البحر، وكميات كبيرة من الحديد المذاب. وعندما زاد تركيز الأكسجين، ترسب الحديد ليكون طبقة من معدن أكاسيد الحديد على قاع البحر. وعندما قلّ تركيز الأكسجين، قلّ ترسيب الحديد. هذا النمط الدوري لمستويات الأكسجين المتغيرة يظهر في الطّبقات المتبادلة لمعادن أكاسيد الحديد والرسوبيات الخالية من الحديد – تكوينات حديد مخططة.

استمرت هذه العملية من قبل 2.6 مليار سنة وحتى قبل 1.9 مليار سنة أي لفترة 700 مليون سنة. وهكذا تكونت الصخور الغنية بالحديد التي تدعم الصناعة حاليًّا. تعتمد صناعات الحديد والفولاذ العالمية الآن كليًّا تقريبًا على الخامات الحديدية المصاحبة لتكوينات الحديد المخطط.

لمعلوماتك

■ قلّل المطر بخار الماء في الغلاف الجوي، كما قلّل كمية ثاني أكسيد الكربون الذي ذاب في قطرات الماء والمحيطات المتشكلة. وبهذه الطريقة، بدأ الغلاف الجوي يصبح غنيًّا بالنيتروجين.

استند نجاح هذه الكائنات الأولى إلى قدرتها على البقاء في البيئة الأولى الفقيرة بالأكسجين. هذه الكائنات الدقيقة، البكتيريا الخضراء المزرقة، كان لها نوع بسيط من البناء الضوئي. تقوم هذه الكائنات بدمج ثاني أكسيد الكربون مع الطاقة الشّمسية لعمل السكر البسيط – مصدر طاقة حيوي قابل للاستعمال.

يعد الأكسجين من فضلات تفاعل البناء الضوئي حيث يُطلق. لم يتراكم الأكسجين في هذه الفترة في الغلاف الجوي، بل ذاب في ماء البحر، ودخل في تكوين أنواع معينة من الصخور. تفاعل الأكسجين الذائب مع الحديد الذائب الذي كان موجودًا بكثرة في البحار الأولى، وقد أدى هذا التفاعل إلى تكوين أكاسيد حديد صلبة ترسبت في صورة *تكوينات حديد مخططة*. وتعد هذه التكوينات الصّخريّة القديمة شاهدًا على كمية الأكسجين التي تم إطلاقها في ذلك الوقت.

يحدد دهر البروتيروزي الذي استغرق بليوني سنة نهاية أطول فترة زمنية للأرض. وإليك بعض التغيرات في هذه الفترة: التحمت الكتل القارية جميعها لتكون قارة واحدة تدعى – *رودينيا* (كلمة روسية تعني الأرض الأم). وقد امتدت رودينيا من القطب الشمالي إلى الجنوبي، ثم انقسمت لتكوين مجموعة أخرى من القارات. ولكن حقيقة وجود معظم القارات بالقرب من القطب الشمالي أو الجنوبي قد يكون عاملاً مؤثرا في ذلك. مُناخيًّا، بردت الأرض لدرجة غطت الجليديات معظم سطحها. أما سبب البرودة فغير واضح. وقد ازدهرت الحياة في البروتيروزي في اتجاه جديد. فقد أنشأ التطور كائنات وحيدة الخلية ذات نواة. وقد عثر على أحافيرها في صخور عمرها 1.5 مليار سنة تقريبًا. وفي تغير آخر، ظهرت نباتات وحيوانات متعددة الخلايا منذ حوالي 700 مليون سنة مضت.

تحتوي صخور البروتيروزي في جنوب أستراليا على العديد من الأحافير لحيوانات ذات أجسام طرية؛ حيث تزودنا بالدليل الأول لمجتمع حيواني عاش في مياه بحرية ضحلة.

قد تكون المسألة الأكثر أهمية هي تراكم الأكسجين الحرّ في الغلاف الجويّ. فقد كان معظم الغلاف الجوي في زمن البروتيروزي مكوّنا من النيتروجين مع قليل من بخار الماء وثاني أكسيد الكربون. ولكن الأكسجين الحرّ الذي تحرر بالبناء الضّوئيّ من النّباتات في المحيطات بدأ الانتقال إلى الهواء. حتى هذا الزّمن، تم حبس الأكسجين المتحرر في ترسبات الحديد الضخمة حول العالم. ومع توقف استهلاك الأكسجين المنتج من قبل الحديد، بدأ الأكسجين الحرّ يزداد في الغلاف الجوي. وعندما توافرت كميات كبيرة من الأكسجين الحرّ (O_2) في الغلاف الجوي، بدأ تكوّنُ طبقة الأوزون الأولية (O_3) فوق سطح الأرض. وهذه الطبقة مهمة جدًّا؛ لأنّها تقلّل من كمية الأشعة فوق البنفسجية الضارة (UV) التي تصل سطح الأرض. أدى تراكم الأكسجين الحرّ في الغلاف الجوي والحماية المضافة الناجمة عن وجود طبقة الأوزون الجديدة إلى بروز حياة جديدة.

لمعلوماتك

■ العديد من صخور حقب الحياة القديمة مفيدة اقتصاديًّا. فمثلًا، العديد من الحجر الجيري الذي يتم تعدينه للبناء والأغراض الصناعية وترسبات الفحم في غرب أوربا وشرق أمريكا تشكلت خلال حقب الحياة القديمة.

■ **نقطة فحص**

1. ما الطريقتان اللتان كان تطور الأكسجين الحرّ فيهما أساسيًّا لتطور الحياة الجديدة؟
2. أين ذهب ثاني أكسيد الكربون الذي ميّز الغلاف الجويّ الأوليّ؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. وفر الأكسجين الحرّ على شكل O_3 حمايةً من الأشعة فوق البنفسجية الضارة. أمّا الأكسجين على شكل O_2 فتوافر لعملية التّنفس.
2. لقد ذاب معظم ثاني أكسيد الكربون في المحيطات، اتحد مع الكالسيوم، وشكّل الحجر الجيريّ ($CaCO_3$). استهلك بعضه من قبل كائنات وحيدة الخلية في عملية البناء الضّوئي، والتي بعد موتها دخلت في الصخور.

■ 5.21 حقبة الحياة القديمة (543 – 248 مليون سنة خلت)

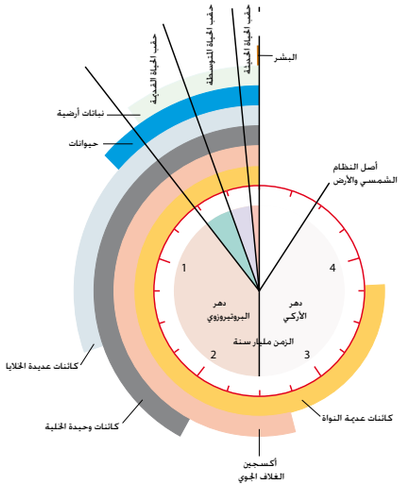
إنّ ما نعرفه عن حقب الحياة القديمة مقارنة بزمن ما قبل الكامبري كثير، ولكنه قصير جدًّا. بدأت الحقب القديمة قبل 543 مليون سنة، واستمرت 295 مليون سنة. وخلال هذا الزّمن، ارتفع مستوى البحر في العالم وانخفض عدة مرات، مما أدى إلى غمر القارات ببحار ضحلة، وازدهار الحياة البحرية. وقد أدى تغير مستوى البحر إلى تطوّر أشكال الحياة وتنوعها - من لافقاريات بحرية إلى أسماك، وبرمائيات، وزواحف. ومن الأحداث المهمة في حقب الحياة القديمة تطور كائنات ذات أصداف. وفي الحقيقة، وبسبب الكائنات ذات الأصداف، تعرفنا الكثير عن حقب الحياة القديمة؛ لأنّ هذه الكائنات ذات الأصداف لها أجزاء صلبة يمكن حفظها وتحفرها بسهولة. تقسم الحقب القديمة إلى ستة عصور يتميز كلّ منها بتغير في أشكال الحياة وطبيعة اليابسة.

العصر الكامبري (The cambrian period) (543 – 490) مليون سنة خلت

إنّ ما يميز العصر الكامبري هو أنه بداية حقب الحياة القديمة. كانت درجات الحرارة العالمية أعلى مما كانت عليه في البروتيروزي الجليديّ. وقد أشارت أدلة أحفوريّة إلى أنّ درجات الحرارة كانت أعلى منها حاليًّا.

الشّكل 10.21

تبين هذه الساعة وقت ظهور كلّ مجموعة كائنات على الأرض. لقد ظهرت في حقبة الحياة القديمة العديد من الكائنات والنباتات.



أما شكل اليابسة، فلم يكن هناك أرض يابسة عند القطبين، ولم يكن هناك جليد. انصهرت الكتل الجليدية من البروتيروزي، مما أدى إلى ارتفاع مستوى سطح البحر. ثم فاضت المياه على المناطق المنخفضة، وغطت معظم اليابسة بمياه ضحلة. وسّع هذا الفيضان وجود حيوانات بحرية في بداية حقب الحياة القديمة. وقد كان هناك تنوّع كبير في الحياة. سمّي هذا الجزء من تاريخ الأرض *انفجار العصر الكامبري*.

لقد ظهرت مجموعات الكائنات البحرية كلّها في العصر الكامبري تقريبًا، وأثبت ذلك الدليل الأحفوري. وقد كانت أهم حادثة في هذا العصر هي قدرة الكائنات على أخذ كربونات الكالسيوم وفوسفات الكالسيوم واستعمالهما في بناء أصدافها وهياكلها الخارجية، مما ساعد الكائنات على أن تصبح أقلّ عرضة للافتراس، ووفرت لها حماية من الأشعة فوق البنفسجية الضارة. ومع وجود الهيكل الخارجي، تحرك العديد من الكائنات للعيش في بيئات بحرية ضحلة.

وبسبب الأجزاء الصلبة، فإنّ السّجل الأحفوري للعصر الكامبري حُفظ جيدًا، وقد سادت فيه لافقاريات بحرية ضحلة ذات هياكل صلبة. وازدهرت أنواع كائنات منها الترايلوبيت - الصّرصور المدرّع- في بحار الكامبري (الشكل 11.21).

الشّكل 11.21
الترايلوبيت هي الأحفورة الشائعة في العصر الكامبري.

لمعلوماتك

■ كيف تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى ارتفاع مستوى البحر؟
بطرائق عدة: عند انصهار كتل الجليد على اليابسة، فإنّ الماء الناتج عن الانصهار يتوجه إلى المحيطات فيرتفع منسوبها (كتلة الجليد فوق القطب الشمالي تطفو فوق الماء. لذا، فإنّ انصهارها لا يرفع مستوى البحر). كما أنّ حجم مياه المحيطات يتحدد مع ارتفاع درجة حرارتها. هذا مثال على التمدد الحراري الذي شرح في الفصل 6.

العصر الأوردوفيشيّ(The ordovician period) (443 – 490) مليون سنة خلت

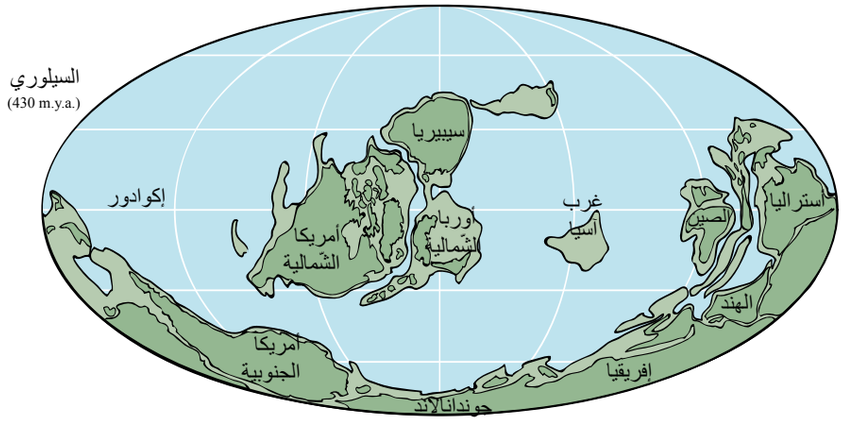
كانت الكتل القارية القديمة لأمريكا الجنوبية، وإفريقيا، وأستراليا، والقطب الجنوبي، والهند في أثناء العصر الأوردوفيشي تندمج لتشكل قارة جديدة كبيرة تسمى *جوندوانالاند*. خلال الأوردوفيشي، تحركت جوندوانا جنوبًا واستقرت فوق القطب الجنوبي. وقد أدّى ذلك إلى أنّ يكون الجزء الأخير من الأوردوفيشيّ واحدًا من أبرد الأوقات في تاريخ الأرض؛ لأنّ معظم اليابسة كانت فوق القطب الجنوبي. غطى الجليد معظم جوندوانا، وبدأت البحار الضحلة في التلاشي. ومع انخفاض مستوى البحر، فقدت العديد من اللافقاريات ذات البيئة الضحلة موطنها.

يشير السّجل الأحفوري أنّ بداية الأوردوفيشي ووسطه كان زمنًا ساد فيه تنوع حياة بحرية كبير (الشكل 12.21). كما أنّ الأوردوفيشيّ هو العصر الذي بدأت فيه الفقاريات، بما في ذلك الأسماك العديمة الفكوك. أما نهاية هذا العصر، فقد سادها توسع الانقراض بسبب انتشار البرد والجليد غالبًا. لقد أثر الانقراض في مجموعات الكائنات التي تعيش في البحار الضحلة بسبب فقدان موطنها. في حين لم تتأثر كائنات البحار العميقة.

الشّكل 12.21
السمكة الساحرة هي إحدى الأسماك العديدة الفكوك الباقية وهي مجموعة ازدهرت في العصر الأوردوفيشيّ.

العصر السيلوريّ(The silurian period) (417 – 443) مليون سنة خلت

بقيت قارة جوندوانا في أثناء العصر السيلوري قريبة من القطب الجنوبي، وكانت قارات أمريكا الشمالية، وأوربا، وسيبيريا قرب خط الاستواء (الشكل 13.21). بدأ مناخ الأرض في الاستقرار والدفء مما أدى إلى انصهار العديد من المناطق الجليدية وارتفاع مستوى البحر. فأصبحت معظم القارات مغطاة ببحار ضحلة. وفي أمريكا الشمالية، كانت البحار الضحلة محاطة بشعاب المرجان التي أوقفت عملية تبادل الماء بين البحار داخل القارات والمحيطات المفتوحة. ومع تبخر الماء بين البحار داخل القارات، ترسب الجبس ومعادن متبخرات أخرى. توجد طبقات متبخرات تابعة للعصر السيلوري في أوهايو، وميتشيجان، ونيويورك.



الشّكل 13.21
تمثل هذه الخريطة مواقع القارات القديمة في العصر السيلوري.

ظهرت في العصر السيلوري الحياة البرية، أي النباتات. وقد ظهرت النباتات الأقدم ذات نظام التدوير المتطور* في العصر السيلوري. لقد كانت هذه النباتات مرتبطة بأصلها المائي. لذا، فإنّها سكنت اليابسة الرطبة المنخفضة. ومع انتقال النباتات إلى اليابسة، انتقلت معها كائنات قارية أخرى؛ فالعقارب التي تتنفس الهواء كانت حيوانات شائعة على اليابسة في هذا العصر من تاريخ الأرض.

لمعلوماتك

■ كان يعتقد أنّ السيلاكانث انقرضت في حقب المتوسطة. في عام 1938م تم العثور على أول سمكة حية في شواطئ شرق إفريقيا. ثم تم اكتشاف أفراد أخرى منذ ذلك الوقت في مدغشقر. وتعدّ الآن أحفورة حية.

العصر الدّيفونيّ (The devonian period) (354 – 417) مليون سنة خلت

في أثناء العصر الدّيفونيّ، اندمجت قارات أوربا وأمريكا الشمالية القديمة لتكوّن قارة أوراسيا (أوربا، وأمريكا الشّمالية، وسيبيريا، وشمال الصين القديمة)، التي كانت موجودة عند خط الاستواء. في حين بقيت جوندوانا في النصف الجنوبي من الأرض.

كان مُناخ العصر الديفوني دافئًا ورطبًا عمومًا. انتشرت النباتات فوق سطح الأرض، وازدهرت غابات أشجار وسرخسيّات في المناطق المنخفضة. تنوعت الأسماك في البحار إلى مجموعات عديدة. ولهذا، يسمّى العصر الدّيفونيّ "زمن الأسماك". بعض المجموعات مثل القرش والأسماك العظمية لا تزال حتى الآن. ومنها الأسماك العظمية، هناك أسماك ذات زعانف مهمة لأنّها ساعدت على انتشار حياة اليابسة، ومنها الفقاريات القارية. بعض الأسماك الزعنفيّة كان لها خيشوم داخلي مكّنها من تنفس الهواء. وإضافة إلى زعانف هذه الأسماك، فقد ساعدت العضلات على دعم أجسامها "للمشي". الآن، الأسماك ذات الرئة والسيلاكانث هي الأنواع الزعنفية الباقية. أول فقاريّات قارية حقيقية، عدا الأسماك، ظهرت في نهاية الدّيفونيّ. وقد شاركت هذه الفقاريّات العديد من الخصائص مع البرمائيّات في عصرنا. فمثلًا، كان للبرمائيّات بيوض دون غلاف صلب، وكانت تعيش في البيئات الرّطبة فقط (الشكل 14.21).

الشّكل 14.21
هذا الرسم لغابات نهاية الدّيفونيّ، حيث يظهر أحد البرمائيّات *Acanshostega terrapod* يتسلق صخرة ويطير فوقه يعسوب. ازدهر رباعيّ الأرجل في الدّيفونيّ حيث تطور من الأسماك.

العصر الكربوني (The carboniferous period) (290 – 354) مليون سنة خلت

يتضمن العصر الكربونيّ قسمين هما: الميسيسبي والبنسلفاني. خلال هذا الزّمن، بدأ محيط حقب الحياة القديمة في الانغلاق بين جوندوانا وأوراسيا. وخلال العصرين الكربونيّ والبيرميّ، كوّنت هاتان الكتلتان القاريتان قارة واحدة تدعى بنجايا (أي اليابسة كلّها). وقد أدى الالتحام إلى تكوّن سلاسل جبلية ضخمة مثل جبال الأبلاش في أمريكا الشمالية، والجبال الهرسينية والكاليدونية في أوربا، وجبال الأورال في روسيا.

* نظام التدوير يوزع الماء والمصادر الأخرى للنبات ويسمى النّظام المساميّ. ونستخدم مصطلح نظام التدوير للسهولة.

الشّكل 15.21
ساهم المُناخ الدافئ الرطب في ازدهار النباتات والغابات في المستنقعات في العصر الكربوني. لقد كوّنت هذه الغابات معظم ترسّبات الفحم حول العالم.

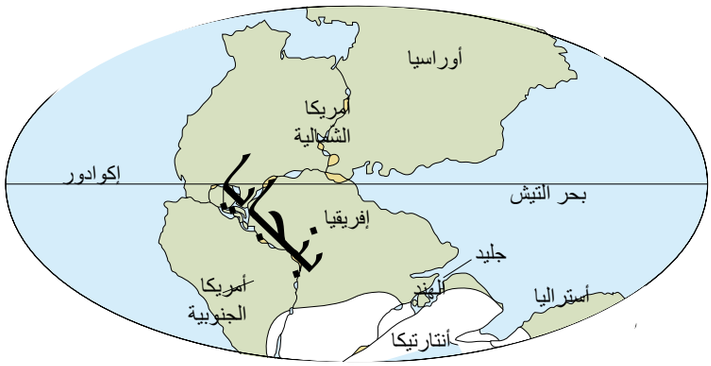
امتدت قارة بنجايا من القطب إلى القطب الآخر مع وجود جزء كبير من جوندوانا عند القطب الجنوبي وطرف أوراسيا عند القطب الشمالي. أدى هذا الامتداد إلى الإسهام في تتابع فترات من العصور الجليدية والفترات الدافئة خلال العصر الكربونيّ. ومع نهاية العصر الكربوني، كان الجزء الجنوبي من جوندوانا مغطًّى بالجليد. وكان معظم قارة أوراسيا عند خط الاستواء، وقد تميز هذا العصر بمُناخ دافئ استوائيّ ساهم في انتشار النباتات والغابات والمستنقعات.

يشير اسم *الكربونيّ* إلى وجود مستنقعات أدت إلى إنتاج رسوبيات فحم واسعة الانتشار ومميزة لهذا الجزء من تاريخ الأرض. وفي الواقع، غطت مستنقعات كثيفة نسبة عالية من أمريكا الشمالية، وأوربا، والصين، وسيبيريا (الشكل 15.21). ومع موت هذه الأشجار والنباتات، استقرت بقاياها في قاع المستنقعات الراكد. ومن ثمّ تحللت لتنتج فحمًا (انظر إلى قسم يسمى اربط مع علم الحياة: الوقود الأحفوري في الفصل 20). معظم الفحم المستخدم حاليًّا مصدره المستنقعات في العصر الكربوني.

لقد شهد العصر الكربونيّ تغيرات كثيرة في الحياة. فتنوعت الحشرات بما فيها الصراصير الضخمة واليعاسيب التي تصل فتحة جناحها إلى 80 سم. و*الأمنيوتات* الأولى، وهي مجموعة فقاريات تشمل الآن الزواحف والثّدييات التي ظهرت في هذا الوقت، وتميزت ببيض ذي قشرة صلبة. وفرت البيضة بيئة متكاملة للجنين. وقد حمت الصدفة الجنين من الجفاف مما سمح للحيوانات بإكمال الانتقال، انتقلت برمائيات الديفوني من بيئة مائية إلى أخرى يابسة. وبسبب بيوض الأمنيوت، لم تكن الزواحف بحاجة إلى وضع بيوضها في الماء كالبرمائيّات.

العصر البيرميّ (the permian period) (290 – 248) مليون سنة خلت

العصر البيرميّ هو نهاية حقب الحياة القديمة. وفيه، كانت القارات كلّها مجتمعة في قارة بنجايا (الشكل 16.21). وكان لتشكّل هذه القارة تبعات عدة. فاستمرار الالتحام القاري الذي بدأ في الكربونيّ أحدث تشوّهات في القشرة أثر في حواف القارات وداخلها* . فجبال روكي على سبيل المثال نشأت من الالتحام الذي كوّن بنجايا. كما أنّ رفع الجبال حجز الرياح الرطبة من الوصول داخل القارات، مما أدى إلى جفاف داخل بنجايا. لذا مع تغير شكل القارة، تغير مُناخ العصر البيرميّ.



الشّكل 16.21
تشكّلت قارة بنجايا مع التحام الكتل القارّيّة.

* تشكّلت جبال روكي الحالية بعد ذلك، وقبل 70 مليون سنة من الآن.

في بداية العصر البيرمي، استمر الجليد بتغطية معظم النصف الجنوبي من الكرة الأرضية، في حين غطت الغابات المستنقعية مناطق الاستواء. في وسط البيرمي (بعد التشكل الكامل لبنجايا)، أصبح المُناخ دافئًا؛ أي، قلّت الجليديات، وأصبحت المناطق داخل القارات جافة. ساعدت القارات على انخفاض مستوى البحار. وعندما انخفض مستوى البحر، أصبح معظم الرّصيف القاريّ من اليابسة. ولأنّ معظم أشكال الحياة توجد في هذه المناطق، فقد بدأت الكائنات بفقدان مواطنها. ومن الممكن أن يكون هذا أحد أسباب انقراض العديد من أشكال الحياة في نهاية العصر البيرميّ.

في نهاية العصر البيرمي، حدث أكبر انقراض للحيوانات في تاريخ الأرض. تأثرت الفقاريّات البحرية أكثر من القاريّة، حيث انقرض 95% من الأنّواع البحرية و70% من القارية. أما سبب الانقراض، فغير معروف جيّدًا. أحد التفاسير يعزو السبب إلى تأثير تشكّل بنجايا؛ فإعادة توزيع القارات والبحار، وتغير كلّ من ارتفاع اليابسة ومناخ الأرض (الحرارة والهطول)، وانخفاض مستوى البحر، كلّ ذلك كان له دور في هذا الانقراض.

قللت القارة الجديدة البيئات البحرية الضحلة جذريًّا. وفي النهاية، تكونت قارة كبيرة واحدة تحوي شواطئ أقلّ من شواطئ عدة قارات صغيرة. فكلّ قارة صغيرة قديمة كانت محاطة بشاطئ. معظم الشواطئ القديمة للقارات الصغيرة المفصولة أصبحت مناطق يابسة في بنجايا، ثم التحمت القارات كلّها وغيرت التبادل المحيطيّ والجويّ الذي ساد قبل الالتحام، والذي أثر بدوره في المُناخ. كما أنّ الزّمن الطويل لانخفاض مستوى البحر 20 – 25 مليون سنة أدى إلى ضغوط أكبر على مواطن الكائنات. كان التأثير أقلّ جذرية في الحياة البرية (اليابسة). وعلى الرغم من تأثر الحياة البرية، إلا أنها استمرت في التطور، وانتشرت بسرعة مع ظهور مواطن قارية جديدة ربما بسبب انخفاض مستوى البحر.

استمر تطور الزّواحف خلال العصر البيرميّ. ويبدو أنها تأقلمت مع البيئة لأنّها سادت الأرض فترة 200 مليون سنة! (بالمقارنة، ساد البشر الأرض مدة 100 ألف سنة). وقد ظهر نوعان من الزّواحف في البيرمي هما: الديابسيد والسينابسيد. وقد تسيّدت السينابسيد التي تتضمن أجداد أقدم الثدييات في العصر البيرمي. أما الديابسيد فقد كانت أقل انتشارًا. ولكنها هي التي ساعدت في انتشار الديناصورات في حقب الحياة المتوسطة أخيرا.

فكّر في الاندماج القاريّ مثل تجعيد قطع كرتون لصندوق حبوب. في البداية يكون للصندوق سطح مستوٍ يأخذ حيّزًا أفقيًّا. إذا ضغطت الأطراف بعضها نحو بعض، فسيقلّ الطول ويزداد الارتفاع. ويصبح الصندوق مطويًّا. وهذا هو ما يحدث عند اندماج القارات؛ تقصر القشرة المنبسطة، وتدفع نحو الأعلى لتكون جبالًا وتطوى. وتمتد الجبال مثل الصندوق أفقيًّا وعموديًّا.

لمعلوماتك

■ سندرس في الفصل التالي تكتونيّة الصّفائح. باختصار، القشرة الخارجية للأرض ليست قشرة واحدة. إنها مقسمة إلى عشرات الصّفائح تتحرك بسبب التدفق الحراريّ من باطن الأرض. خلال تاريخ الأرض، اندمجت الصّفائح معًا، وانفصلت وغيرت ترتيبها. وسندرس الآن كيفية تغير سطح الأرض مع الزّمن وفي الفصل 22 سنطوّر فهم آلية التغير.

■ **نقطة فحص**

1. مع اندماج الكتل القارية، تناقصت الشواطئ والأرصفة القارية بطريقتين. انظر إلى شكل 16.21 واشرح الطريقتين المحتملتين.
2. لماذا أدى التحام القارات في قارة بنجايا إلى زيادة التغير الفصلي الملاحظ؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. بعض الشواطئ القديمة والأرصفة القديمة لم تعد قريبة من المحيطات- أصبحت وسط بنجايا مع اندماج القارات، وانخفض مستوى البحر مما يعني أنّ مناطق بحرية أصبحت يابسة.
2. إنّ قدرة استيعاب الطاقة العالية في الماء لها تأثير متوسط في الحرارة (كما تم شرحه في الفصل 6). الكتلة القارية المندمجة لها منطقة داخلية كبيرة بعيدة عن التأثير المعتدل للماء، مما يزيد التغير الفصلي للحرارة.

6.21 حقب الحياة المتوسطة (the Mesozic era) (248 – 65 مليون سنة خلت)

تم فصل **حقب الحياة المتوسطة** عن حقب الحياة القديمة بسبب التغيرات القوية في الأحافير. فالزّواحف التي قاومت الانقراض في البيرمي تطورت لتصبح هي السائدة في حقب الحياة المتوسطة. تحتوي حقب الحياة المتوسطة على ثلاثة عصور هي: الترياسيّ، والجوراسيّ، والكريتاسيّ. وتعرف مجتمعة بحقب الزّواحف. أهم حدث في هذه الحقب هو تطور الديناصورات. تطورت الثّدييّات من الزّواحف في بداية حقب الحياة المتوسطة، ولكنها كانت صغيرة وغير مهمة مقارنة بالديناصورات.

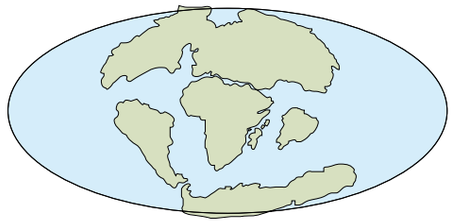
تنوعت النباتات كثيرًا في حقب الحياة المتوسطة. وظهرت الصّنوبريّات والخشب الأحمر. وانتشرت بسرعة على اليابسة. وظهرت النباتات الزهرية في الكريتاسيّ وتنوعت بسرعة بحيث أصبحت النباتات هي السائدة مع نهاية العصر. ثم إنّ ظهور النباتات الزهرية قد سرّع في تطور الحشرات.

إنّ الحدث الجيولوجيّ الرئيس في حقب الحياة المتوسطة هو انقسام بنجايا. وكما تشكلت قارة بنجايا في مراحل متعددة خلال حقب الحياة القديمة، انقسمت في مراحل متعددة خلال حقب الحياة المتوسطة والحديثة (الشكل 17.21). المرحلة الأولى، خلال الترياسيّ والجوراسيّ (قبل 200 مليون سنة خلت)، بدأت بنجايا تنقسم إلى قارتيها القديمتين: جوندوانا في الجنوب وأوراسيا في الشمال. وكان الانقسام استجابة لتكوّن *منطقة انهدام* (مجموعة شقوق مرتبطة بتباعد صفائح) والتي تطورت بين أمريكا الشمالية وإفريقيا الحالية. انبثقت لابة بازلتية لتشكل قشرة جديدة ساعدت على فصل الكتل القارية المتباعدة.* هذه القشرة المحيطة التي هي أكبر كثافة من القشرة الجرانيتية، تكونت على ارتفاعات أقلّ. وكانت بداية تشكل حوض وسط الأطلسي. ومع انتشار منطقة الانهدام، انفصلت أوربا عن شمال إفريقيا. وبهذه الطريقة انفصلت أوراسيا كلّيّة عن جوندوانا. وساد الانهدام خلال هذه الفترة داخل جوندوانا أيضًا. فمثلًا، انفصلت إفريقيا عن القطب الجنوبي ومدغشقر مع تشكّل انهدام بركانيّ في حوض محيط غرب الهند.

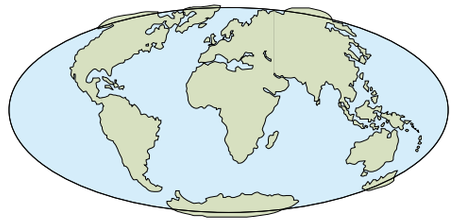
تذكر بناء الجبال الذي نتج عن تشكل بنجايا. ومع تشظّي بنجايا، بدأت جبال بالتشكل على الشاطئ الغربي لأمريكا الشمالية بسبب تصادم الجانب الشرقي من قشرة المحيط الهادي مع الجانب الغربي من قشرة أمريكا الشمالية القارية. وقد سبب اختلاف كثافة الصخور في حصول نوع من التصادم يختلف عن التصادم "القاري- القاري". هو التصادم الذي يحدث بين القارات. وبدلًا من ارتفاع القشرة في التصادم القاري- القاري، فإنّه عندما تصطدم قشرة محيطية مع أخرى قارية، فإنّ القشرة المحيطية الأعلى كثافة تغوص تحت القشرة القارية الأقلّ كثافة. يكوّن هذا *الغوص أو الطرح* للقشرة المحيطية تشوهًا واسعًا، وبراكين، وبناء جبال على طول الشاطئ الغربي من ألاسكا إلى تشيلي.

أما المرحلة الثانية من انقسام بنجايا فقد كانت في بداية الكريتاسيّ قبل 140 مليون سنة تقريبًا مع استمرار انقسام جوندوانا. أدى انفصال أمريكا الجنوبية عن إفريقيا إلى فتح حوض المحيط الأطلسي الجنوبي، وابتعدت الهند / مدغشقر عن استراليا/ القطب الجنوبي مشكّلة انفتاح حوض شرق المحيط الهندي. في حين أنّ أوربا وآسيا فقط بقيتا متصلتين من حقب الحياة القديمة.

قبل 200 مليون سنة
حقب الحياة المتوسطة



قبل 65 مليون سنة
حقب الحياة الحديثة



الآن

الشكل 17.21
مراحل انقسام بنجايا

لمعلوماتك

- تعود بدايات جبال الأنديز وجبال السيرانيفادا، إلى النشاط البركاني العظيم في حوض شرق المحيط الهادي خلال حقب الحياة المتوسطة.

* تسمى العمليةُ توسّعَ *قاع المحيط*. من المهم معرفة أنّ القشرة لا تكبر عند تكوّن قشرة جديدة؛ فعند تشكّل قشرة في مكان ما، فإنّ قشرة أخرى في مكان آخر تُستهلك. يسمى استهلاك القشرة *طرحًا*. وتسمى المنطقة *نطاق طرح*. وسندرس هذا بالتفصيل في الفصل 22.

إنّ لانفصال الكتلة القارية تبعات عالمية عديدة؛ حيث ازدادت الشواطئ مرة أخرى، مما زاد الموطن البحري الضحل. فتغيرت الحياة القارية؛ الحيوانية والنباتية. وانفصلت المواطن بعد أن كانت متصلة، كما انفصل أعضاء من النوع نفسه. وفي المواطن غير المتصلة، فإنّ الكائنات ذات الأصول المشتركة أو التي بينها بدأت في الانشقاق بعضها عن بعض، أي أنها أصبحت غير متشابهة. وبهذه الطريقة تطورت أنواع جديدة بناء على مواطنها الجديدة.

ولما كانت معظم الكتل القارية لا تتركز عند خط الاستواء فقد تغيرت أنظمة المناخ الجوي وتبادل مياه المحيطات. فاتجهت مياه دافئة من الاستواء نحو الشمال، وأدت إلى تسخين الكتلة القارية الشمالية. لقد تغير المُناخ من حار جدًّا ورطب خلال الترياسيّ إلى درجات حرارة باردة وفصول في الكريتاسيّ. وبشكل عام، فإنّ مناخ حقب الحياة المتوسطة كان أكثر دفئًا من الوضع الحالي. وقد أدى نشاط الانهدام الذي بدأ بتشظّي بنجايا إلى ارتفاع عام في سطح البحر، وغطّت القاراتِ بحارٌ ضحلة، وأصبحت الظروف لطيفة.

لمعلوماتك

- تتشكل قشرة محيطية جديدة في مناطق الانهدام مع توسع قاع المحيط وارتفاع لابة بازلتية من باطن الأرض. عندما يكون التوسع بطيئًا، تكون قيعان المحيطات باردة وذات كثافة عالية، فتكون أعمق. لذا تكون الأحواض البحرية عميقة. وعندما يكون التوسع سريعًا، فإنّ قاع المحيط يكون أسخن وأقل كثافة. ومن ثم تكون القشرة مرتفعة، وأحواض المحيط ضحلة. وعندما تكون أحواض المحيط مرتفعة، يتدفق ماء البحر فوق المناطق المنخفضة من القارة. وبهذه الطريقة، تُغْمر بالبحار الضحلة.

انقراض الكريتاسيّ (The cretaceous Extinction)

في نهاية العصر الكريتاسيّ قبل 65 مليون سنة، حدث انقراض آخر قضى على أكثر من 60%من أنواع الأرض. فقد أبيد العديد من الديناصورات، والزواحف الطائرة، والزواحف البحرية من البحار واليابسة مع كائنات أخرى.

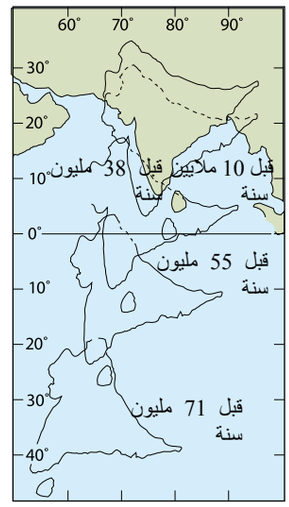
وكان سبب هذا الانقراض الكبير مصدر جدل بين العلماء. أكثر التفسيرات الشائعة هو فرضية لويس وولتر جونزالس (1980)، التي عزت سبب الانقراض إلى ارتطام نيزك كبير. وقد جاء دعم هذه الفرضية من وجود عنصر الإيريديوم في الرسوبيات الفاصلة بين عصري الكريتاسي والثلاثي المسمى (حد *TK*). تركيز الإيريديوم في نيزك يساوي تركيز الإيريديوم في كامل الكرة الأرضية. إلا أنّ معظم الإيريديوم موجود في أعماق الأرض، لا على سطحها. لذا فإنّ تركيز الإيريديوم في النيزك أكبر منه في القشرة الأرضية. وفي أنحاء العالم كلّه، فإنّ تركيز الإيريديوم في حد TK أكبر منه في الرسوبيات التي تعلوه والتي هي أسفل منه. وهذا يدعم بقوة أنّ الإيريديوم انتشر في العالم بسبب ارتطام. ترسبت طبقة (TK) قبل 65 مليون سنة، وهو وقت الانقراض الكبير.

افترض فريق ولتر أنّ نيزكًا كبيرًا ضرب الأرض بقوة أدت إلى تكون غيوم ضخمة تحجب أشعة الشّمس مكونة من الغبار. استمرت غيوم الغبار أشهرًا أو أكثر. أدت الغيوم إلى وقف البناء الضوئي، وقللت الغذاء فجأة، وبردت الأرض أيضًا. وفي النهاية ومع هبوط الغبار، فإنّ طبقة الرسوبيات الغنية بالإيريديوم ترسبت. ومن العوامل الأخرى المصاحبة لارتطام النيزك تكون المطر الحمضي، التسونامي، وحرائق الغابات. تعدّ فوهة تشيكولوب الموجودة بجانب شواطئ يوكاتان في المكسيك الموقع المفترض للارتطام (شكل 18.21). الفوهة كبيرة (180 كم قطريًّا) وعمرها قريب من العصر الكريتاسي.

ومع ذلك، هناك فرضية بديلة لفرضية ولتر تقول إنّ طبقة الإيريديوم نشأت عن ثوران بركاني ضخم. وقد يكون الغبار والفتات المنبعث من هذه الثورانات قد حجب ضوء الشّمس . أما الفرضية الثالثة فتشير إلى أنّ الثوران البركاني الواسع قد نتج عن ارتطام جسم خارجي بالأرض. ومهما كان السبب فإنّ الانقراض علامة مثيرة لنهاية حقب الحياة المتوسطة.

الشّكل 18.21

رسم لفوهة يوكاتان في المكسيك بعد تشكلها مباشرة. قطر الفوهة 180 كم. قد يكون الارتطام الذي سبب الفوهة هو الذي أدى إلى حادثة الفناء الجماعي التي أنهت عهد الديناصورات قبل 65 مليون سنة في نهاية الكريتاسيّ.



الشّكل 19.21

تشكّل جبال الهملايا كان نتيجة تصادم الهند مع آسيا. ولأنّ هذا التصادم كان قاريًّا – قاريًّا، فإنّ للهملايا سُمك قشرة قارية غير اعتيادية.

■ **نقطة فحص**

1. هل يمكن أن يكون انقسام بنجايا سببًا للانقراض في نهاية الكريتاسيّ؟
2. من حيث عدد الأنّواع التي دُمّرت، أيّ العصرين كان فيه أعظم انقراض: البيرميّ أم الكريتاسيّ؟

هل كانت هذه إجابتك؟

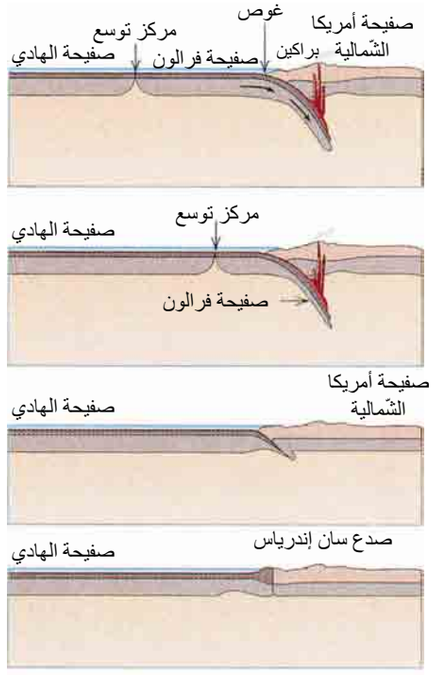
1. لا شكّ أنّ إعادة تشكيل الكتل القارية عندما انقسمت بنجايا أضاف ضغطًا على العديد من أماكن الحياة. فتغير المناخ، وتغيرت المواطن البحرية الضحلة، وأصبحت الأنّواع منفصلة ومتباعدًا بعضها عن بعض. كما أدت الكتل القارية المتحركة إلى بدء نشاطات بركانية واسعة. ولكن انقسام بنجايا لا يمكن أن يفسر تركيز الإيريديوم العالي على الحد الكريتاسي-الثلاثي (K-T boundary).
2. إن أكبر انقراض كان في العصر البيرمي؛ حيث انقرض 95% من الأنّواع البحرية، و70% من الأنّواع القارية. كما أنّ انقراض الكريتاسي أدى إلى اختفاء 60% من أنواع الأرض.

7.21 حقبة الحياة الحديثة (The Cenozoic Era) (65 مليون سنة خلت حتى الآن)

تسمى **حقبة الحياة الحديثة** "عصر الثّدييات"، وتقسم إلى عصرين هما: الثلاثي والرباعي. يقسم العصران من الأقدم إلى الأحدث إلى: باليوسين، أيوسين، أوليمبوسين، ميوسين، وبليوسين (فترات العصر الثلاثي). وبليستوسين وهولوسين (فترات العصر الرباعي). وأما نحن، فنعيش في فترة الهولوسين.

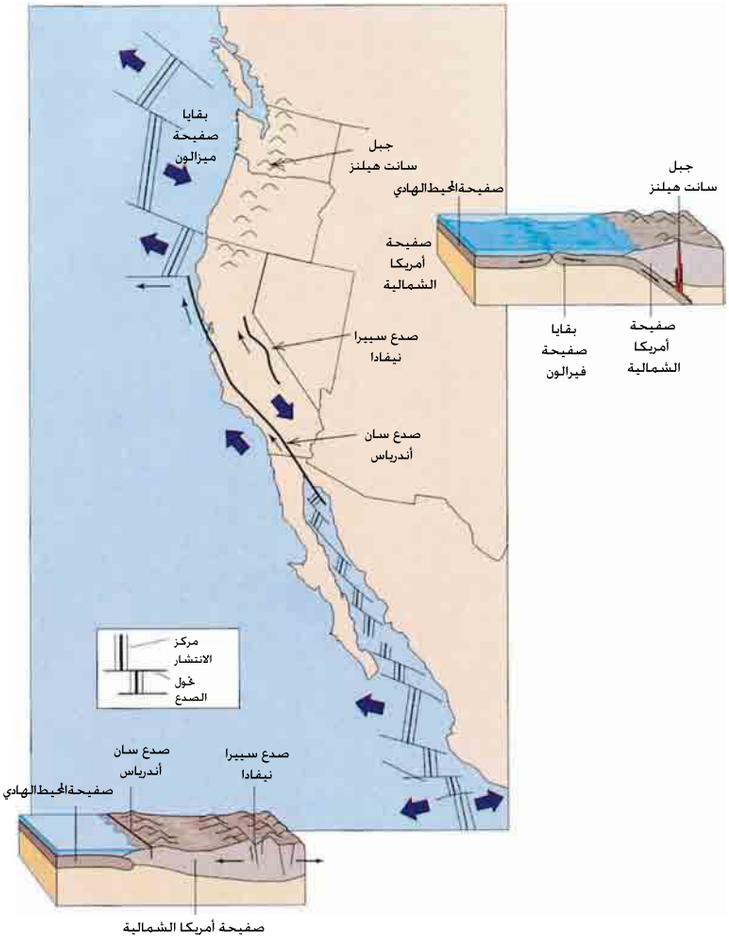
أما ثالث وآخر مرحلة من انقسام بنجايا فحدثت خلال حقب الحياة الحديثة. انفصلت أمريكا الشّمالية وجرينلند عن أوربا، كما انفصل القطب الجنوبي عن أستراليا. كان سطح الأرض نشيطًا وتصادمات الكتل القارية كثيرة. وقد حدث نشاط بناء جبال عندما تصادمت صفيحة الجزيرة العربية – إقريقيا مع صفيحة أوربا وأنتجت جبال الألب. كما تصادمت الهند مع آسيا مكوّنة جبال الهملايا. وكما هو موضح في الشّكل 19.21، تحركت الهند نحو آسيا بسرعة 15 – 20 سم /سنة. وهو رقم قياسي لحركة تكتونية! ومع دفع الهند نفسها تحت آسيا، فقد أدت إلى إنشاء تراكم سميك من كتلة قارية غير اعتيادي. هذه الكتلة القارية التي رست فوق كتلة قارية أخرى أعطت جبال الهملايا ارتفاعًا أكبر.

إنّ التصادم في نهاية حقب الحياة المتوسطة الذي أدى إلى بدء تكون جبال السيرانيفادا والأنديز استمر (ويستمر) في حقب الحياة الحديثة. تكوّن نطاق توسع لقاع المحيط - ظهر وسط محيط – في المحيط الهادي، بعيدًا عن الشاطئ الغربي لأمريكا الشمالية. وقد أدى هذا التوسع إلى فصل صفيحتين محيطيتين هما الهادي في الغرب وفرالون في الشرق (الشكل 20.21). ومع تحرك صفيحة فرالون نحو الشرق (لتغوص تحت الكتلة القارية لأمريكا الشمالية)، بدأ المحيط يقترب من حافة أمريكا الشمالية القارية. وقد أدّى ذلك إلى إعادة تنشيط بناء الجبال في الغرب. وكذلك إلى تشوهات واسعة الانتشار. أدى تصادم ظهر المحيط المتوسع الذي كان يسمى سابقًا نظام مرتفع المحيط الهادي مع قارة أمريكا الشمالية المتحركة غربًا قبل 30 مليون سنة إلى ولادة صدع سان أندرياس (الشكل 21.21). ومع الزّمن، ومع نمو الصدع، تحركت باجا كاليفورنيا بعيدًا عن المكسيك ونشأ خليج كاليفورنيا.



الشّكل 20.21

تتابع غوص صفيحة فرالون تحت صفيحة أمريكا الشمالية. ومع تقارب مركز التوسع والحافة القارية بدأ تشكل صدع سان أندرياس بين المحيط الهادي وصفيحة أمريكا الشمالية.



الشّكل 21.21

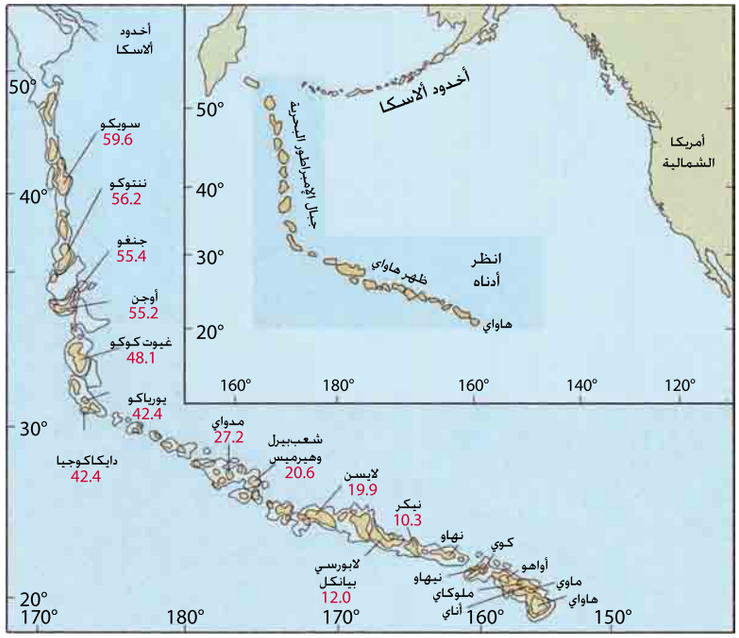
صدع سان أندرياس ناتج عن حركة بين صفيحة أمريكا الشمالية ونظام مرتفع المحيط الهادي. ومع امتداد الصدع طوليًّا، فإنّ منطقة باجا كاليفورنيا انفصلت عن أرض المكسيك.

ولأنّ هذه الصّفائح لا تزال تتحرك، فإنّ غرب كاليفورنيا وباجا كاليفورنيا سوف تصبح منفصلة كليًّا عن القارة الرئيسة، أو سوف يندمجان مع غرب كندا.

توفر جزيرة هاواي / وسلسلة جبال الإمبراطور البحرية (الشكل 22.21) دليلًا إضافيًّا على التشوه في حقب الحياة الحديثة: تغير اتجاه صفيحة الهادي. نتج الانحناء في سلسلة الجزر بين 30 – 40 مليون سنة خلت (وسط الثلاثي) عندما تغير اتجاه حركة الصفيحة من شمال إلى شمال غرب. وقد حدث التغير تقريبًا في بدايات العصر الثلاثي في وقت تصادم شمال المكسيك نفسه (صفيحة أمريكا الشمالية) مع نظام مرتفع الهادي.

برد المناخ في أثناء معظم حقب الحياة الحديثة، مما أدى إلى تكون جليديات بشكل واسع، وهو ما ميّز البليستوسين. ومع أنّ هذا العصر الجليدي مستمر حتى اليوم، فقد حدث العديد من التعاقبات بين ظروف جليدية وظروف بين جليدية؛ ففي أثناء قمة الجليد، كان الجليد يغطي ثلث سطح الأرض. وعلى اليابسة، فإنّ سموكًا عظيمة من الجليد أدت إلى تكوّن جليديات قارية. وقد أدى الوزن الهائل للجليد إلى خفض الأرض، وحوّل اتجاه العديد من الأنّهار والجداول. قامت الجليديات بحت وخدش اليابسة في أماكن وترسيب كميات كبيرة من رسوبيات *"المورينز"* تاركة دليلًا على انتشار الجليد وامتداده.

* المورينز رسوبيات تنشأ عن الجليد. تدل المورينز على حدوث الجليد بعد انصهاره. وسيناقش هذا الموضوع في الفصل 23.



الشّكل 22.21

جزيرة هاواي/سلسلة جزر الإمبراكور البحرية. يشير الانحناء في السلسلة إلى تغير اتجاه صفيحة الهادي والذي هو سبب تصادم شمال المكسيك مع مرتفع الهادي. الأرقام الحمراء تشير إلى العمر (بملايين السنين) للجزيرة والقمة.

الحياة في حقب الحياة الحديثة

بعد الانقراض الذي حدث في نهاية حقب الحياة المتوسطة. بقيت العديد من المواطن البيئية فارغة. وقد أدى ذلك إلى التطور السريع للثدييات. فتكيَّف الخفاش وهو من الثدييات القارية. كما تطوّرت ثدييّات بحرية كالحيتان والدلافين لتستوطن الأماكن الفارغة بسبب انقراض الزواحف في حقب الحياة المتوسطة. لاحقًا في حقب الحياة الحديثة. انخفضت درجات الحرارة. وأعقبها العصر الجليدي. وقد كان للحرارة المنخفضة أثر في الحياة. الماموث. والكركدن. والأيل. وثور المسك كلها طورت غطاء صوفيًّا دافئًا لحمايتها من البرد القارس.

تطور البشر في العصر الرباعي خلال فترة البليستوسين. وأدى تكون الجليديات إلى انخفاض مستوى البحر مع حصر الماء على صورة جليد. كما أنّ توزع اليابسة كان كتوزعها حاليًّا. وقد أدى انخفاض مستوى البحر إلى "جسور قارية" تربط بين الكتل القارية والتي هي مفصولة الآن بالماء. وجد أحد الجسور القارية على طول ما يُعرف الآن بمضيق بيرنج. وأدى إلى هجرة البشر من آسيا إلى أمريكا الشمالية. وقد تواءم انتشار البشر. ليس فقط في أمريكا الشمالية. بل حول العالم أيضًا. مع عصر انقراض ساد خلال فترة البليستوسين. أثر الانقراض في الثّدييّات القارية الضخمة. أما الثّدييّات البحرية فلم تتأثر. انقرضت العديد من الثّدييّات الضّخمة في أمريكا الشّمالية بعد وصول البشر. كما أنّ انقراض الثّدييّات في إقريقيا مرتبط بظهور صائدي العصر الحجري.

يعدّ انقراض البليستوسين مسألة خلافية . فاختلاف الظروف المناخية القاسية قد يكون مسؤولًا جزئيًّا عن الانقراض. ومع أنّ الجليديّات غطت بعض المساحات الواسعة. فقد كان المُناخ في العديد من المناطق لطيفًا. وقد أدى ذلك إلى قناعة العلماء أنّ المناخ القاسي قام بدور بسيط في انقراض البليستوسين. وأنّ البشر قاموا باصطياد الثّدييّات الضخمة وأكلها. مما أدى إلى انقراضها. إلا أنّ هذا الخلاف لم يتم حسمه بعد؛ فالبعض يقول إنه ليس من الواضح وجود أعداد كبيرة من *الهوموساپينز* (البشر الحاليين) آنذاك. أو أنّ لديهم معرفة تقنية في كيفية قتل الأنواع جميعها.

تبعت فترة البليستوسين فترة الهولوسين. لمعرفة بيئة الهولوسين فقط: انظر حولك. إنها أحدث 10000 سنة من عمر الأرض.

ما كان للثدييات الكبرى أن تتكيّف لو لم تَفْنَ الديناصورات، وستكون مثل هذه الثدييات وجبة لذيذة للديناصورات الكبيرة الآكلة اللحوم.

اربط مع الدِّيناميكا الحرارية العالمية

■ هل الجو بارد في الخارج؟

نعم، نسبيًّا. خلال 90% من تاريخ الأرض من وجود جليديات بحجم قارات في أيّ مكان. وبسبب وجود هذه الجليديات الآن وخصوصًا فوق الأقطاب وجرينلاند، فإنّنا حاليًّا، في عصر جليدي. ولأنّ هذه الجليديات التي بمقياس قاري محصورة في الأقطاب، فإنّنا في فترة *بين جليدية* من عصر جليدي.

سادت العصور الجليدية خمس مرات في تاريخ الأرض؛ فالعصر الأول ساد قبل ملياري سنة. وبدأ آخر قبل 840 مليون سنة واستمر 200 مليون سنة. ثم كان هناك عصران جليديان في حقب الحياة القديمة، ولم يكن هناك في حقب الحياة المتوسطة أيّ منها. لم يكن هناك عصر جليدي في أول 50 مليون سنة من حقب الحياة الحديثة. بدأ العصر الجليدي الحالي قبل 8 – 10 ملايين سنة، ولكن وجود الجليد بكثرة هو الذي ميز فترة البليستوسين؛ فقد بدأ قبل مليون سنة. فما الذي سبب العصور الجليدية؟

من المؤكد أنه لا يوجد سبب واحد، ولكن العلماء أكدوا أنّ تبريدًا عالميًّا قاد إلى تكوّن العصور الجليدية يعزى إلى اتحاد ثلاثة أسباب هي:

(1) ترتيب القارات حول العالم.
(2) كمية الإشعاع الشّمسي الذي تم عكسه إلى الفضاء.
(3) هندسة دوران الأرض حول محورها وحول الشّمس.

يؤثر ترتيب القارات في التيارات البحرية والهوائية، وهي الآلية الرئيسة في توزيع الطاقة الحرارية حول العالم. ويؤدي تجمع القارات في موقع واحد إلى تسخينها؛ لأنّ تيارات الاستواء تسير دون إعاقة كبيرة نحو الأقطاب. ولكن عندما تكون القارات موزعة حول العالم كما هي اليوم فإنّ خلايا التدوير تكون صغيرة، لذا فإنّ توزيع الحرارة أقلّ تأثيرًا.

عندما ينخفض مستوى البحر، تتكشف كمية أكبر من اليابسة، مما يؤدي إلى زيادة كمية ضوء الشّمس المنعكسة إلى الفضاء. وتؤدي هذه الظاهرة إلى انخفاض حرارة الأرض. ثم إنّ وجود الغيوم و/ أو الغبار يؤثر أيضًا في انعكاس الشّمس ويقلل امتصاص الأشعة الشّمسية.

يشير تأثير ميلانكوفيتش إلى مجموعة عوامل تؤثر في توزيع الأشعة الشّمسية فوق سطح الأرض من خلال:

(1) تغير زاوية ميل محور دوران الأرض حول نفسها (حاليًا 23.5°)
(2) ترنح محور دوران الأرض حول نفسها.
(3) تغير إهليلجية مدار الأرض حول الشّمس.

يؤدي اجتماع مجموعة من هذه العوامل التي تحدث بشكل دوري إلى التقليل من الإشعاع الشّمسي على خطوط العرض الشمالية العالية في الصيف. فإذا كان الانخفاض في الأشعة كافيًا، فلن ينصهر الجليد المتكون في الشتاء السابق، وإذا استمر ذلك سنوات كثيرة، فإنّ الجليديات تتشكل بمقياس قاريّ.

قد تكون طبيعة التغير المنتظم لدورات ميلانكوفيتش السبب الرئيس للدورات الجليدية. وبحسب هذه الفرضية، فإنّ السببين الأوليين؛ أي ترتيب القارات وكمية الأشعة المنعكسة- يؤديان إلى تبريد الأرض، في حين يؤدي السبب الثالث؛ أي تأثير ميلانكوفيتش إلى تعاقب العصور الجليدية وبين الجليدية.

كان هناك بعض التغيرات المناخية. فمثلا "حدث العصر الجليدي الصغير" بين 1200 – 1700 بعد الميلاد. ولكن عمومًا، فقد كانت فترة الهولوسين دافئة.

يسمى الهولوسين أحيانا "عصر البشر". وهذا الادعاء ليس دقيقًا؛ لأنّ *الهوموسابينز* تطور وساد العديد من الأماكن من العالم قبل بداية الهولوسين. أما الهولوسين فهي الفترة التي وجد فيها سجل تاريخ البشرية بما فيه سيادة الحضارات وإبادتها. وقد كان للبشرية تأثير كبير في بيئة الهولوسين ولكن بدرجة بسيطة، كما يحدث الآن.

■ 8.21 تاريخ الأرض في كبسولة

إن لأرضنا تاريخًا طويلًا ومثيرًا – 4.5 مليارات سنة. ولكشف هذا التاريخ؛ ننظر إلى السّجل الصّخريّ. كلّ حدث في تاريخ الأرض تم تسجيله في الطّبقات الصّخريّة. وقد تم حلّ ترتيب الأحداث من خلال التأريخ النسبيّ، كما أنّ العمر المطلق عُرِف من التأريخ الإشعاعيّ. في حين يوفر سلم الزّمن الجيولوجيّ قائمة زمنية للفترات الزّمنية جميعها بحسب السّجل الأحفوري. وعندما حدثت تغيرات جوهرية في الحياة، بدأت حقبة أو عصر جديد. مع الأخذ في الحسبان الاعتقاد بأنّ الإنسان لم يتطور، وإنما خلقه الله تعالى وأنزله إلى الأرض.

القوة الجيولوجيّة البشرية

مع أنّ "عصر البشرية" ساد لفترة بسيطة 0.002% من الزّمن الجيولوجيّ، إلا أننا أكثر الكائنات ذكاء على كوكب الأرض. أشكال الحياة كلّها تغير بيئتها. ولكن الإنسان يغير أكثر من إدارة البيئة من حوله لمواءمة احتياجاته. وكدليل على هذه المواءمة، علينا النظر إلى نظام الرّيّ في بلاد ما بين النهرين، والزراعة في حوض النيل، وعملية الحراثة في السهول الكبيرة، واختراع الآلات لاستثمار الأرض، والسدود والأقفال على أنهار الميسيسيبي والميسوري، وكولورادو التي تمثل الدور الجيولوجيّ البشري في التغيير. ولكن، هل ستؤدي الأنشطة البشرية التي تؤثر عكسيًّا في دعم نظامنا الحيوي مثل حرق الوقود الأحفوري على نطاق كبير، وتدمير طبقة الأوزون، والقضاء على غابات الأمازون المطرية، والتسبب في الاحترار العالمي، هل سيؤدي هذا كلّه إلى عصر انقراض جديد؟ وربما انقراضنا أيضًا. من يدري! ولأنّ لدينا القدرة على التأثير في التغير الجيولوجيّ، فعلينا الاعتناء ببيتنا الأرضي؛ لأنّه البيت الوحيد الذي نملكه.

خلال الزّمن الجيولوجيّ، تغيرت الحياة وأشكالها، كما تغيّر المناخ أيضًا. إلى جانب أنّ التغير في منطقة ما أثر في تغيّر منطقة أخرى. وكلّ تغير حدث مسجل في الصخور.

وكما ذكر سابقًا، فإنّ علماء الأرض مثل متحري الجرائم؛ فمشهد الجريمة هي الأرض، أما السّجل الصّخريّ، فيوفر دلائل لمعرفة الحدث وزمنه. والآن، فإنّنا بحاجة إلى النظر عميقًا لتكوين فهم في أسباب حدوث بعض هذه الحركات الأرضية التي تقودنا إلى موضوع الفصل التالي – تكتونية الصّفائح. لقد تعلمنا كيف تغير سطح الأرض مع الزّمن، ونحتاج الآن إلى فهم الآلية وراء هذه التغيرات. إن تكتونية الصّفائح تربطها جميعًا؛ الأرض لعبة تركيب كبيرة، وسنفهم الصورة بعد تركيب قطعة تلو أخرى.

ملخّص المصطلحات

التأريخ النسبي Relative dating: ترتيب تتابع الصخور بحسب عمرها النسبي.

التّرسيب الأفقيّ Original horizontality: مبدأ تأريخ نسبي ينصّ على أنّ الطّبقات الرسوبية تترسب أفقيًّا، وكلّ طبقة تترسب فوق الأقدم منها.

التعاقب الطبقي Superposition: مبدأ تأريخ نسبيّ ينصّ على أنه في تعاقب لم يتعرض للتشويه من الصخور الرسوبية، فإنّ كلّ طبقة ستكون أقدم من التي تعلوها وأحدث من التي أسفلها.

مبدأ القاطع والمقطوع Cross-cutting relationships: مبدأ تأريخ نسبيّ ينصّ على أنه إذا قطع جسم ناري أو صدع صخورًا أخرى فإنّ الجسم الناري أو الصدع أحدث من المقطوع.

الاحتواء Inclusions: مبدأ تأريخ نسبيّ ينصّ على أنّ أيّ احتواء (قطع من صخر محتواة في صخر آخر) يعدّ أقدم من الصخر الحاوي له.

الاستمرارية الجانبية Lateral continuity: مبدأ تأريخ نسبيّ ينصّ على أنّ الطّبقات الرسوبية تترسب في الاتجاهات جميعها وعلى مساحات واسعة حتى يعترضها عائق أو حاجز.

التعاقب الحيوي Faunal succession: مبدأ تأريخ نسبيّ ينصّ على أنّ كائنات الأحافير تعاقبت الواحدة تلو الأخرى بترتيب محدد غير منعكس.

عدم توافق Unconformity: انقطاع أو فجوة في السّجل الجيولوجيّ بسبب تعرية الصخور الموجودة أو انقطاع في التّرسيب.

عدم توافق زاويّ Angular unconformity: عدم توافق بحيث إنّ طبقات قديمة مطوية أو مائلة تعلوها طبقات أفقية حديثة.

تأريخ إشعاعيّ Radiometric dating: طريقة لحساب عمر المواد الجيولوجيّة اعتمادًا على التحلل النووي للنظائر المشعة الموجودة طبيعيًّا.

زمن ما قبل الكامبريّ Precambrian time: زمن الحياة الخفية الذي يبدأ قبل 4.5 مليار سنة عندما تشكلت الأرض واستمر حتى قبل 543 مليون سنة (بداية حقب الحياة القديمة) ويشكل تقريبًا 90% من تاريخ الأرض.

حقب الحياة القديمة Paleozoic era: زمن الحياة القديمة من 543 مليون سنة وحتى 245 مليون سنة خلت.

بنجايا Pangaea: القارة التي تشكلت في نهاية حقب الحياة القديمة مكونة من جوندوانا (أمريكا الجنوبية وإفريقيا وأستراليا والهند وأنتاركتكا) وأوراسيا (أمريكا الشمالية وأوربا وسيبريا/آسيا).

حقب الحياة المتوسطة Mesozoic era: زمن الحياة المتوسطة 65 – 245 مليون سنة خلت

حقب الحياة الحديثة Cenozoic era: زمن الحياة الحديثة منذ 65 مليون سنة وحتى الآن.

أسئلة مراجعة

1.21 السّجل الصّخريّ – التأريخ النسبيّ

1. ما التأريخ النسبيّ؟
2. ما المبادئ الستة المستخدمة في التأريخ النسبيّ؟ صف كلّ واحد منها.
3. وجد قاطع جرانيتي يقطع طبقة حجر رملي. ماذا يمكن أن يقال عن العمر النسبي للقاطع والحجر الرملي؟ ما المبدأ المستخدم هنا؟
4. لماذا لا تُظهر التكوينات الصّخريّة كلها تتابعًا مستمرًا من بداية الزّمن إلى الآن؟
5. كيف تستخدم الأحافير في معرفة الزّمن الجيولوجيّ؟
6. في تتابع طبقات رسوبية، تكون الطبقة الأقدم في الأسفل والأحدث في الأعلى. ما المبدأ المستخدم هنا؟
7. اشرح كيف توجد أحافير أسماك وحيوانات بحرية على ارتفاعات عالية مثل الهملايا.

2.21 التأريخ الإشعاعيّ

8. ما معنى عمر النصف الإشعاعيّ؟
9. ما عمر النصف لكلّ من: اليورانيوم -238، والبوتاسيوم -40، والكربون -14؟
10. ما النظير المستخدم في تحديد أعمار الصخور القديمة جدًّا؟
11. ما النظير المستخدم لتحديد أعمار الرسوبيات أو المواد العضوية من البليستوسين؟

3.21 الزّمن الجيولوجيّ

12. ما الفترة الزّمنية الأكبر في وحدات الزّمن الجيولوجيّ؟
13. ما عمر الأرض؟

4.21 زمن ما قبل الكامبري

14. ما التطورات الرئيسة للحياة التي حدثت فيما قبل الكامبري؟
15. ما الدليل الذي لدينا عن الحياة فيما قبل الكامبري؟

5.21 حقبة الحياة القديمة

16. حدثت عدة تذبذبات في مستوى سطح البحر في حقب الحياة القديمة. ما أثر ذلك في أشكال الحياة؟
17. اذكر أسماء عصور حقب الحياة القديمة.
18. ما شكل الحياة التي يشتهر بها العصر السيلوري؟
19. يعرف العصر الديفوني بأنه زمن الأسماك. ما بعض أشكال الحياة في هذا العصر؟
20. لماذا يعدّ تطور منخر داخلي في الأسماك الجنحة خطوة مهمة في تطور الحياة على الأرض؟
21. لماذا يرى العديد من الجيولوجيّين أنّ الأسماك الجنحة مهمة؟
22. في أيّ عصر ترسبت معظم رسوبيات الفحم؟ لماذا كان هذا العصر فريدًا؟
23. في أيّ منطقة من أمريكا نجد رسوبيات غنية بالفحم؟
24. ما المجموعة التي تطورت من البرمائيات مع وصول بيوض الأمنيوت؟

6.21 حقب الحياة المتوسطة

25. ما الاسم الذي يطلق على حقب الحياة المتوسطة؟
26. ما السبب المفترض وراء انقراض الكريتاسي الذي أفنى الديناصورات؟
27. ما أثر انقسام بنجايا في مستوى البحر؟
28. كيف يرتبط عنصر الإيريديوم مع زمن انقراض الديناصورات؟

7.21 حقب الحياة الحديثة

29. ما الفترات التي يتكون منها العصران: الثلاثي والرباعي؟
30. ما أهم أشكال الحياة التي تطورت في حقب الحياة الحديثة؟

تمارين

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

1. ● افترض أنك شاهدت تتابعًا من طبقات رسوبية يعلوها تدفق بازلتي. يوجد صدع يكسر الصخور الرسوبية ولكنه لا يكسر البازلت. ما عمر الصدع نسبة إلى عمر الصّخرين؟
2. ● إذا احتوى صخر رسوبي على قطع صخور متحولة، فأيّ الصّخرين أقدم؟ برهن إجابتك.
3. ♦ ما عمر أقدم صخور الأرض؟ ما عمر أقدم صخور القمر؟
4. ♦ ما النظير الأفضل لتقدير أعمار صخور من الأزمنة التالية: (أ) زمن ما قبل الكامبري؟ (ب) حقب الحياة المتوسطة (ج) فترة البليستوين.
5. ■ هل زادت كمية اليورانيوم على الأرض مع الزّمن؟ هل زادت كمية الرصاص على الأرض مع الزّمن؟
6. ♦ حصاة غرانيتية في صخر رسوبي لها عمر إشعاعيّ 300 مليون سنة. ماذا يمكن أن تقول عن عمر الصخر الرسوبيّ؟ في منطقة قريبة، يوجد قاطع ناري عمره الإشعاعيّ 200 مليون سنة قطع الصخور الرسوبية نفسها. ماذا تقول عن عمر الصخر الرسوبي؟
7. ● قبل اكتشاف التأريخ الإشعاعيّ، كيف كان الجيولوجيّون يقدرون عمر الطّبقات الصّخرية؟
8. ■ في تحديد عمر المعدن، ما معنى إعادة بدء الساعة الزّمنية في المعدن؟

9. ♦ إذا قسمت عددًا على اثنين، ثم قسمت الناتج على اثنين، وهكذا إلى ما لا نهاية، فلن يكون الناتج صفرًا. لماذا إذن يكون التأريخ بالكربون مفيدًا فقط للمواد التي ليست أقدم من 50000 سنة؟ (مساعدة: ما عمر النصف للكربون -14؟)

10. ● عادة، يسمي الجيولوجيّون بداية حقب الحياة القديمة *انفجار الكامبري*. ما معنى هذا المصطلح؟.

11. ■ يوجد تكشفان منفصلان لهما الخصائص نفسها —التتابع الطبقي والمحتوى الأحفوري نفساهما - يفصل بينهما 50كم. هل توجد علاقة بينهما؟

12. ■ يشترك تكشفان ببعض الخصائص — تتابع طبقي، ومحتوى معدني، وبعض الأحافير- ولكن الطّبقات ليست جميعها موجودة. يفصل بين التكشفين 300 كم. هل يمكن أن تكون هناك علاقة بينهما؟ كيف تفسر الطّبقات المفقودة؟

13. ● سمِّ الدهور في زمن ما قبل الكامبري. صف الدهور باستخدام ثلاث كلمات لكلّ دهر.

14. ♦ افترض أنه في تتابع صخري لم يتعرض للتشويه، وجد تريلوبيت في طبقة غضار في قاع التكوين وأوراق نبات متحفرة في غضار أخضر في قمة التكوين. من مشاهداتك، ماذا تقول عن عمر التكوين؟

15. ♦ في تتابع طبقات رسوبية، توجد الطّبقات الأحدث في الأسفل أما الأقدم ففي الأعلى. ماذا حدث للطبقات؟

16. ● ما الفرق بين كلّ من عدم التوافق الحتي والزاوي؟

17. ■ كيف أصبح الغلاف الجويّ فيما قبل الكامبري غنيًّا بالنيتروجين؟

18. ■ ما العوامل التي تعتقد أنها ساهمت في توليد الأكسجين في نهاية ما قبل الكامبري؟ كيف أثرت زيادة الأكسجين في كوكبنا؟

19. ■ أين كان معظم الأكسجين في نهاية الكامبري قبل دخوله الغلاف الجوي؟

20. ● لماذا توجد الصّخور الرّسوبية البحرية مثل الحجر الجيري والدولوميت بشكل واسع داخل القارات؟

21. ■ خلال حقب الحياة القديمة، تغير سطح البحر، فأحيانًا كان مرتفعًا وأحيانًا أخرى كان منخفضًا. ما السبب الرئيس في هذا التغير؟

22. ■ ما أبرد عصر في حقب الحياة القديمة؟ ما الذي أسهم في هذا التبريد؟

23. ■ العديد من الكتل القارية كانت مغطاة بالبحار الضحلة في العصر السيلوري. ويعد هذا العصر بداية ظهور النباتات فوق اليابسة. كيف ذلك؟

24. ● تتكون طبقات الفحم من تراكم مواد النباتات التي تم حجزها في قاع المستنقع. ومع ذلك وجد الفحم في قارة القطب الجنوبي، حيث لا وجود للمستنقعات والنباتات. ما تفسيرك؟

25. ■ حُدّد التأريخ الإشعاعيّ لمعدن مايكا مأخوذ من صخر. ما أهمية هذا العمر إذا كان المايكا في صخر جرانيت؟ وماذا يعني هذا العمر إذا كان المايكا في صخر شست؟

26. ■ يعتقد معظم العلماء أنّ سبب الطبقة الغنية بالإيريديوم على حد K-T هو ارتطام نيزك. فلِمَ يعدّ التركيز العالي من الإيريديوم مهمًّا؟

27. ● ما طرق خفض مستوى سطح البحر؟ وما أثر ذلك في الحياة الموجودة وأشكالها؟

28. ● ما الطرق التي يمكننا من خفض مستوى سطح البحر؟ ما آثار مثل هذا العمل على أشكال الحياة الموجودة حاليًا في البحار؟

29. ■ ما الذي قد يسبب ارتفاع مستوى البحر؟ هل يمكن أن يحدث هذا في المستقبل؟ فسر السبب في حالة الإيجاب أو النفي.

30. ■ ما الافتراض العام الذي يجب تقديمه لفهم العمليات التي حدثت خلال تاريخ الأرض؟

31. ♦ ما بعض التبعات المتتالية المهمة التي تحدث عالميًّا عند التحام كتل القارات جميعها معًا كما في تكوّن بنجايا؟

32. ■ إذا ترسب طين ناعم بسرعة 1 سم/1000سنة، فكم يحتاج تكوين تتابع سمكه 1كم؟

33. ♦ لماذا يرتفع مستوى سطح البحر عند زيادة معدل توسع المحيط؟

34. ● إذا ارتفع مستوى البحر اليوم، فما المناطق التي ستتأثر أكثر؟ ما أشكال الحياة التي ستتعرض لخطر الانقراض؟

35. ♦ ما الظروف التي تؤدي إلى تكوّن جليديات على مقياس قارّيّ؟

36. ♦ كيف تؤدي اللابة البازلتية في نطق الانهدام إلى فصل كتلتين قاريتين؟

37. ■ ما السبب الممكن لتكون الفترات الجليدية- بين الجليدية؟ هل نحن في عصر جليدي؟ اشرح.

38. ■ ما أثر انقسام بنجايا في مستوى سطح البحر؟

39. ● كيف أثر البشر المعاصرون في العمليات الجيولوجيّة؟

40. ♦ ما الحدث الجيولوجيّ الذي أدى إلى انحناء سلسلة جزر هاواي/ سلسلة جبال الإمبراطور البحرية؟

41. ■ كيف أثر جليد البليستوسين في سطح الأرض؟

42. ■ كيف تشكّل صدع سان إندرياس؟

43. ● كيف يؤثر فقدان الشواطئ في الحياة البحرية الضحلة؟

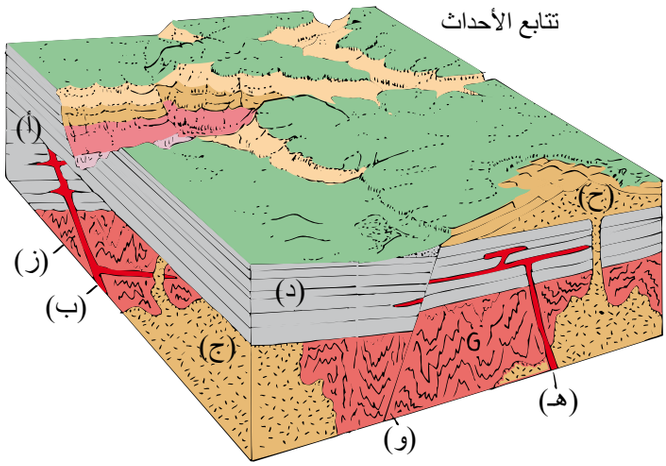
44. ● ما الحدث الذي أدى إلى تطور العديد من الثّدييات في بداية حقب الحياة الحديثة؟

45. ■ كيف تشكّل خليج كاليفورنيا؟

مسألة

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

1. ■ ارجع إلى الشكل. استخدم مبادئ التأريخ النسبيّ، وحدّد الأعمار النسبية للأجسام الصّخريّة والمظاهر الأخرى المرقمة. ابدأ بهذا السؤال: ما الذي كان هناك بداية؟



اختبار الاستعداد للقراءة

إذا تمكنت من استيعاب هذا الفصل جيدًا، فعليك الإجابة عن 7 أسئلة من 10 على الأقل. ولكن إذا أجبت عن أقل من 7، فإنّك بحاجة إلى مزيد من الدراسة قبل المضي قدمًا.

اختر أفضل إجابة في كلّ مما يلي:

1. يشير مبدأ التعاقب الطبقي إلى أنّ كلّ:
(أ) طبقة رسوبية أقدم من التي تعلوها.
(ب) طبقة رسوبية أحدث من التي تعلوها.
(ج) طبقة رسوبية جديدة تترسب أفقيًّا.
(د) طبقة رسوبية جديدة تترسب توافقيًّا.

2. المبدأ الذي ينصّ على أنّ أشكال حياة خلال تاريخ الأرض وجدت بترتيب محدّد يسمى مبدأ:
(أ) المجموعات الأحفورية.
(ب) التعاقب الحيويّ.
(ج) الأحافير المتوافقة.
(د) معرفة الأحافير.

3. الزّمن اللازم لتحلل نصف كمية المادة المشعة يسمى:
(أ) التأريخ الإشعاعيّ.
(ب) كربون – 14.
(ج) نسبة الذرات المتبقية.
(د) عمر النصف.

4. سبب تطور محيطات الأرض هو:
(أ) نيازك غنية بالماء ضربت الأرض.
(ب) انبثاق الغازات من البراكين في زمن ما قبل الكامبري.
(ج) تيارات الحمل في الستار.
(د) انبثاق الغازات من البراكين في بداية حقب الحياة القديمة.

5. تكوّن الأكسجين الحرّ كان متلازمًا مع ظهور الحياة على الأرض لأنّه أدى إلى تكون:
(أ) O_2 للنباتات.
(ب) أوزون O_3، الذي ساعد على حماية الأرض من الأشعة فوق البنفسجية الضارة.
(ج) أوزون O_3، الذي بدأ به تنفس الكائنات.
(د) المحيطات، حيث بدأت الحياة.

6. حدثت في حقب الحياة القديمة عدة تغيرات في مستوى سطح البحر. وعندما يرتفع مستوى سطح البحر:
(أ) تغطي اليابسة بحار ضحلة.
(ب) تحصر مياه أكثر في الجليد ويصبح المناخ باردًا
(ج) يصبح المناخ دافئًا وتتكون المستنقعات.
(د) تصبح أحواض المحيطات ضحلة.

7. أهم حدث في الكامبري هو:
(أ) ظهور الأسماك.
(ب) قدرة الكائنات على تكوين هياكل خارجية.
(ج) ظهور الترايلوبيت.
(د) قدرة الكائنات على تكوين رئتين.

8. تكوّن قارة بنجايا:
(أ) كان بسبب اندماج معظم الكتل القارية.
(ب) أدى إلى بناء جبال الهملايا.
(ج) أدى إلى النشاط البركاني الكثيف والتدفقات البازلتية.
(د) جميع ما ذكر

9. أدى الجليد في حقب الحياة الحديثة إلى:
(أ) انخفاض مستوى البحر عالميًّا.
(ب) نحت سطح الأرض (مثل جبال الألب في سويسرا).
(ج) تكون جسور قارية بين القارات.
(د) جميع ما ذكر

10. تزامن ولادة صدع سان إندرياس مع:
(أ) تصادم صفيحة الهادي مع جزر هاواي.
(ب) تصادم نظام مرتفع الهادي مع أمريكا الشمالية.
(ج) حركة صفيحة الهادي فوق منطقة مضطربة.
(د) تصادم الهند مع أوراسيا

إجابات اختبار الاستعداد للقراءة

١أ، ٢ب، ٣د، ٤ب، ٥ب، ٦أ، ٧ب، ٨أ، ٩د، ١٠ب

اكتشف المزيد

جولد، ستيفن جاي، وندرفول لايف- طفل برغس السطحي وطبيعة التاريخ. نيويورك. تورتون، 1989.

www.scoteses.com/earth.html
هذا هو موقع مشروع باليوماب، الحائز على جائزة موقع سينتفيك أمريكانا للعلوم والتقنية لسنتين متتاليتين، يبرز قسم تاريخ الارض سلسلة من الخارط الجيولوجي للأرض في العصور الماضية، والحاضرة، والمستقبلية. قم بزيارة القمة الرئيسة للحصول على رسوم متحركة، واقتراحات لمصادر وبرمجيات وأدوات تعليمية.

www.ucmp.berkeley.edu/help/timeform.html
الصفحة الجيولوجيى لمجلة تايم التابعة لمتحف جامعة كاليفورنيا في بيركلي حول الحفريات وتوفر جدول زمني سهل الاستخدام إضافة الى روابط عديدة لأوصاف مفصلة وخرائط.

الفصل 21 مصادر على الشبكة

أشكال تفاعلية
- 21.6, 21.8, 21.21

دروس تعليمية
- تكون الزوايا غير المتطابقة

اختبار قصير
بطاقات تعليمية
روابط

تكتونية الصفائح وباطن الأرض

22

■ لو حفرت بئرًا تخترق الأرض كلها، فماذا سنجد في باطنها؟ ولأن حفر بئر كهذه مستحيل، فما الأدوات والتقنيات التي يمكن استخدامها لاستكشاف باطن الأرض؟ لقد بدأت الأبحاث بدراسة الصخور السطحية التي تخبرنا بالكثير عن باطن الأرض. وتعد الزلازل والبراكين متعلقة بالنشاط الداخلي لكوكبنا. وقد تعطي المشاهدات والقياسات الناتجة عنها دلائل أخرى. كما تعد هذه المظاهر والعمليات جميعها انعكاسات خارجية للعمليات التي تحدث في باطن الأرض.

1.22 الأمواج الزلزالية

2.22 طبقات الأرض الداخلية

3.22 الانجراف القاري- فكرة سابقة لوقتها

4.22 قبول فرضية الانجراف القاري

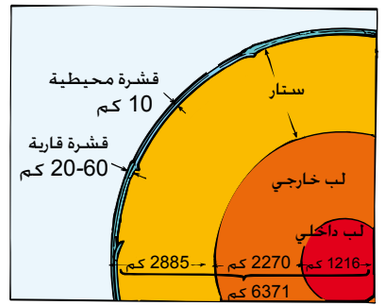
5.22 نظرية تكتونية الصفائح

6.22 أدلة قارية لتكتونية الصفائح

7.22 النظرية التي تفسر الغلاف الأرضي

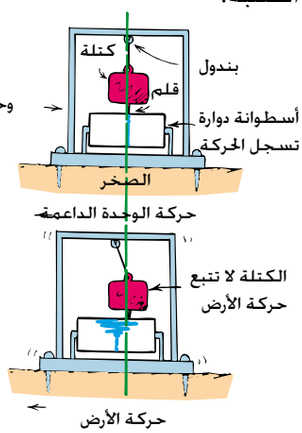
1.22 الأمواج الزلزالية

الزلزال مخيفة ومدمرة، إلا أنها توفر مفتاحًا لفهم التركيب الداخلي للأرض. **الزلزال** هو اهتزاز في الأرض، يحدث عندما تتحرك الصخور تحت سطح الأرض أو تتكسر. هذه الحركات الداخلية تولد موجات تسير خلال باطن الأرض وعلى السطح، وتسمى *الموجات الزلزالية*. تعطينا سرعة انتقال الموجات الزلزالية والاتجاه الذي تسلكه صورة لداخل الأرض. ما تم اكتشافه هو كوكب ذو طبقات. وتنقسم الطبقات الرئيسة للأرض إلى: القشرة(*Crust*)، والستار(*Mantle*)، واللب الخارجي (*Outer Core*) واللب الداخلي (*Inner Core*) (الشكل 1.22). تذكر من الفصل 10 أن سرعة الموجة تعتمد على الوسط الذي تعبره. وقد تعلمنا أن بعضهما تسير أسرع في الماء مما في الهواء. كما أنّ موجات الصوت تكون أسرع في المواد الصلبة.



الشكل 1.22
مقطع عرضي لباطن الأرض يوضح الطبقات الأربع الرئيسة وسمكها التقريبي.

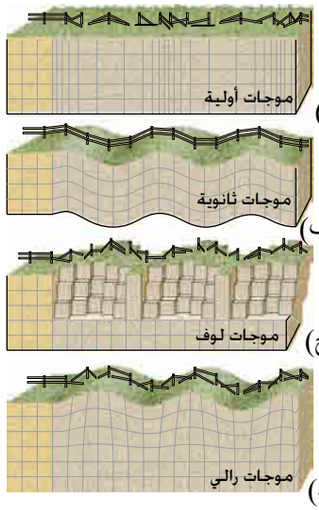
وكما هي الحال في موجات الصوت، فإن سرعة الموجات الزلزالية تعتمد على مرونة المادة التي تنتقل خلالها وكثافتها. فكلما زادت المرونة والكثافة زادت سرعة الموجة. لذا فإن قياس سرعة الموجات الزلزالية يوفر دلائل عن تركيب الأرض. تنتقل الطاقة المتولدة عن الزلزال على شكل موجات زلزالية في الاتجاهات جميعها في باطن الأرض، فتهتز الأرض وتتحرك. ويتم تسجيل هذه الاهتزازات الأرضية بواسطة *السيزموجراف* (*Seismograph*)(الشكل 2.22). ويمكن تعرف باطن الأرض باستخدام تسجيلات السيزموجراف- مخططات (*سيزموجرام*)(*Seismogram*) لقياس عدد من الزلازل. وكما أن الأشعة السينية تكشف باطن جسمك، فإن مخطط الزلازل يكشف باطن الأرض.



الشكل 2.22
رسم السيزموجراف. عندما تتحرك الأرض فإن المادة الداعمة المثبتة فيها تتحرك، ولكن الكتلة في نهاية البندول تبقى مكانها. يوجد قلم مثبت في الكتلة يرسم علاقات للإزاحة النسبية على الأسطوانة الدوارة أسفل منه. وبهذه الطريقة يسجل السيزموجراف حركة الأرض.

هناك نوعان من الموجات الزلزالية: **الموجات الجسمية (Body Waves)** التي تنتقل خلال باطن الأرض، والموجات السطحية (*Surface waves*) التي تنتقل خلال **سطح الأرض** (الشكل 3.22).

وتصنف الموجات الجسمية إلى موجات أولية (*Primary Waves*) (موجات – P) **وموجات ثانوية (Secondary Waves)** (موجات – S). الموجات الأولية تشبه موجات الصوت، وهي موجات طولية- تنضغط وتتمدد فيها الصخور في أثناء الانتقال.وتنتقل هذه الموجات من مصدرها في الاتجاهات جميعها مثل اهتزازات الجرس. كما أن الموجات الأولية هي الأسرع والأولى التي تسجل على السيزموجراف. ولأن المواد الصلبة والسائلة يمكن أن تنضغط وتتمدد، فإن الموجات الأولية يمكن أن تنتقل عبر المواد جميعها - غرانيت صلب، وماجما، وماء، أو هواء. في حين تشبه الموجات الثانوية الموجات المتولدة في خيط جهاز الكمان الموسيقي، وهي موجات مستعرضة. فهي تهز الجزيئات في وسطها إلى الأعلى والأسفل، ومن جانب إلى آخر بالتعامد مع اتجاه سير الموجة. ولأن الموجات الثانوية تنتقل أبطأ من الموجات الأولية فإنها تكون ثاني موجات تسجل على السيزموجراف. إضافة إلى أن الموجات الثانوية لا تنتقل عبر السوائل، بل عبر المواد الصلبة فقط.



الشكل 3.22
شكل يوضح تأثير الموجات الزلزالية. يمثل الجزءَ الأصفر من الجانب الأيسر في كل شكل الجزء غير المتأثر. (أ) موجات أولية تضغط المادة التي تنتقل خلالها وتمددها كما هو موضح بالمسافات المختلفة بين الخطوط الرأسية مثل فعل الزنبرك. (ب) موجات ثانوية تؤدي إلى تذبذب المادة أعلى وأسفل ومن جانب إلى آخر. (ج) موجات لوف Love السطحية التي تؤثر خلف وأمام مثل الثانوية، ولكن في الاتجاه الأفقي فقط. (د) موجات رالي(Rayleigh) السطحية لها حركة دوارة أعلى وأسفل كموجات المحيط.

أما الموجات السطحية فتنقسم إلى نوعين هما: *موجات رالي (Rayleigh) وموجات لوف (Love)*. لموجات رالي –حركة دورانية أعلى وأسفل أبطأ من الموجات الأولية والثانوية. لذا فهي آخر الموجات تسجيلاً على جهاز السيزموغراف.

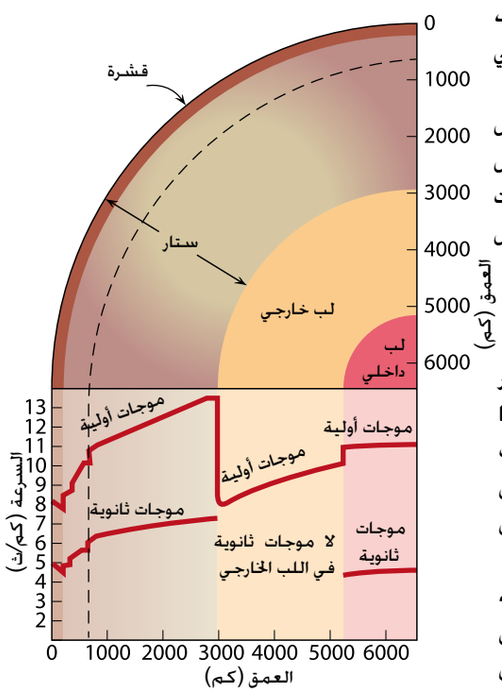
تنعكس الموجات الزلزالية من باطن الأرض عن السطوح بين المواد المختلفة. وعندما تنتقل الموجات الزلزالية إلى مادة مختلفة، تتغير سرعتها مما يؤدي إلى انكسارها (الفصل 10). ولعمل تصور عن باطن الأرض، يدرس علماء الجيولوجيا الانعكاس كلّه،والانكسار، وسرعة أنواع الموجات الزلزالية. وقد أدت بحوث الموجات الزلزالية إلى معرفة بنية الطبقات الداخلية للأرض (الشكل 4.22).

2.22 طبقات الأرض الداخلية

في بداية القرن العشرين، كان الجيولجي الأيرلندي ريتشارد أولدهام يفحص سجلات زلزال كبير في الهند. وقد اكتشف أن الموجات الثانوية قد سارت في باطن الأرض لمسافة ثم توقفت. كما أنه لاحظ أن الموجات الأولية سارت إلى العمق الذي وصلته الموجات الثانوية ثم انكسرت وقلّت سرعتها. ولأن الموجات الثانوية لا تنتقل خلال السوائل بعكس الموجات الأولية التي تنتقل ولكن بسرعة أقل. فقد استنتج أولدهام أن الموجات الزلزالية وصلت حدًّا داخليًّا- واكتشف لب الأرض عام 1906م.

وبعد ثلاث سنوات، قام عالم زلزال كرواتي اسمه إندريا موهورفتشيك بتحليل قراءات زلزالية من زلزال حديث. وحينها لاحظ زيادة حادة في سرعة الموجات الزلزالية على حد آخر. وهو على عمق ضحل تحت سطح الأرض. وبما أن سرعة الموجات تعتمد على خصائص المادة التي تنتقل فيها. فقد استنتج موهورفتشيك(*Mohorovicic*) أن زيادة السرعة كانت بسبب اختلاف الكثافة في الأرض- زادت سرعة الموجات لأنها عبرت من مادة صلبة ذات كثافة منخفضة إلى مادة صلبة ذات كثافة أعلى. رسمت بيانات السيزموجراف لموهورفتشيك خريطة للحد العلوي *للستار العلوي في الأرض*، طبقة ذات كثافة مرتفعة تقع أسفل القشرة الأقل كثافة. وقد سمي هذا الحد بانقطاع موهورفتشيك(*Mohorovicic Discontinuity*) أو "موهوّ" باختصار الذي يفصل بين القشرة والستار .

وفي عام 1913، أكّد بينوجوتنبرغ (*Gutenberg*) ما وجده أولدهام (*Oldham*) عن طريق ملاحظة أن الموجات الأولية والثانوية تأثرت بقوة بحد على عمق 2900 كم - الحد بين الستار واللب. وقد أشارت المشاهدات الزلزالية إلى أن الموجات الأولية انعكست وانكسرت بقوة عندما وصلت هذا العمق بحيث أدى الحد إلى تكون منطقة ظل في الأرض (الشكل 5.22). الظل هو منطقة لا توجد فيها موجات. وهي بين زاوية 105-140 درجة من الموقع السطحي للزلزال (المركز) ولا يوجد فيه أي تخلل مباشر للموجات. ولأن الحد مميز فإنه دل على تغير مهم في الكثافة للمادة في باطن الأرض. تقترح الكثافة الكلية للأرض السرعة التي سارت فيها الموجات في اللب أن اللب مكون من حديد. وهي مادة ذات كثافة أعلى من الصخور السليكاتية المكونة للستار. كما أن الحد بين الستار واللب أدى إلى تكون منطقة ظل للموجات الثانوية أكبر من الموجات الأولية- لم تستطع الموجات الثانوية العبور إلى اللب. وبما أن الموجات الثانوية تنتقل فقط خلال المواد الصلبة، فإن عالم الزلزال الإنجليزي سير هارولد جيفري (*Sir Harold Jeffery*) قال إن لب الأرض أو جزءًا منه يجب أن يكون سائلاً. وكان ذلك عام 1926م.

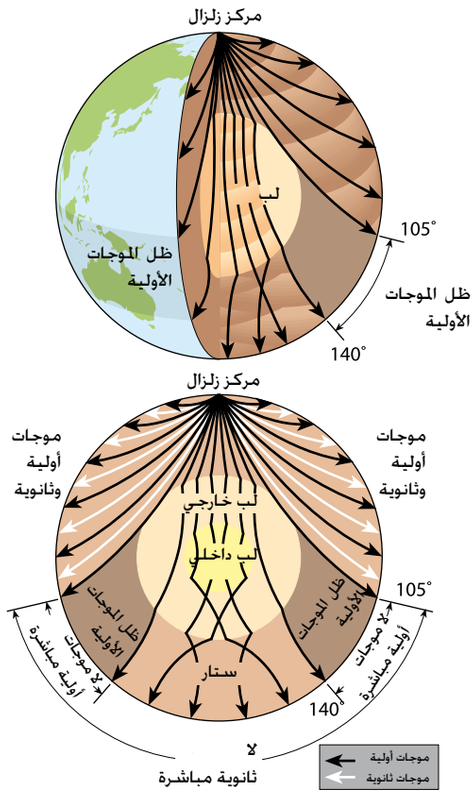


الشّكل 4.22

مقطع عرضي لطبقات باطن الأرض تبين الزيادة والتناقص في حركة الموجات الأولية والثانوية في الطبقات المختلفة.

لمعلوماتك

■ كيف ترتبط الكثافة مع المرونة؟ المرونة مرتبطة بمدى قدرة المادة على استعادة شكلها الأصلي بعد زوال المؤثر فيها. فمثلاً للفولاذ مرونة عالية، أما الخبز الطازج فذو مرونة قليلة. قضيب المطاط مرن لأنه يعود إلى شكله الأصلي بعد زوال المؤثر فيه. تزداد كثافة الصخور تحت سطح الأرض بسبب ضغطها بفعل وزن الصخور فوقها. كلما زادت كثافة الصخر تصبح صلبة ومرنة. ومن ثم فهناك ربط كبير بين الكثافة والمرونة في باطن الأرض.



الشّكل 5.22

مقطع مقصوص(Cutaway) ومقطع عرضي يظهران تغير مسارات الموجات على الحدود الرئيسة ومنطقة ظل الموجات الأولية. ينتج ظل الموجات الأولية بين 105-140 درجة من مركز زلزال سطحي من انكسار الموجات الأولية على الحد بين الستار واللب. لاحظ أنه في أي موقع أكبر من زاوية 105° لا توجد موجات ثانوية؛ لأن اللب الخارجي السائل لا يسمح بمرور هذه الموجات.

إذا جمعنا اكتشافات كلّ من أولدهام، وموهورفتشيك، وجوتنبرغ، وجيفري، فإننا نجد أن الأرض مكونة من ثلاث طبقات من مواد مختلفة التركيب هي: *القشرة*، *والستار*، *واللب*. وكل طبقة ذات شكل كروي بحيث إن الشكل النهائي للأرض يشبه شكل البيضة المسلوقة.

وقد تم تحديد هذه الصورة المبسطة لطبقات الأرض عام 1936 من عالمة زلازل دانماركية هي إنجي ليهمان (*Lehmann*) التي توصلت في دراستها إلى أن الموجات الأولية انكسرت ليس فقط على حد اللب-الستار، ولكن أيضًا على عمق معين في اللب، حيث زادت السرعة.

لقد أدى هذا التزايد في سرعة الموجة إلى القول إن اللب الداخلي يجب أن يكون صلبًا. لذا وجد أن اللب له جزءان: خارجي يتكون من سائل حديد مصهور، وداخلي صلب من حديد. وبإضافة عمل ليهمان إلى الاكتشافات المبكرة، فإننا نرى الصورة الكاملة الحالية لتركيب طبقات باطن الأرض. هل تعتقد أن هذه الطبقات التي في باطن الأرض تؤثر في التغيرات الجيولوجية التي تحدث على كوكبنا؟ الإجابة: نعم، كما سترى الآن.

■ **نقطة فحص**

ما الدليل الذي يدعم فرضية أن اللب الداخلي للأرض صلب والخارجي سائل؟

هل كانت هذه إجابتك؟

الاختلافات بين حركة الموجات الأولية والثانوية في باطن الأرض. فعند وصول الموجتين إلى الحد الواقع على عمق 2900 كم تحت السطح، تتكون منطقة ظل واضحة جدًّا. تنعكس الموجات الأولية وتنكسر على هذا الحد، في حين أن الموجات الثانوية تنعكس فقط. لا يمكن للموجات الثانوية أن تنتقل في السوائل، وهذا يدل على أن اللب الخارجي سائل. ومع انتقال الموجات الأولية في اللب فإن سرعتها تزداد فجأة عند عمق معين. وبما أن الموجات تنتقل بسرعة أكبر في المواد الصلبة فإنا نستنتج وجود لب داخلي صلب.

اللب

يتكون **لب** الأرض بشكل رئيس من الحديد وكميات أقل من النيكل. ويكون كل من الحديد والنيكل في اللب الداخلي صلب. ومع أن اللب الداخلي حار جدًّا، إلا أن الضغط الهائل الناجم عن وزن باقي الأرض يمنع مادة اللب الداخلي من الانصهار (تمامًا كما يمنع قدر الضغط الماء الساخن من الغليان. كما نوقش في الفصل 7).

ولأن وزنًا أقل يؤثر في اللب الخارجي، فإن الضغط عليه أقل. لذا فإن الحديد والنيكل يكونان في حالة سائلة. ينساب اللب الخارجي المصهور بمعدل عدة كيلومترات في السنة.

لمعلوماتك

■ معظم ما تعرفه عن باطن الأرض كان نتيجة الحرب الباردة بين الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي سابقًا؛ ففي ستينيات القرن الماضي، عندما كانت تجارب الأسلحة النووية شائعة، وجد أن الانفجارات تحت سطح الأرض تولد موجات زلزالية. وقد وضعت كلّ دولة منهما أجهزة سيزموجراف لمراقبة نشاطات الدولة الأخرى. لقد أعطت سيزموجرافات هذه المحطات تفاصيل التركيب غير المشاهد من كوكبنا.

إن هذا التوقف هو دليل خارج سطح الأرض. يولد الصهير المتدفق في اللب الخارجي شحنات كهربائية متحركة أي تيارًا كهربائيايولّد بدوره المجال المغناطيسي. إلا أن هذا المجال المغناطيسي غير ثابت، ولكنه تغير خلال الزمن الجيولوجي. تذكر من فصل 9 أن هناك فترات زمنية تضاءل فيها المجال المغناطيسي إلى الصفر، للبناء من جديد بأقطاب منعكسة. وقد يكون السببُ في هذه الانقلابات المغناطيسية تغيرَ اتجاه تدفق السائل في اللب الخارجي المصهور.

■ **نقطة فحص**

درجة الانصهار العادية للحديد 1535°س، ودرجة حرارة اللب الداخلي 5000°س على الأقل . فلماذا لم ينصهر اللب الداخلي الصلب؟

هل كانت هذه إجابتك؟

يؤدي الضغط الكبير الناتج عن وزن الأرض فوقه إلى ضغط الذرات معًا بإحكام، بحيث لا تستطيع حتى الحرارة المرتفعة تحريكها. وبسبب هذا الضغط لا يحدث الانصهار، ويبقى اللب الداخلي صلبًا.

الستار

يحيط الستار بلب الأرض، وهو طبقة صخرية بسمك 2900 كم تقريبًا. ويتكون من صخور سليكاتية غنية بالحديد، ويتصرف الستار كمادة صلبة لدنة. تتدفق صخور الستار مع أنها صلبة وتسلك سلوك مادة لدنة. وتسلك سلوك مادة صلبة تنكسر بسبب الإجهاد ببطء. يحدث التدفق في الستار على شكل تيارات حمل تكون خلايا الحمل (الشكل 6.22). وبكلمات أخرى، ترتفع المادة الساخنة في الستار الى الأعلى فتبرد ثم تهبط نحو الأسفل (الفصل 7).

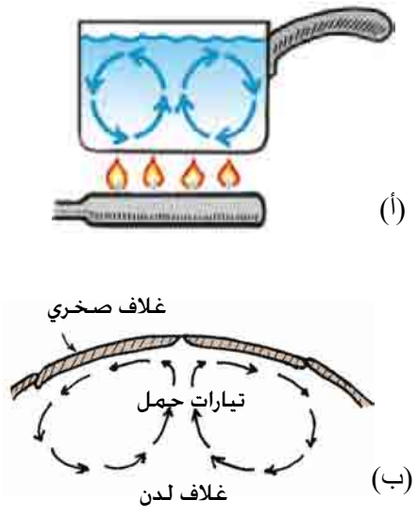
مع أن الستار له تركيب متجانس نسبيًّا، فإنه ينقسم إلى قسمين اعتمادًا على الخصائص الفيزيائية هما: 1- الستار السفلي الذي يمتد من اللب الخارجي إلى عمق 700 كم (الخط المتقطع في الشكل 4.22). وهذا الستار صلب بالكامل؛ لأن الضغط أكبر من أن يسمح بالانصهار. 2- الستار العلوي الذي يمتد من عمق 700 كم إلى الحد بين القشرة والستار وفيه نطاقان (الشكل 7.22). الجزء السفلي من الستار العلوي هو الغلاف اللدن(*Asthenosphere*)، وهو صلب، ويحوي كميات قليلة من السوائل الناتجة عن الانصهار الجزئي لصخور الستار. إن الغلاف اللدن ذو طبيعة لدنة حيث يتدفق بشكل أسهل من الستار السفلي. يعتقد العديد من الجيولوجيين أن خلايا الحمل في الغلاف اللدن لا تمتد تحت عمق 700 كم، وأنها مفصولة عن خلايا الحمل في الستار السفلي. يتفق هذا الرأي مع احتمال أنهما غير منفصلين بحيث تمتد خلايا الحمل من الغلاف اللدن عميقًا في الستار، وقد تصل حد الستار من اللب. وعلى أي حال، فإن الحركة التدفقية الثابتة في الغلاف اللدن تؤثر في المظاهر السطحية على كوكبنا.

أما الآن فسنتناول الطبقة السطحية القاسية من الأرض التي تتضمن القشرة والجزء العلوي من الستار. هذا النطاق هو **الغلاف الصخري (*lithosphere*)**. ينتهي الستار عند انقطاع موهو. ولكن الغلاف الصخري يضم كامل القشرة (الشكل 7.22). لذا، فإن الستار العلوي يضم الغلاف اللدن وجزءا من الغلاف الصخري. والغلاف الصخري هو القشرة وجزء من الستار. إنّ سبب التقسيم الغريب هذا هو التداخل بين الخصائص الفيزيائية والكيميائية. كما توصلوا إليها بالموجات الزلزالية. يتصرف الغلاف الصخري كوحدة مستقلة، ولكن هناك تغيرًا في التركيب خلال الغلاف الصخري.

لمعلوماتك

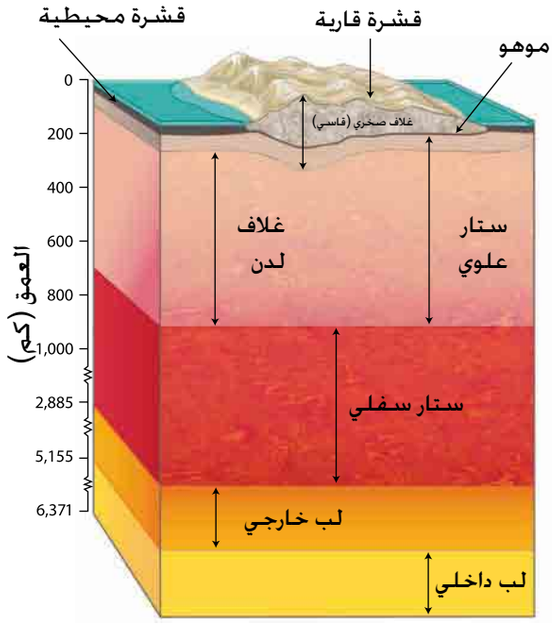
■ كثافة الصخور على سطح الأرض 2.7 -3 جم/ سم^3، في حين متوسط كثافة الأرض ككل 5.5جم/سم^3. لذا فإن الصخور السطحية غير ممثلة لباطن الأرض. وللحصول على متوسط كثافة عال، لابد أن تكون كثافة اللب على الأقل 10.0جم/ سم^3. وهو سبب مع أسباب أخرى للدلالة على أن اللب مكون من حديد وكميات أقل من النيكل، أكثر العناصر الثقيلة شيوعًا .

ساعد اكتشاف انقلاب الأقطاب المغناطيسية على تفسير حركة القارات.



الشكل 6.22

(أ) مثال شائع لتيارات الحمل يمكن رؤيته عند تسخين ماء في وعاء. (ب) نموذج يوضح تيارات الحمل في الغلاف اللدن.



الشّكل 7.22

إن تركيب كلّ من القشرة والستار واللب مختلف. يبدأ الستار عند الحد بين اللب والستار، وينتهي عند قاعدة القشرة. الستار السفلي وحدة مستقلة من عمق 2900 كم وحتى 700 كم. ومع أن الستار العلوي له التركيب نفسه، إلا أنه يقسم إلى وحدتين هما: الجزء السفلي من الستار العلوي وهو الغلاف اللدن، والجزء العلوي من الستار العلوي مع القشرة الذي يشكل الغلاف الصخري القاسي.

الغلاف الصخري قاس وهش، ولا يتدفق كالغلاف اللدن. لذا فإن الغلاف الصخري يطفو فوق الغلاف اللدن مثل قطعة الخشب على الماء. يتحرك الغلاف الصخري مع حركة المادة أسفل منه. والحركات في الستار غير متجانسة. لذا (كما سنرى لاحقًا في الفصل) فإن الغلاف الصخري يتكسر إلى قطع أو صفائح.

تتحرك تيارات الحمل ببطء حيث تحتاج إلى مئات من ملايين السنين لإكمال دورة. ومع ذلك، فإن الحركة الناتجة عن الحرارة في باطن الأرض تشكل العديد من مظاهر سطح الأرض. إن صفائح الغلاف الصخري في حركة مستمرة، لذا فحركتها تسبب الزلازل، والأنشطة البركانية، وتشوّه الكتل الصخرية الكبيرة التي تشكل الجبال.

سطح القشرة The crustal surface

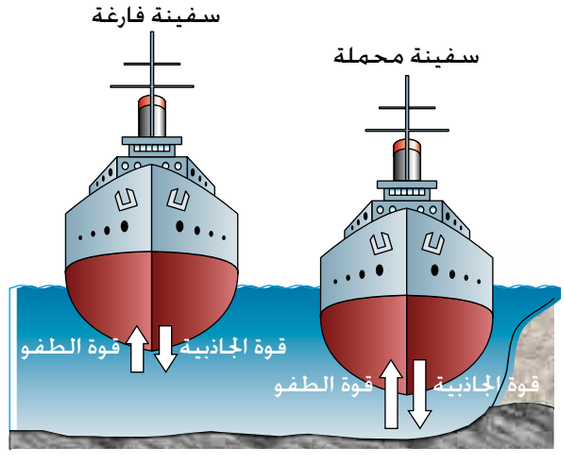
إن الجزء العلوي من الغلاف الصخري هو القشرة التي تنقسم إلى *قارية* و*محيطية*. تختلف كثافة القشرة وتركيبها وسمكها بين أحواض المحيطات العميقة والهضاب القارية المرتفعة. وقشرة المحيط متراصة، وسمكها 10 كم تقريبًا، ومكونة من صخور بازلتية كثيفة. أما القشرة القارية، فعادة ما يكون سمكها بين 20 - 60 كم، ومكونة من صخور جرانيت، والتي هي أقل كثافة من الصخور البازلتية. وهذه الكثافة القليلة تجعل القشرة القارية مرتفعة عن مستوى البحر.

إذا كان سمك القشرة القارية أكبر من المحيطية، فلماذا توجد الأحواض المحيطية تحت الماء في حين تكون القارات مرتفعة وجافة؟ الإجابة موجودة في اختلاف الكثافة والطفو (الفصل 5). إن القشرة القارية الأقل كثافة تبقى مرتفعة عن القشرة المحيطة الأكبر كثافة، مع أن القشرة القارية ذات كتلة أكبر؛ وهذا هو مبدأ الاتزان (*Principle of Isostasy*). يصل أي من نوعي القشرة إلى علو متوازن بالنسبة إلى الستار عندما تصبح قوة الطفو الرافعة الناتجة عن الستار مساوية لوزن القشرة.

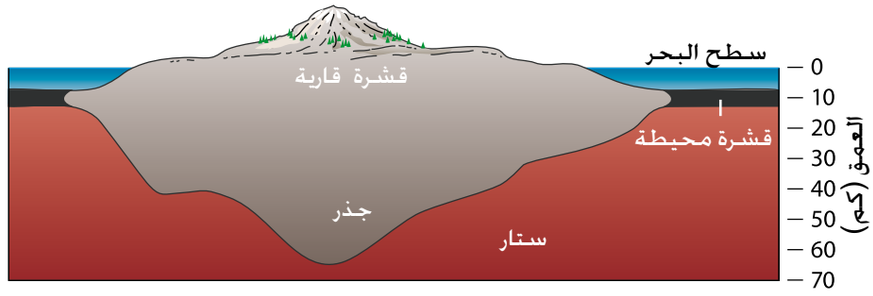
ويمكن توضيح هذا المبدأ بالمثال الآتي: تخيل أن قشرة الأرض سفينة، وأن الستار هو المحيط. تقف السفينة بوضعها العمودي في الماء عندما تساوي محصلة القوى صفرًا. يحدث ذلك عندما تكون قوة الجاذبية التي تسحب السفينة نحو الأسفل (وزنها) تساوي قوة الطفو التي تدفعها إلى الأعلى (الشكل 8.22). لاحظ أن السفن المحملة الثقيلة تطفو أقل، والجزء المغمور منها في الماء أكبر من الجزء الذي ينغمر عندما تكون فارغة. وبالمثل، يرتفع الموقع العمودي للقشرة في الستار وينخفض اعتمادًا على اختلاف الكثافة. وتبقى القشرة المحيطة ذات الكثافة المرتفعة في أسفل الستار، أما القشرة القارية الأقل كثافة فتبقى في أعلاه.

وعلى مقياس كوكبنا، افترض كتلتين من القشرة بكتل متساوية؛ إحداهما مكونة من قشرة محيطة والأخرى من قشرة قارية (الشكل 9.22). يطلق الستار قوة الطفو نفسها على كلتا الكتلتين، ولكن الكتلة القارية تطفو أعلى لأن كثافتها أقل. إذا أضفنا قشرة أكثر إلى الكتلة القارية، فإن سطحها العلوي سيصبح ذا ارتفاع أكبر من قبل، وستغوص في الستار بسبب زيادة الوزن. لذا، كلما زاد ارتفاع القشرة زاد انخفاض الجذر لدعمه.

وبالتقدم في هذه الأفكار، لا بد لكتل من القشرة أن تصل إلى حالة توازن معًا. إن وزن مادة الستار المزاحة من القشرة الطافية يساوي وزن الكتلة. ولكن، أين تذهب مادة الستار المزاحة؟ لأن الضغط في الستار من القشرة العليا يجب أن يتساوى من مكان إلى آخر وعلى أعماق متساوية، فإن المادة المزاحة تتدفق بعيدًا عن مكان الضغط؛ حتى يتساوى الضغط في الستار.



الشّكل 8.22
الاتزان isostasy: المكان العمودي للقشرة ثابت عندما تتساوى قوة الجاذبية مع قوة الطفو. لذا فإن قشرة المحيط الأعلى كثافة لها موقع أخفض من القشرة القارية الأقل كثافة، تمامًا كما ينغمر جزء من السفينة المحملة في الماء أكثر من الجزء المغمور عندما تكون السفينة الفارغة.



الشّكل 9.22
القشرة القارية أسمك وأقل كثافة من المحيطة. لذا فإن القشرة القارية تطفو أعلى فوق الستار مقارنة مع القشرة المحيطة. وللحصول على التوازن؛ فإنه كلما زاد ارتفاع القشرة زاد عمق الجذر.

وهذا يعني أن الستار أسفل القشرة القارية السميكة (الأقل كثافة) عليه الضغط نفسه كما على الستار أسفل القشرة المحيطة الأقل سمكًا (الأعلى كثافة). وللحصول على هذا التوازن فإن الموقع العمودي للكتل المختلفة من القشرة يتكيف حتى يحدث التوازن في الستار.

نقطة فحص

1. كيف تسلك قشرة الأرض كسفينة تطفو على الماء؟
2. لماذا تكون قشرة الأرض أكثر سمكًا تحت الجبال؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. يتم الحصول على الموقع العمودي للقشرة وموقع السفينة من خلال التوازن بين قوتي الطفو والجاذبية المؤثرة فيهما.
2. تمامًا كما يوجد معظم جبل الجليد تحت مستوى البحر، وبالمثل تكون الجبال. تبقى الجبال تغوص حتى توازن قوة الجاذبية للأسفل قوة الطفو لأعلى.

3.22 الانجراف القاري- فكرة سابقة لوقتها

هل لاحظت يومًا في خريطة جغرافية أن الشاطىء الغربي لإفريقيا والشاطىء الشرقي لأمريكا الجنوبية يمكن مطابقتهما كلعبة التركيب (الشكل 10.22)؟ لاحظ شخص هذه الملاحظة وأخذها بجدية. وهو عالم طبيعة ألماني اسمه ألفرد فيجنر (*Wegener*) (1880-1930) الظاهر في الشكل 11.22. لقد وضع فيجز فرضية متكاملة لتفسير هذه الملاحظة. وتعرف هذه الفرضية **الانجراف القاري**؛ حيث تنص على أن قارات الأرض كانت يومًا ما مجتمعة في قارة سماها *بنجايا*.

كم كان عمرك عندما لاحظت للمرة الأولى أن حافة الشاطىء لأمريكا الجنوبية وإفريقيا تنطبقان على بعضها كلعبة التركيب.

الشّكل 10.22

تتطابق القارات أفضل عند استخدام الرصيف القاري بدلًا من مقارنة خطوط الشواطئ للقارات.

لقد دعم فيجز فرضيته عن الانجراف القاري بأدلة جيولوجية وبيولوجية ومناخية مؤثرة. لقد افترض أن حد القارة ليس هو خط الشاطئ، ولكن حدها يقع على حافة *الرصيف القاري* (المنطقة المنبسطة بين الشاطىء والمنحدر الذي يمثل بداية قاع المحيط العميق). وعندما طابق أمريكا الجنوبية وإفريقيا باستخدام الرصيف القاري، كان التطابق أفضل من خط الشاطىء. وعندما قام بمطابقة الرصيف القاري لكليهما، وجد أنواع صخور متشابهة على جانبي المحيط الأطلسي. إضافة إلى أنه في العديد من الحالات وجد أن السلاسل الجبلية التي لها العمر نفسه تستمر وتكمل بعضها في أمريكا الشمالية، وأوربا، وأمريكا الجنوبية، وإفريقيا (الشكل 12.22). إضافة إلى وجود أحافير حيوانات لا تعيش على القارة في أمريكا الجنوبية وإفريقيا فقط، ولا وجود لها في أي مكان آخر. ويعدّ هذا اكتشافًا غريبًا لأن النباتات والحيوانات الحالية في هذه الأقاليم تختلف بشكل واضح بعضها عن بعض. كما وجدت أحافير أشجار متشابهة تقريبًا في أمريكا الجنوبية، والهند وأستراليا، والقطب الجنوبي* .

لمعلوماتك

- اعتقد العلماء في بداية القرن العشرين أن القارات والمحيطات ثابتة. وقالوا إن سطح الأرض ثابت فوق باطن مصهور يبرد بالتدريج. كما اعتقدوا أنه نتج عن تبريد الأرض انكماش أدى إلى تجعّد السطح فنتجت الجبال والأودية.

ثم جاء دليل أقوى للقارة الكبيرة (بنجايا) من بيانات المناخ القديم. قبل أكثر من 300 مليون سنة (في وسط الحقبة القديمة)، غطى الجليد جزءًا من أمريكا الجنوبية، وجنوب إفريقيا، والهند، وجنوب أستراليا (الشكل 13.22 والفصل 21). لقد ترك الجليد دليلاً في آلاف المواقع الحاوية على خدوش جليدية تدل على اتجاه حركة الجليد. إذا كانت هذه القارات في مكانها الحالي، فإن الجليد كان قد غطى النصف الجنوبي من الأرض كاملاً. وفي بعض الأماكن تعدى خط الاستواء. وإذا كان الجليد بهذا الامتداد، فإن مناخ الأرض كان باردًا جدًّا. ولكن لا وجود للجليد في النصف الشمالي من الأرض في ذلك الوقت. وفي الحقيقة، فإن وقت الجليد في النصف الجنوبي هو وقت المناخ شبه المداري في النصف الشمالي من الأرض.

الشّكل 11.22

كان ألفرد فيجنر (wegener)(1880-1930) عالمًا متعدد الاختصاصات ذكيًّا. وقد نشر في عام 1915م فرضية الانجراف القاري التي قادت في النهاية إلى وضع تكتونية الصفائح. لم يقتصر اهتمامه على علمي الأرصاد الجوية والمناخ فقط، بل اهتم كذلك في علوم الفلك، والجيولوجيا والجيوفيزياء، والبحار، والأحافير. كما استكشف خلال حياته القطب الشمالي وكان محظوظًا بالنجاة من العديد من المخاطر. وفي عام 1930م مات فيجنر في أثناء عبوره منطقة جليدية وهو يستكشف جرينلاند، ولا يزال جسده محفوظًا في جليديات جرينلاند؛ لقد كانت حياته مليئة بالعطاء.

* إحدى أحافير النباتات التي قدّمت دليلًا داعمًا لفكرة فيجنر هي نبات الجلوسوبترس التي وجدت في أمريكا الجنوبية، والهند، وأستراليا، والقطب الجنوبي. ولأن حبوب هذا النبات كانت طويلة جدًّا بحيث لا يمكن للرياح نقلها، فإن الانتشار الواسع لهذا النبات دعم فرضية فيجنر التي تشير إلى أن القارات جميعها كانت يومًا ما مجتمعة.

ولتفسير التوزيع المناخي: افترض فيجنر أن بلغاريا كانت موجودة قبل 300 مليون سنة. وكانت منطقة جنوب إفريقيا عند القطب الجنوبي. إعادة التركيب هذه جعل موقع مناطق الجليد قريبة من القطب والقارات الموجودة حاليًّا في النصف الشمالي للأرض عند الاستواء.

شرح فيجنر فرضية الانجراف القاري في كتابه *أصل القارات والمحيطات* الذي نشر عام 1915. ومع أنه استخدم أدلة في مجالات عملية مختلفة، إلا أن فرضيته لاقت استهزاء من المجتمع العلمي. لقد انتقده خصومه على فشله في إثبات قوى دفع مناسبة لشرح حركة القارات. (افترض فيجنر مخطئًا أن قوة جذب القمر هي القوة اللازمة. كما أنه افترض أن القارات قد انقسمت خلال قشرة الأرض كما تنقسم جبال الجليد). لذا فقد تم نسيان هذه الفرضية بسبب عدم وجود دليل مقنع. ولكن حديثًا فقط. ومع الاكتشافات الجديدة، قبل العلماء مبدأ فيجنر.

■ نقطة فحص

1 . ما الدليل الذي يمكن أن يقود شخصًا دون علم للقول إن القارات كانت يومًا ما متصلة؟

2 . رفض العلماء الذين عاصروا فيجنر الانجراف القاري لأنهم لم يتخيلوا كيف تنزلق قارات صخرية كتلية فوق قاع المحيط. ما الذي لم يعرفه هؤلاء عن الستار؟

هل كانت هذه إجابتك؟

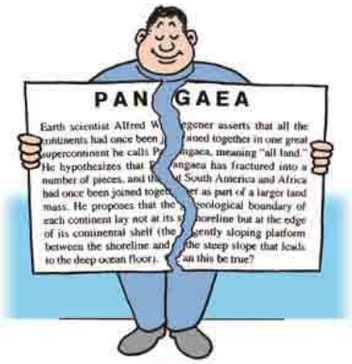
1 . الدليل الواضح هو تطابق حافات قارتي إفريقيا وأمريكا الجنوبية، والذي يمكن رؤيته في أي خارطة أو نموذج كرة أرضية.

2 . ما عرفه فيجنر هو أن القارات عند تحركها فإنها تنزلق على سطح صخري صلب. أما العلماء الذين عاصروه فلم يعرفوا أن في الستار طبقة لدنة وهو الغلاف اللدن الذي تطفو عليه القارات وتستطيع الانزلاق.

■ 4.22 قبول فرضية الانجراف القاري

جاء أحد الاكتشافات الرئيسة التي دعمت الانجراف القاري من دراسات المجال المغناطيسي للأرض. نعرف من فصل 9 أن الأرض كالمغناطيس الضخم حيث يقع قطباها المغناطيسيان بجانب قطبيها الجغرافيين. ولأن معادن معينة ترتب نفسها مع المجال المغناطيسي عند تشكل الصخر، فإن الصخور تحتفظ بتغير مغناطيسية الأرض خلال الزمن الجيولوجي. تسمى هذه المغناطيسية التي تشكلت في الماضي الجيولوجي **المغناطيسية القديمة (paleomagnetism)**. وفي خمسينيات القرن الماضي، تم وضع نقاط تمثل موقع القطب الشمالي المغناطيسي في أثناء 500 مليون سنة الماضية. ويبدو أن موقع القطب قد تجول في العالم بشكل كبير (الشكل 14.22). لقد ظهر أنه إما أن القطب قد تنقل مع الزمن، أو أن القارات قد انجرفت. ولأن الحركة الظاهرية (مسار الحركة) للقطب قد اختلفت من قارة إلى أخرى، فقد كان منطقيًّا القول إن القارات انجرفت. لذا أعيد إحياء فرضية الانجراف القاري، غير أن آلية هذه الحركة لم يتم تفسيرها بعد.

ولما كان دعم فرضية فيجنر قد جاء من مجالات علمية مختلفة، كذلك، فإن تفسير آليّة الانجراف القاري قد جمعت من مجالات علمية متباينة أخرى. لقد تم تجميع المعلومات واحدة تلو الأخرى حتى تكامل جمعها في ستينيات القرن الماضي نتيجة استكشاف قاع المحيط.



الشّكل 12.22

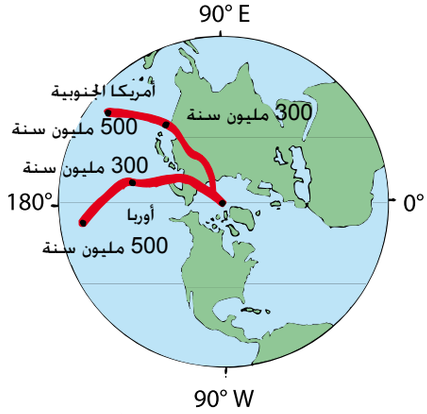
لقد ماثل فيجنر تطابق الأحافير والصخور بإيجاد قطعتي جريدة منحرفة عن طريق تتطابق في الخطوط والأسطر، ونوع الخط. فإذا تطابقت الحواف والخطوط معًا فإن القطعتين لا بد أن تكونا متصلتين.

الشّكل 13.22

دليل مناخ قديم يدعم فرضية فيجنر لانجراف القارات، الخدوش الجليدية على الصخور في جنوب أمريكا، وإفريقيا والقطب الجنوبي، والهند، وأستراليا توفر دلائل على أن القارات كانت يومًا ما موجودة معًا. تشير الأسهم إلى اتجاه حركة الجليد.

الشّكل 14.22

منحنى تجول القطب الشمالي المغناطيسي خلال 500 مليون سنة. الخط الأحمر السفلي نتج عن أدلة جمعت من أوربا في حين نتج الخط الأحمر العلوي من أدلة من أمريكا الشمالية. قد يتوقع الإنسان أن الخطين سوف ينطبقان. لذا فإما أن القطب قد تجول، أو أن القارات تحركت. ولكن كيف يكون القطب في مكانين في الوقت نفسه؟



كان اللاعب الرئيس الذي ساعد في حل الانجراف القاري هو هاري هيس (*Harry hess*) (الشكل 15.22)، وهو أستاذ الجيولوجيا في جامعة برنستون. في أثناء الحرب العالمية الثانية، خدم هيس في سلاح البحرية الأمريكي قائد سفينة. لقد كانت السفينة مزودة بجهاز صوتي لقياس عمق الماء ورسم خريطة طبوغرافية قاع المحيط. كان الجهاز موجودًا لمساعدة السفينة على الاقتراب من الشاطىء في أثناء الرسو. ولكن هيس استمر في استخدام الجهاز في البحر لجمع معلومات عن قاع المحيط العميق. وفي أثناء الدراسات العلمية التي أجراها خلال الحرب، جمع هيس معلومات عن قاع المحيط في منطقة شمال المحيط الهادي. لقد مكنه تقدير العمق من عمل دراسة على أعماق أكبر من التي تم دراستها. لقد ساعدت اكتشافاته على دعم اكتشافات حديثة أخرى .

ومع التطور التقني في خمسينيات القرن الماضي، استطاع علماء البحار من رسم خريطة قاع المحيط بتفاصيل أكثر دقة. فاكتشفت سلاسل جبلية ضخمة تمتد وسط محيطات الأطلسي، والهادي، والهندي (الشكل 16.22). فظهر وسط المحيط الأطلسي مثلاً، وُجد أنه يمتد في وسط حوض المحيط الأطلسي، ويوازي شواطىء أمريكا وأوربا، وإفريقيا، ويمتد هذا الظهر 19312 كم، وأعلى قممه ظهرت فوق سطح البحر مشكلة جزرًا مثل أيسلندا وأزور (الشكل 17.22). يوجد في وسط الظهر وعلى امتداده واد عميق- نطاق انهدام بركانية.* ومن المظاهر الأخرى في قاع المحيط اكتشاف أخاديد بحرية عميقة (طويلة وعميقة في قاع المحيط) قرب بعض القارات، وبالتحديد على حافة المحيط الهادي. ومن ثم، جرى الكشف عن بعض أعمق مناطق المحيط تقع بالقرب من بعض القارات، وبعض أقل المياه عمقًا توجد في وسط المحيطات عند ظهر وسط المحيط.

لمعلوماتك

■ كلمة *paleo* تعني القديم؛ أي معلومات عن أحداث في الماضي. فمثلاً المناخ القديم يعني وصف المناخ في الماضي، والمغناطيسية القديمة تصف البيانات المغناطيسية في الأزمنة الماضية، في حين تشير الأحافير القديمة إلى دراسة الحياة في الزمن الجيولوجي الماضي.

لمعلوماتك

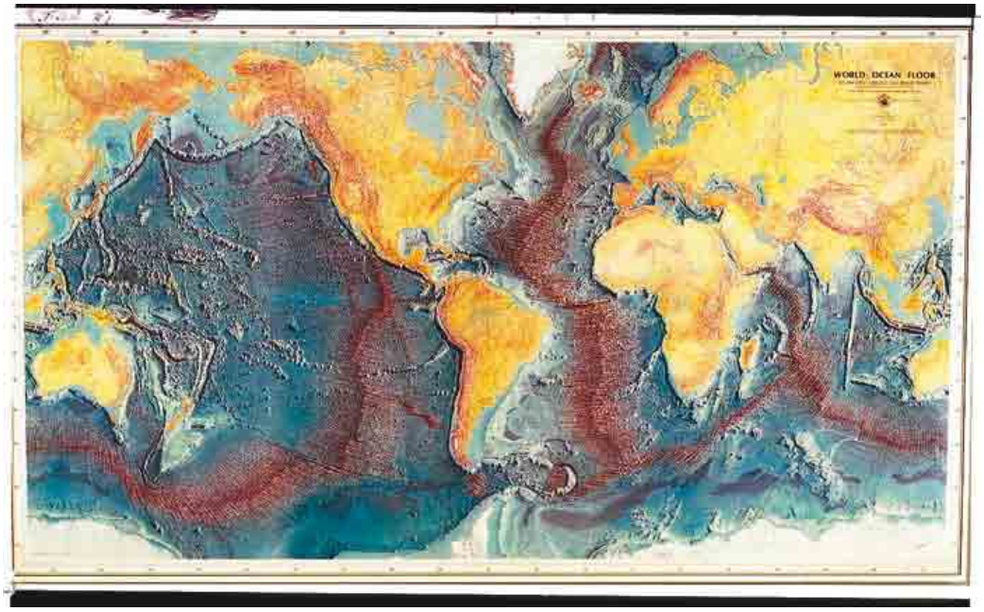
■ بدأت دراسة قاع المحيط في الحربين العالميتين الأولى والثانية باستخدام الأجهزة الصوتية التي بدأت بقياس عمق المحيط عن طريق قياس الزمن الذي تستغرقه إشارة صوتية من السفينة إلى قاع المحيط ثم تعود. لقد دلت الإشارات إلى أن قاع المحيط ذو تضاريس أكثر مما هو متوقع.

الشّكل 15.22

هاري هيس(Harry Hess) (1906-1969). ساعدت فرضية هيس عن توسع قاع المحيط في عمل تصور لآلية فرضية فيجنر في انجراف القارات.

ومع اكتشاف طبوغرافية قاع المحيط في حوض المحيط الأطلسي، أجريت عملية مسح مختلفة على حوض المحيط الهادي- شدة المجال المغناطيسي الأرضي. لقد وجدت الدراسات المغناطيسية على قاع المحيط مجموعة من الأحزمة- ذات شدة مغناطيسية قوية وضعيفة متبادلة. فقد وجد أن هذا الشكل المتبادل الذي يشبه الحمار الوحشي يمتد متوازيًا وموازيًا للشواطىء. ثم وجدت أنماط أخرى مشابهة من الأحزمة المتبادلة القوة في أجزاء أخرى من المحيط. ومع اكتشاف انهدام وسط المحيط، رجع هيس إلى بياناته التي جمعها في السنين الماضية، حيث اقترح عام 1960 أن قاع المحيط لا يبقى على حاله دائمًا، ولكنه يتجدد بشكل مستمر.

* تذكّر نطق الانهدام التي تشكلت عند انقسام بنجايا في أثناء حقب الحياة المتوسطة. تصاحب الأنشطة البركانية تكوّن نطق الانهدام.

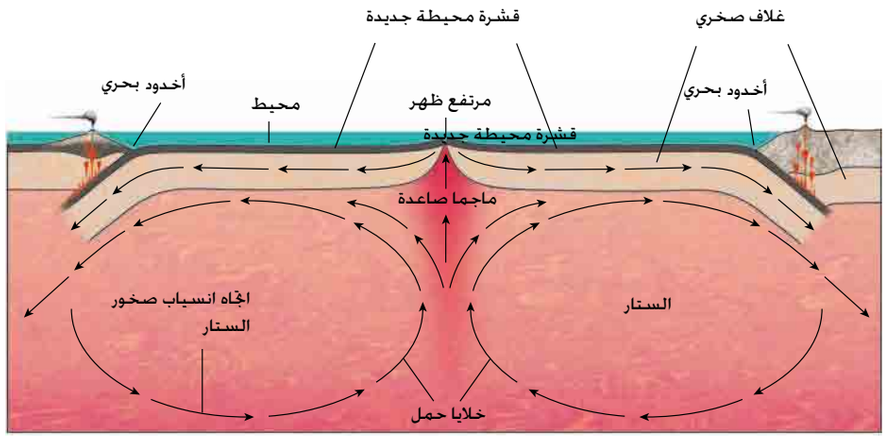


الشّكل 16.22
قام رسّاما خرائط البحار Marie Tharp and Bruce Heezen برسم خريطة تفصيلية للمحيط على مقياس عالمي. اعتمادًا على قراءات جهاز الموجات الصوتية، تُظهر الخريطة وجود سلاسل جبلية كبيرة (المناطق البنية) في وسط المحيطات، ووجود أخاديد بحرية عميقة بالقرب من بعض القارات

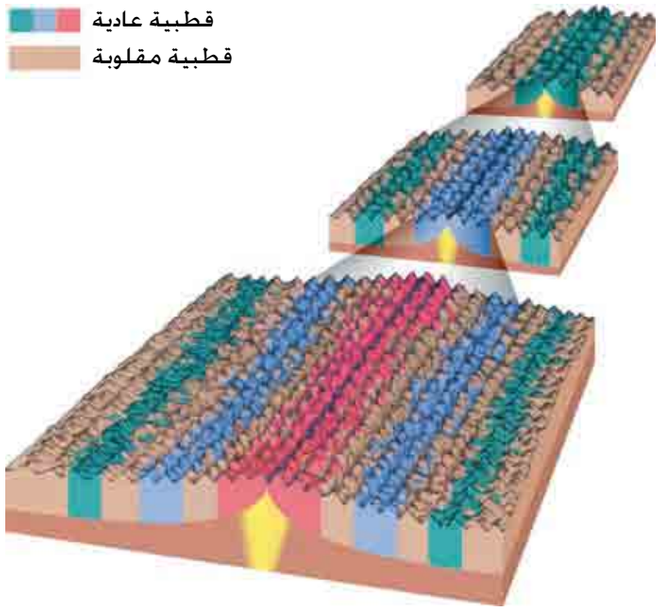
الشّكل 17.22
يمتد ظهر وسط المحيط الأطلسي على طول وسط المحيط. تظهر أعلى قمة له في عدة أماكن فوق سطح الماء مشكلة جزرًا مثل أيسلندا. تبين هذه الصورة نطاق انهدام متكشف في أيسلندا.

لقد افترض أن المرتفعات المحيطة موجودة فوق تيارات حمل صاعدة في الستار. ومع ارتفاع مادة الستار إلى الأعلى، يتكون غلاف صخري جديد. يتم استهلاك الغلاف الصخري القديم في الأخاديد البحرية العميقة بالقرب من حوافّ القارات. لذا فإن غلافًا صخريًّا جديدًا يتكون عند مركز التوسع، أما الغلاف الصخري القديم فيبتعد عن قمة المرتفع حتى يتم في النهاية استهلاكه في الستار في أخاديد بحرية عميقة (الشكل 18.22). سمى هيس هذه الفرضية **توسع قاع المحيط (*Seafloor spreading*)**.

في عام 1962، بدأت الدراسات المغناطيسية لحوض المحيط الأطلسي بنتائج مشابهة للنتائج التي عثر عليها في المحيط الهادي. قام جيولوجيان بريطانيان هما فاين وماثيوس بتركيب فرضية هيس لتوسع قاع المحيط وبياناتهما المغناطيسية الحديثة. لقد افترضا أنه مع اندفاع البازلت الجديد في منطقة مرتفع ظهر المحيط، فإنه يتمغنط اعتمادًا على المجال المغناطيسي السائد. لذا فإن الدراسات المغناطيسية لقاع المحيط لم تعتمد فقط على شدة المغناطيسية، بل على اتجاهها أيضًا. تشير الأحزمة المتبادلة الموازية لجانبي ظهر المحيط إلى فترات قطبية عادية، وأخرى مقلوبة (الشكل 19.22). كما في عملية تسجيل شريط مغناطيسي بطيء، ثم تسجيل التاريخ المغناطيسي للأرض في قيعان المحيطات المتوسعة. ولأن انقلاب المغناطيسية يمكن معرفته، فإن النظام المغناطيسي في قاع المحيط المتوسع يوثق عمر ومعدل قاع المحيط.



الشّكل 18.22
يتكون غلاف صخري جديد عند مرتفع ظهر المحيط (يسمى أيضًا مركز التوسع) ويتم استهلاك الغلاف الصخري القديم في الغلاف اللدن عند الأخاديد البحرية العميقة.



الشّكل 19.22
مع خروج مادة جديدة عند ظهر المحيط (مركز التوسع)، فإنها تتمغنط بحسب المجال المغناطيسي السائد. أشارت الدراسات المغناطيسية إلى وجود حُزُم متبادلة من مغناطيسية عادية ومقلوبة متوازية، وموازية لظهر المحيط. وكالتسجيل على شريط مغناطيسي بطيء، فإن التاريخ المغناطيسي للأرض تم تسجيله على قاع المحيط المتوسع.

أقنعت المساهمات التي قدمها كلّ من ثارب، وهيزن، وفاين، وماثيوس، وآخرون المجتمعَ العلمي على أن توسع قاع المحيط وانجراف القارات يجب أن تكون حقيقية موجودة. قدمت فرضية هيس لتوسع قاع المحيط الآلية التي شرحت انجراف القارات. لقد كان الوقت مناسبًا لاتباع المبادئ الجديدة التي شكلت ثورة. أدى امتداد الرأي العلمي هذا إلى الاقتناع بأن الأرض متحركة.

5.22 نظرية تكتونية الصفائح

تفسر **تكتونية الصفائح** حركة الغلاف الصخري للأرض التي أنشأت أحواض المحيط والسلاسل الجبلية وحزم الزلازل، ومظاهر كبيرة أخرى على سطح الأرض. تنص نظرية تكتونية الصفائح على أن الغلاف الصخري، مقسم إلى ثماني صفائح كبيرة نسبيًّا، وعدد من الصفائح الصغيرة (الشكل 20.22). وبما أن هذه الصفائح تطفو فوق الغلاف اللدن، لذا فإن فرضية فيجنر لانجراف القارات كانت على المسار الصحيح. إن القارات تتحرك.. إنها تتحرك لأنها جزء من الصفائح التكتونية المتحركة.

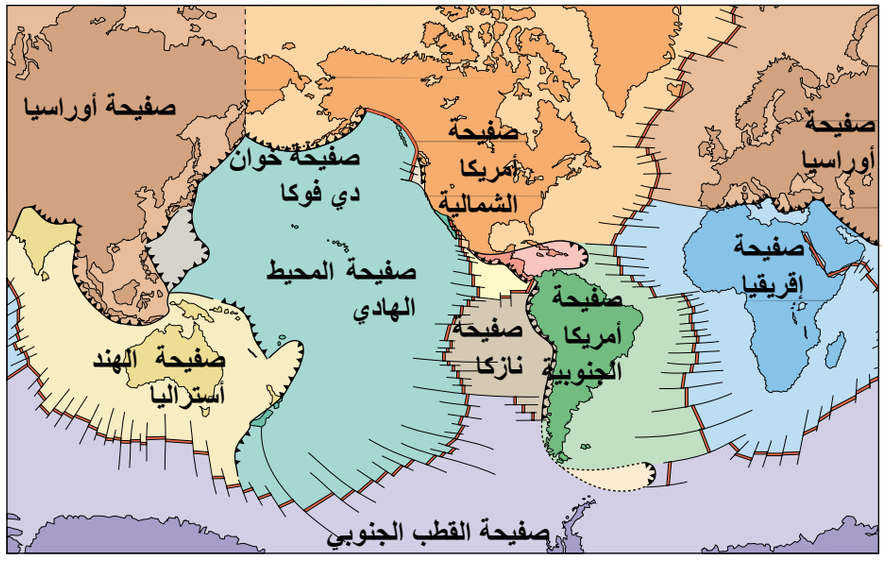
تتحرك صفائح الغلاف الصخري استجابة لتدفق الحرارة من باطن الأرض. تذكّر من الفصل 7 أن الحرارة تنتقل من المناطق الدافئة إلى المناطق الباردة. داخل الأرض، تتحرك الحرارة من اللب والستار إلى القشرة الباردة. يوصل اللب كميات ضخمة من الحرارة إلى الستار، حيث تتدفق معظم الحرارة في الستار نتيجة لتيارات الحمل، وتكون صفائح الغلاف الصخري الجزء العلوي من خلايا تيارات الحمل.

تتحرك صفائح الأرض في اتجاهات مختلفة وبسرعات مختلفة أيضًا، تتراوح بين 2سم إلى 15 سم كل سنة. تتحرك الصفائح المحيطية مثل صفيحة الهادي بصورة أسرع من تحرّك الصفائح التي تحمل القارات كصفيحة أمريكا الشمالية. تتحرك الصفائح مبتعدة بعضها عن بعض، تصطدم، تندمج وتنفصل خلال الزمن الجيولوجي. وبسبب هذه التفاعلات بين الصفائح، فإن حوافها، *حدود الصفائح*، تكون مناطق أنشطة جيولوجية شديدة (الشكل 21.22). وفي حين يكون الهدوء داخل الصفائح نسبيًّا، فإن معظم الزلازل، والبراكين، وبناء الجبال يحدث عند التقاء هذه الصفائح. وهناك ثلاثة أنواع من حدود الصفائح.

لمعلوماتك

- توجد ثلاث معلومات محفوظة في السجل المغناطيسي هي: (1) قطبية المجال المغناطيسي الأرضي زمن تكون الصخر. (2) الاتجاه إلى القطب المغناطيسي من مكان الصخر في زمن تكونه. (3) خط العرض المغناطيسي لموقع الصخر زمن تكونه. عند معرفة خط العرض المغناطيسي واتجاه القطب المغناطيسي فإن موقع القطب المغناطيسي زمن تكون الصخر يمكن معرفته.

إذا توسع قاع المحيط، فعلى القارات التحرك.



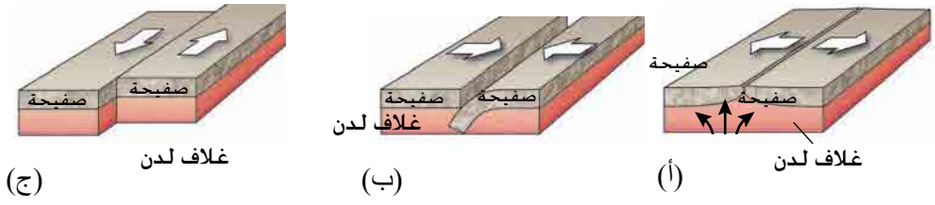
الشّكل 20.22
الغلاف الصخري مقسم إلى ثماني صفائح كبيرة وعدد من الصفائح الصغيرة.

(أ) حدود متباعدة: *تتحرك الصفائح مبتعدة بعضها عن بعض.*
(ب) حدود متقاربة: *تتحرك الصفائح مقتربة بعضها من بعض.*
(ج) حدود جانبية (تحويلية): *تتحرك الصفائح بعضها بجانب بعض.*

حدود الصفائح المتباعدة (Divergent plate boundaries)

تعمل خلايا تيارات الحمل الناجمة عن الحرارة في الستار على شكل دائرة مع تماثل بين الخلايا المتجاورة. الأماكن التي تصل فيها الأجزاء المرتفعة من خليتي تيارات حمل إلى السطح هي أماكن تباعد الصفائح بعضها عن بعض. وقوة الشد هي القوة السائدة في منطقة تباعد الصفائح. مراكز التوسع هذه هي **حدود الصفائح المتباعدة** (الشكل 21.22أ). في منطقة الحدود المتباعدة، يكون الغلاف اللدن قريبًا جدًّا من السطح. أما الغلاف الصخري فيكون رقيقًا جدًّا.*

تحدد ظهور وسط المحيطات مواقع معظم حدود الصفائح المتباعدة. فعلى قمة الظهر، تدفع الجاذبية الصفائح بعيدًا عن الحدود المتباعدة.



الشّكل 21.22
حدود الصفائح هي مناطق نشاط جيولوجي شديد، كما أنها مناطق تكون غلاف صخري واستهلاكه. تنقسم الحدود اعتمادًا على طبيعة الحركة إلى ثلاثة أنواع هي: أ- حدود متباعدة ب- حدود متقاربة جـ- حدود جانبية (تحويلية)

* نظريًا: يكون سمك الغلاف الصخري صفرًا عند الموقع الذي تتباعد فيه الصفائح بالضبط، ويكون الغلاف اللدن على السطح.

فكّر في طبوغرافية قاع المحيط- توجد أعلى الارتفاعات عند ظهور وسط المحيطات. تعدّ منطقة الظهر مرتفعة مقارنة بقاع المحيط بسبب الدفع إلى أعلى والناتج عن صخور الستار المرتفعة نحو الأعلى. وبسبب الاختلاف في الارتفاع بين الظهر وباقي قاع المحيط المجاور، فإن الجاذبية تؤدي إلى انزلاق الصفيحة نحو الأسفل بعيدًا عن ظهر وسط المحيط، كانزلاق قطعة حلوى عن سطح مائل.

تنتج الماجما المتكونة من الانصهار الجزئي لصخور الستار المدفوعة إلى الأعلى بفعل تيارات الحمل الصاعدة. ويحدث الانصهار بسبب انخفاض الضغط على هذه الصخور لأنها قريبة من السطح. تتدفق اللابة البازلتية عند تباعد الصفائح، فتملأ جزئيًّا نطاق الانهدام بين الصفائح المتباعدة. وعندما يبرد البازلت يصبح قشرة محيط جديدة. ومع استمرار تباعد الصفيحتين إحداهما عن الأخرى، فإن صخور الستار تحت القشرة الجديدة في أعلى الغلاف اللدن تبرد وتتصلب. ومع مزج هذا الجزء بالقشرة المتكونة حديثًا أعلى منه، يتكون غلاف صخري جديد يتحرك ببطء مبتعدًا عن مركز التوسع، فيبرد وينكمش ويصبح أكبر كثافة. إن الغلاف الصخري المحيطي قليل السمك وحديث بالقرب من مركز التوسع. ومع زيادة المسافة، يصبح الغلاف الصخري أكثر سمكًا وأكبر عمرًا- بشكل متماثل على كلا جانبي ظهر المحيط.

إن مرتفع ظهر وسط المحيط الأطلسي هو الحدود المتباعدة بين صفائح أمريكا الشمالية وأوراسيا في شمال الأطلسي من جهة وصفائح أمريكا الجنوبية وإفريقيا في جنوب الأطلسي من جهة أخرى. يتراوح معدل توسع ظهر المحيط الأطلسي بين 1-6 سم/ سنة. قد يبدو هذا المعدل بطيئًا، ولكن مع الزمن، فإن التأثير ضخم جدًّا. فخلال 190 مليون سنة الماضية، توسع قاع المحيط بتحويله من مجرى مائي صغير بين إفريقيا، وأوربا، وأمريكا الشمالية، وأمريكا الجنوبية إلى المحيط الأطلسي الذي نراه اليوم.

لا تنحصر مراكز التوسع في قيعان المحيطات، ولكنها تتطور أيضًا على اليابسة. إذا صعدت صخور حارة من باطن الأرض تحت كتلة قارية محدثة قوة شد في قشرة الأرض، فسيؤدي هذا إلى تمدد القشرة وتقوسها إلى الأعلى.

لمعلوماتك

- معدل التوسع في المحيط الأطلسي هو 2.5 سم/ سنة تقريبا أو 25 كم/ مليون سنة. قد يبدو هذا المعدل بطيئًا، لكن 2.5سم/ سنة خلال 100-200 مليون سنة تتراكم. حيث تكوّن المحيط الأطلسي في حقب الحياة المتوسطة على شكل مجرى مائي صغير، ومن ثم تحول إلى المحيط الشاسع الذي نراه اليوم.

حساب العلوم الطبيعية

حساب عمر المحيط الأطلسي

إذا استطعت حساب معدل توسع قاع المحيط ومعرفة عرضه، فيمكنك حساب عمر قاعه. إن عرض المحيط الأطلسي بين أمريكا وإفريقيا هو 4830 كم أو $10^8 \times 4.8$سم. لنفترض أن معدل توسع المحيط الأطلسي ثابت 2.5 سم/ سنة خلال الزمن الجيولوجي. عندها يمكننا تطبيق المعادلة المعروفة التي تربط بين كل من السرعة، والمسافة، والزمن.

الزمن=المسافة/السرعة

=(4.8×10^8 سم)/(2.5سم/سنة)

= $10^8 \times 1.92$سنة

~190 مليون سنة

واستنادًا إلى هذه الحسابات فإن عمر المحيط الأطلسي 190 مليون سنة.

مسألة

البحر الأحمر حاليًا هو بحر ضيق موجود فوق حدود متباعدة. بدأت الصفائح بالابتعاد بعضها عن بعض في أثناء الأوليجوسين قبل 30 مليون سنة. من خلال معرفة العمر والعرض، احسب معدل سرعة التوسع.

الحل:

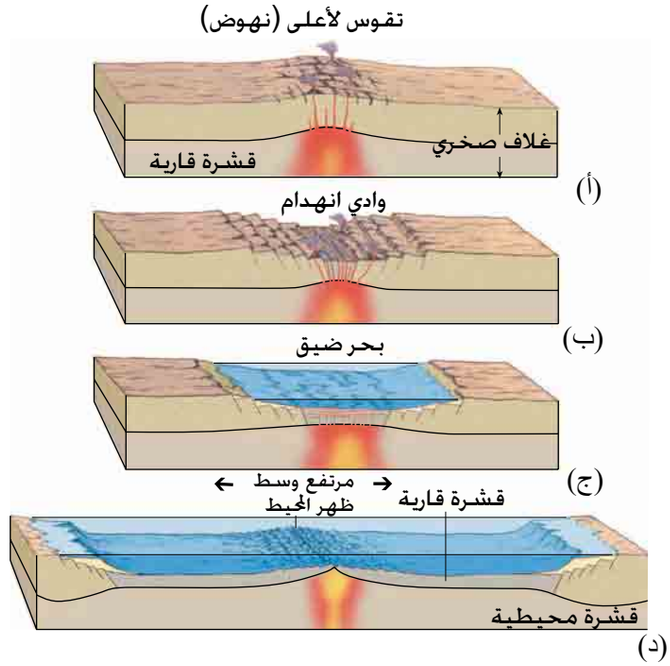
إذا علمنا أن عرض البحر الأحمر 300كم ، وأن بداية التوسع هي 30 مليون سنة، فإن سرعة توسع قاع البحر الأحمر تكون:

السرعة= المسافة/الزمن

=(3.0×10^7 سم)/(3.0×10^7 سنة)

= 1 سم/ سنة

وبناءً على هذا المعدل، فإن عرض البحر الأحمر سيحتاج إلى 400 مليون سنة ليصبح كعرض المحيط الأطلسي. غير أن الأرض ديناميكية ودائمة التغير، وقد يتغير معدل التوسع. فمثلاً، توسع الانهدام الإثيوبي بمقدار 8م في عام 2006! وفي الوقت نفسه اندفعت 2.5 كم^3 من الماجما في القشرة (ما يكفي لملء 200 ملعب كرة قدم)! الأرض متغيرة.



الشّكل 22.22

تكون حفرة انهدام وتطورها إلى حوض محيط. (أ) تعمل الماجما المرتفعة على دفع القشرة القارية نحو الأعلى، مما يؤدي إلى تشقق السطح. (ب) تتكون حفرة الانهدام مع تباعد القشرة. إن الانهدام العظيم في شرق إقريقيا هو اليوم في هذه المرحلة. (الجانبان في الانهدام يتباعد أحدهما عن الآخر بسبب وجودهما فوق خلايا تيارات حمل في الستار لها الشكل الظاهر نفسه في الشكل 18.22. (جـ) يدخل الماء من المحيط مع انخفاض الانهدام تحت مستوى البحر مكونًا بحرًا ضيقًا. (د) ومع مرور ملايين السنين، يتسع الانهدام ويصبح حوضًا محيطيًّا.

تتكون فجوات في القشرة. وتنزلق قطع صخرية كبيرة ومن ثمّ تغوص في هذه الفجوات. تسمى الأودية الخسفية الكبيرة الناتجة عن هذه العملية **انهدامًا** أو *أودية انهدام* (الشكل 22.22). الانهدام العظيم في شرق إقريقيا مثال على هذا المظهر. وإذا استمر التوسع، فإنه قد يكون بداية نشأة حوض محيطي.

حدود الصفائح المتقاربة (Convergent plate boundaries)

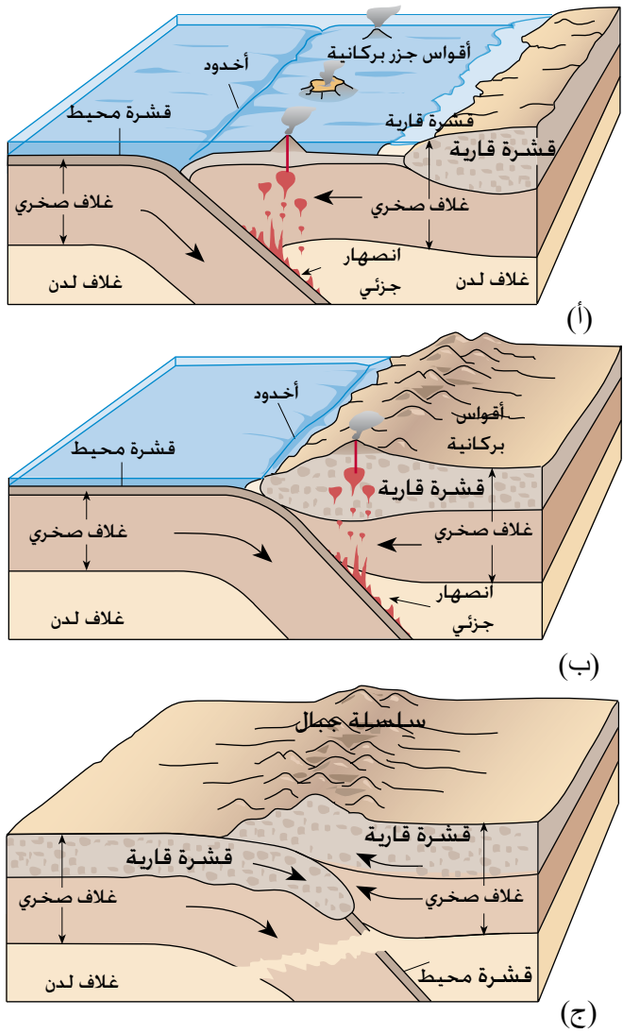
كما يشير الاسم، توجد الحدود المتقاربة عندما تتقارب الصفائح بعضها من بعض. مناطق الحدود المتقاربة هي مناطق قوى تضاغط. واعتمادًا على طبيعة تفاعل الصفائح؛ فهي مناطق استهلاك للغلاف الصخري أو هدم له. كما أن مناطق تصادم الصفائح هي مناطق بناء الجبال أيضًا. يعتمد نوع التقارب- أو التصادم البطيء- على نوع الغلاف الصخري الموجود. وتنقسم الحدود المتقاربة إلى ثلاثة أنواع هي:

- تقارب محيطي- محيطي (الشكل 23.22 أ).
- تقارب محيطي- قاري (الشكل 23.22 ب).
- تقارب قاري- قاري (الشكل 23.22 جـ).

في *التقارب المحيطي- المحيطي*، فإن لكلا الصفحتين مقدمة محيطية. عندما تتقارب صفيحتان من هذا النوع، فإن الصفيحة المحيطة الأكبر عمرًا (ومن ثم أبرد وأعلى كثافة) تنزلق أسفل الصفيحة المحيطة الأصغر عمرًا وأقل كثافة. تسمى العملية التي تنزلق فيها صفيحة تحت أخرى **غوصًا** أو **طرحًا**. وتسمى المنطقة التي يحدث فيها الطرح *نطاق الغوص*. من العلاقات المميزة لنطق الغوص على سطح الأرض وجود الأخاديد البحرية التي تمتد طوليًّا بموازاة حواف الحدود المتقاربة. ويعدّ أخدود مريانا مثالًا على هذا؛ حيث تلتقي فيه صفيحة الهادي مع صفيحة الفلبين بطيئة الحركة. وهذا الأخدود هو أعمق مكان على قشرة الأرض حيث ينخفض 11 كم تحت سطح البحر. إذا وضعنا جبل إفرست، وهو أعلى قمة في الأرض، في أخدود مريانا فإنه سيبقى أكثر من 1 كم من الماء فوق الجبل.

لمعلوماتك

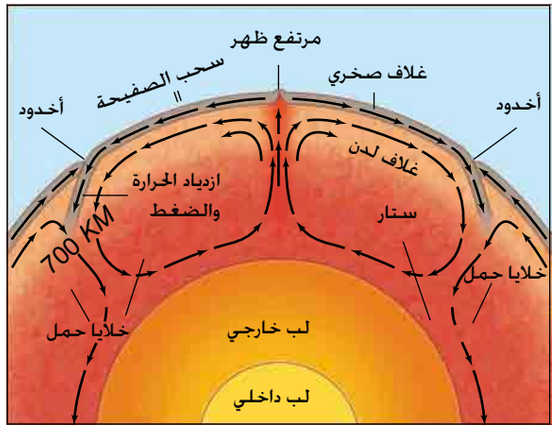
- لقد قامت عمليات التوسع في شرق إقريقيا بفصل السعودية عن إقريقيا مشكلة البحر الأحمر. لذا فإن شرق إقريقيا قد يكون مكان المحيط الرئيس التالي. يعتقد الجيولوجيون أنه إذا استمر التوسع فإن حافة إقريقيا الحالية ستنفصل كليًّا، وسوف تتدفق مياه المحيط الهندي على المنطقة جاعلة القرن الإفريقي جزيرة كبيرة.



الشّكل 23.22
أنواع الحدود المتقاربة الثلاثة:
(أ) محيطي – محيطي , (ب) محيطي – قاري , (ج) قاري- قاري

تعد عملية الغوص جزءًا مكملًا لتيارات الحمل في الستار. يعمل كل جزء من الصفيحة على التحكم في الجزء الهابط من تيارات الحمل. سحب الصفيحة. حيث تسحب الجاذبية الطرف الأقدم (ومن ثم الأبرد والأكبر كثافة) من الصفيحة الغاطسة إلى باطن الأرض. وتعد القوة الرئيسة المحركة للصفائح. يجري سحب باقي الصفيحة نحو الأخدود من خلال غوص المقدمة الغاطسة. كلما زاد طول نطاق الغوص زاد الوزن الذي يجب سحبه في باقي الصفيحة الغاطسة. ومن ثم. فإن نطق غوص طويلة يعني صفائح متحركة بسرعة أكبر. يمكنك تصور سحب صفيحة إلى الغلاف اللدن كسحب غطاء طاولة ببطء عن الطاولة (الشكل 24.22).

تشجع عملية الغوص نشوء الماجما وتكون البراكين على قاع المحيط. تكون الصفيحة الغاطسة المغطاة بالرسوبيات مشبعة بماء البحر. وعندما تسخن الصفيحة الرطبة في أثناء غوصها إلى أسفل. فإن السوائل (غالبًا بخار الماء وثاني أكسيد الكربون) ترتفع وتتفاعل مع الجزء من الستار المحصور بين الصفيحتين (الشكل 23.22 أ). تؤدي السوائل المرتفعة نحو الأعلى إلى خفض درجة انصهار الصخور. مما يؤدي إلى انصهار جزئي. وتكوّن ماجما بازلتية. ترتفع الماجما. وتتكون حجرات من الماجما البازلتية في القشرة. وعندما تصل الماجما قاع المحيط. تتكون براكين تحت البحر تبدأ عادة بلابة بازلتية. ولكن مع تبلور الماجما البازلتية التي تتدفق. يحدث إثراء لتركيز السليكا (الفصل 20) فيتغير تركيب الماجما.



الشّكل 24.22
صورة مبسطة لخلايا تيارات الحمل داخل الستار ترى سحب الصفيحة. الجزء الغاطس من الصفيحة يسخن، ولكنه لا ينصهر بارتفاع الضغط والحرارة مع ازدياد العمق في الستار. تكون الصفيحة الغاطسة موضع تحوّل شديد.

قد يحدث بعض الانصهار الجزئي لقشرة المحيط البازلتية أيضًا، وهذا يساهم في إثراء الماجما بسليكا أكثر. تبدأ البراكين عندها باندفاعات ماجما أنديزيتية تؤدي إلى زيادة ارتفاع البراكين. وفي النهاية تصل البراكين سطح البحر كسلسلة من الجزر تسمى أقواس جزر بركانية. يزداد حجم الجزر وارتفاعها مع الزمن بسبب استمرار النشاط البركاني. شكلت مثل هذه الأقواس جزر ألاسكا، وجزر ماريانا، ومجموعة جزر التونجو في جنوب المحيط الهادي، إضافة إلى نظام الأقواس البركانية في شبه جزيرة ألاسكا، والفلبين، واليابان.

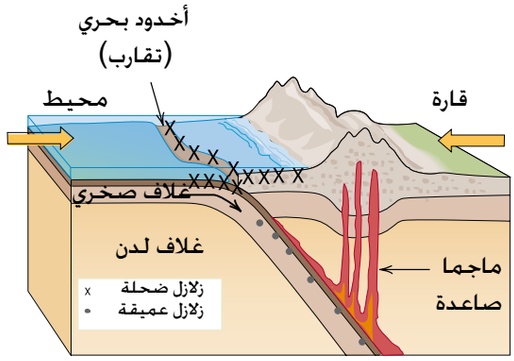
أما النوع الثاني من التقارب فهو *التقارب المحيطي القاري* (الشكل 23.22ب). وفيه، تقترب صفيحة ذات نهاية قارية مع صفيحة ذات نهاية محيطية. وبما أن الصفيحة المحيطية ذات كثافة أكبر، فإنها تغوص تحت الصفيحة القارية الأقل كثافة. يتشكل أخدود بحري عميق في البحر عند التقاء الصفائح المتقاربة. وكما هو الحال في التقارب المحيطي- المحيطي، تتكون ماجما. ولكن بما أنها ترتفع خلال القشرة القارية الأكبر سمكًا، فإنها تأخذ وقتًا أطول مما يسمح بالتبلور والإثراء بالسليكا. ومع ارتفاع الماجما خلال الصفيحة القارية العليا، يتم إدخال كميات من القشرة القارية داخل الماجما مما يؤدي إلى زيادة إثرائها بالسليكا. وتؤدي هذه الإثراءات إلى تكون ماجما تتراوح بين إنديوبتية إلى جرانيتية/ ريوليتية. إن معظم اللابة المتدفقة هي أنديزيتية، ويكون الثوران شديدًا وعنيفًا. لا تثور معظم الماجما الجرانيتية بل تتصلب في باطن الأرض لتكون صخرا جرانيتيا جوفيًّا. ولكن في مراحل أخرى، قد يثور البركان وينفث الريوليت.

وفي غرب أمريكا الجنوبية، تكوّنت جبال الأنديز بالطريقة نفسها من تقارب محيطي- قاري. ولكن هناك عملية أخرى ساهمت في الارتفاع المستمر لجبال الأنديز. فمع استمرار غوص صفيحة نازكا تحت أمريكا الجنوبية، تُجلب الرسوبيات البحرية التي تراكمت على صفحية نازكا إلى الأخدود. تُكشط هذه الرسوبيات وتوضع على الجذور الجرانيتية لجبال الأنديز. تصبح المادة التي كُشطت ملتصقة بصفيحة أمريكا الجنوبية مما يزيد سمك الجبال، ويساعدها على الارتفاع بسرعة أكبر من معدل تعريتها. أما بقايا سلسلة البراكين الأصلية، فتتكون من الباثوليت والصخور المتحولة المتكشفة على حواف جبال الأنديز على الشاطىء الغربي لأمريكا الجنوبية.

يمكن رؤية مثال على هذا النشاط البركاني في غرب الولايات المتحدة في السيرانيفادا التي هي سلسلة بركانية قديمة، وفي سلسلة كاسكيد كسلسلة نشطة حاليًّا. نتجت السيرانيفادا من غوص صفيحة فرالون القديمة تحت صفيحة أمريكا الشمالية. إن باثوليت السيرانيفادا هو بقايا سلسلة البراكين الصلبة. أما سلسلة سواحل كاليفورنيا فهي بقايا الرسوبيات التي تراكمت في الأخدود.

الشّكل 25.22

تصبح الزلازل عند نطاق الغوص أعمق كثيراً عن هذا النطاق.



تكونت سلسلة كاسكيد من غوص صفيحة جون دي فوكا (قطعة من صفيحة فرالون القديمة) تحت صفيحة أمريكا الشمالية. وتضم براكين جبل راينر، وجبل شاستا، وجبل سانت هيلينز. لقد أثبت ثوران بركان سانت هيلنز عام 1980 إلى أن سلسلة كاسيد ما زالت نشطة.

كما يمكن أن تتوقع، فإن مناطق الأخاديد العميقة الناجمة عن تقارب محيطي- محيطي أو محيطي- قاري هي مناطق نشاط زلزالي عنيف. توجد الزلازل على طول نطق الغوص بسبب طحن الصفيحة الغاطسة من الصفيحة العليا. وتصبح الزلازل أعمق في اتجاه منطقة الغوص (الشكل 25.22)

أما النوع الثالث من التقارب وهو قاري- قاري، فيحدث عندما يكون للصفائح المتقاربة قشرة قارية في مقدمتها. في هذه الحالة، تتكون القشرة المتقاربة من النوع نفسه من الصخور الجرانيتية الطافية بطبعها. ولأن الصخور في القشرتين لهما الكثافة نفسها، فلا تغوص أيّ من الصفيحتين تحت الأخرى عند التصادم، أي لا يوجد هناك غوص. بل إن التقارب بين صفيحتين قاريتين هو تصادم (شكل 23.22 جـ). يؤدي الضغط إلى تكسير الصفائح وطيّها بعضها فوق بعض بحيث يجعل القشرة سميكة. يعد وجود صخور مضغوطة ومتحولة بشدة علامة على التقاء الصفائح القارية. وبالمقارنة مع تقارب محيطي- محيطي، أو محيطي – قاري، فإن النشاط البركاني لا يعد مميزًا في التقارب القاري- القاري، ولكن هناك زلازل.

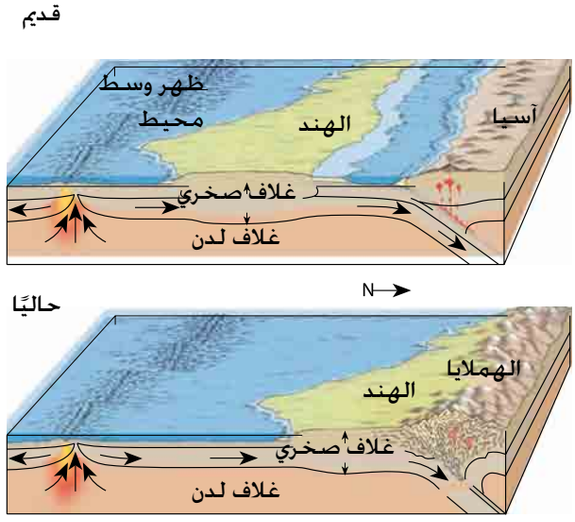
ينتج التصادم بين صفائح قارية بعض السلاسل الجبلية المشهورة مثل الهملايا، أعلى سلسلة جبلية في العالم. لا تزال هذه السلسلة ترتفع إلى الأعلى مع استمرار تصادم الهند مع آسيا (شكل 26.22). تكونت جبال الألب في أوربا بالطريقة نفسها عندما تصادم جزء من صفيحة إفريقيا مع صفيحة أوراسيا قبل 40 مليون سنة. استمر الضغط الشديد بين الصفيحتين، وهو يعمل على إغلاق البحر المتوسط ببطء. وفي أمريكا، تكونت جبال الأبلاش من تصادم قاري- قاري وهو الذي أدى في البداية إلى تكون قارة بنجايا.

لمعلوماتك

■ الفرق الرئيس بين تكوّن الماجما في منطقة الحدود المتباعدة والحدود المتقاربة هو المسافة بين مكان نشأة الماجما وسطح الأرض. نشأة الماجما في الحدود المتباعدة قريبة جدًّا من سطح الأرض، لذا تتحرك الماجما البازلتية نحو الأعلى دون عائق. أما في منطقة الحدود المتقاربة فتنشأ الماجما عميقًا في الستار، ويتم اعتراض الماجما الصاعدة من الغلاف الصخري، وهذان العاملان يؤديان إلى زيادة مسافة انتقال الماجما البازلتية المتكونة في الستار إلى السطح. زيادة الزمن تعني تبلورًا أكثر، لذا تكون أنواع مختلفة من الصخور النارية.

الشّكل 26.22

أنتج التصادم القّاري - القّاري بين الهند وآسيا - وما زال ينتج - جبال الهملايا.



الشّكل 27.22
تتكون معظم الحدود التحويلية (الجانبية) في أحواض المحيط، حيث تعمل على إزاحة ظهور المحيط عن بعضها جانبيًّا مثل مرتفع ظهر المحيط الأطلسي.

حدود الصفائح التحويلية (Transform plate boundaries)

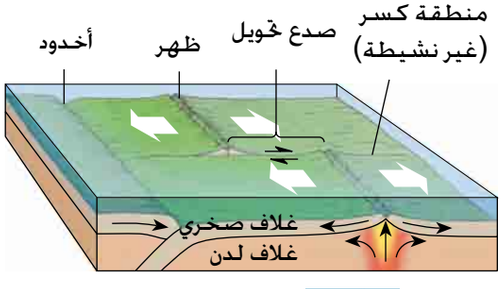
حدود الصفائح التحويلية هي مناطق تنزلق فيها صفيحتان إحداهما بجانب الأخرى أفقيًّا بحيث لا يحدث تقارب ولا تباعد. تسمى منطقة الكسر التي تكوّن الحدود *صدعًا تحويليًّا*. معظم صدوع التحويل موجودة في المحيطات، بحيث تصل الأجزاء المزاحة من ظهر المحيط. انظر إلى ظهر المحيط الأطلسي في شكل 27.22. ولاحظ كيف أنه مكسر إلى قطع. ولكن كل قطعة مزاحة جانبيًّا عن الأخرى، وموصولة بصدع يحول الحركة من قطعة ظهر المحيط إلى الأخرى. في المنطقة المحصورة بين ظهري محيط، يتحرك الغلاف الصخري على أحد جانبي الصدع بعكس الجانب الآخر (الشكل 28.22). هل تستطيع رؤية قطعتي الغلاف الصخري على أنهما على صفيحتين مختلفتين؟ انظر الآن إلى الشكل 28.22 في منطقة الكسر غير النشط. أجزاء الغلاف الصخري على جانبي الكسر هما جزء من الصفيحة نفسها لأنهما يتحركان في الاتجاه نفسه. يتحرك الغلاف الصخري على امتداد صدع التحويل في اتجاهين متعاكسين على جانبيه. هل تستطيع رؤية أن صدع التحويل هو فعليًّا حد صفيحة؟ وهل تستطيع كذلك أن ترى أن مناطق الكسر هي حدود صفائح قديمة؟

لمعلوماتك

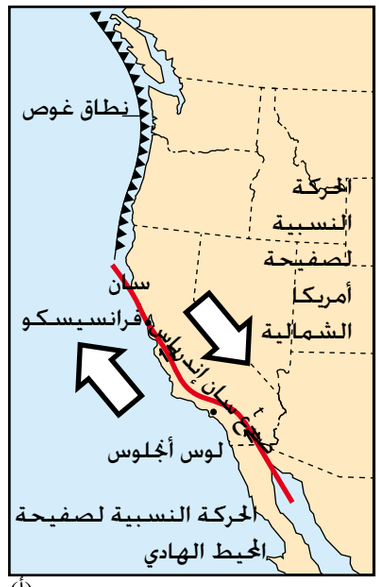
■ كانت قوة زلزال سان فرانسيسكو 1906م 8.2 على مقياس رختر. أدى هذا الزلزال إلى دمار كبير. وقد كان معظم الدمار بسبب الحرائق التي اشتعلت في المدينة بعد الزلزال. وسبب ذلك أن أنابيب المياه الرئيسة تكسّرت جميعها جراء الزلزال، ومن ثم تعذر وجود الماء اللازم لإطفاء النار.

وبسبب عدم وجود ضغط أو شد بين الصفائح، فلا وجود لبناء أو هدم للغلاف الصخري. حدود الصفائح التحويلية هي مناطق أفقية مع عدم حركة أحد الجانبين إلى الأعلى أو إلى الأسفل أحدهما بالنسبة إلى الآخر. وكما سنرى في الدرس التالي، فإن الحركة في الحدود الجانبية هي نفسها في الصدوع المضربية وتسمى أيضًا صدوع التحويل.

ومع أن معظم حدود الصفائح التحويلية قصيرة وموجودة في أحواض المحيطات، فإنه يوجد بعض الصدوع الطويلة مثل سان إندرياس في كاليفورنيا (الشكل 29.2). يمتد صدع سان إندرياس 1500كم من رأس مينودوسينو في شمال كاليفورنيا إلى مرتفع شرق الهادي في خليج كاليفورنيا. تتحرك صفيحة الهادي شمال غرب بمعدل 5سم/ سنة نسبة إلى صفيحة أمريكا الشمالية. يمثّل صدع سان إندرياس 70% من هذه الحركة أو ما يعادل 3.5سم/ سنة. وتحدث باقي الحركة على امتداد صدوع أخرى (مثل صدع هيوارد). يحدث التكسير والبري في أثناء حركة الصفيحتين إحداهما بجانب الأخرى. وعندما تعلق مقاطع من الصفائح معًا ولا تتحرك، يتزايد الإجهاد حتى يتحرر على شكل زلزال.



الشّكل 28.22
تسمح صدوع التحويل لصفيحتين بالانزلاق إحداهما بجانب الزخرى في منطقة انزياح ظهري محيط جانبيًّا.



(أ)

(ب)

الشّكل 29.22

(أ) صدع سان إندرياس هو حدود تحويلية مشهورة بزلازلها. يقع جزء كاليفورنيا الذي يتحرك شمال غرب على صفيحة المحيط الهادي، في حين يقع باقي كاليفورنيا على صفيحة أمريكا الشمالية. (ب) في هذه الصورة لصدع سان إندرياس، لاحظ الوادي الطويل الذي نشأ عن طحن الصخور على امتداد الصدع.

لمعلوماتك

■ تستجيب الصخور بشكل مختلف للإجهاد؛ فبعض الصخور قوية، وبعضها الآخر ضعيف. بعض الصخور تنكسر وبعضها الآخر يتصرف بشكل لدن. تؤثر زيادة الضغط والحرارة والمحتوى المائي في استجابة الصخور للإجهادات. وتؤدي زيادة الضغط إلى تقريب حبات المعدن بعضها من بعض، فيصبح المعدن أقوى وأصعب على الكسر، وأسهل للاستجابة اللدنة. تؤدي زيادة الحرارة إلى زيادة اهتزاز الجزيئات في الصخر، فتقل قوة الصخر وتزداد قدرته على التدفق اللدن. الصخور الرطبة أضعف من الصخور الجافة- يعمل الماء على تشحيم المعدن وزيادة الانزلاق المجهري الذي يساهم في التدفق اللدن. لذا ينساب الصخر الموجود في الأعماق تحت السطح بلدونة، في حين تتكسر صخور السطح.

بتاريخ 18 نيسان (إبريل) 1906، تحركت صفيحة المحيط الهادي 6م شمال غرب على امتداد 434كم من الصدع، محررة الإجهاد المخزن في زلزال سان فرانسيسكو.

■ 6.22 أدلة قارية لتكتونية الصفائح (Continental evidence for plate tectonics)

تؤدي خلايا تيارات الحمل في الستار وسحب الصفيحة إلى حركة بطيئة لصفائح الغلاف الصخري ولكنها مستمرة. يولد التفاعل بين حدود الصفائح إجهادًا على الصخور. وهناك ثلاثة أنواع من الإجهادات تسبب ثلاثة أنواع من الاستجابات هي:

1- *إجهاد تضاغط*: يحدث عندما تندفع كتلتان صخريتان إحداهما في اتجاه الأخرى. وتكون الاستجابة الناتجة تقليصًا في الأجسام الصخرية.

2- *إجهاد شدّ*: يحدث عندما تتأثر كتل الصخور بقوتين متباعدتين عن الجسم. وتكون الاستجابة الناتجة تمددًا في الأجسام الصخرية.

3- *إجهاد قصّ*: يحدث عندما تتعرض الأجسام الصخرية لضغط وشدّ في آن معًا. وتكون الاستجابة الناتجة انزلاق كتلة صخرية بمحاذاة أخرى في اتجاه متعاكس دون تمدد أو تقلص.

تستجيب الصخور لهذه الإجهادات بطرق ثلاثة هي: *التّشوّه المرن* أو *الهشّ* أو *اللدن*. ولا يعني التشوه المرن أنه متمدد، ولكن المادة المرنة هي التي تعود إلى شكلها الأصلي بعد زوال الإجهاد. ويمكن رؤية التشوه المرن من خلال قضيب مطاطي بعد إزالة الإجهاد عنه، حيث يعود إلى شكله الأصلي. إذا انقطع القضيب المطاطي فإنه لا يكوّن قطعًا، هل هذا صحيح؟ فعند تجاوز حد *المرونة*، يحدث تشوه هشّ في مكان أو اثنين . ثم يرتد قضيب المطاط عائدًا إلى وضعه الأصلي (عادة يهز أصابعك). في حين يحدث ارتداد مرن لما تبقّى من المطاط. ولأن الصخور مواد مرنة، فإنها تعود إلى شكلها الأصلي بعد زوال الإجهاد- ما لم يتجاوز حدّ المرونة .

عندما يتجاوز الإجهاد حدّ المرونة للصخر. ينكسر الصخر أو جزء منه ويفقد شكله الأصلي بشكل دائم: فالصخر إما أن ينكسر أو ينساب. يحدث تشوّه هشّ للصخور التي تنكسر . أما الصخور التي تنساب فيحدث لها تشوّه لدن. تعتمد استجابة الصخر للإجهاد عند درجة الحرارة، والضغط، وتركيب الصخر. يحدث التّشوّه الهشّ بالقرب من سطح الأرض عند درجتي حرارة وضغط منخفضين، مما يؤدي إلى تكون الصدوع والكسور في الصخور. يحدث التّشوّه اللدن بسرعة عميقا تحت السطح، حيث الضغط والحرارة مرتفعان. ويؤدي ذلك إلى طيّ الصخر وتدفقه وانسيابه. إن التركيبة الجيولوجية التي نراها على سطح الأرض مثل الطّيّات، والصّدوع، والجبال المصاحبة هي أمثلة على استجابة الصخور لإجهادات تكتونية زادت عن قوة الصخر.

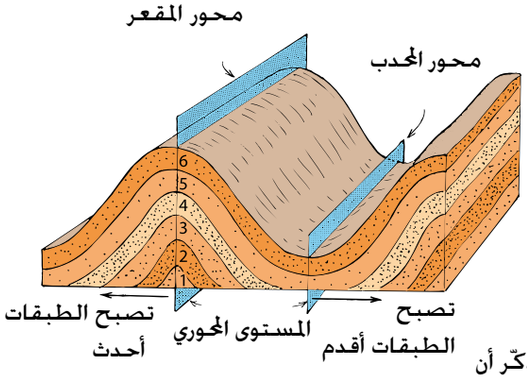
الطّيّات (Folds)

في أعماق القشرة، وتحت ظروف حرارة وضغط مرتفعة، تؤدي إجهادات التضاغط التي تدفع الصخر نحو بعضه إلى الطّيّ. وهو شبيه بالانثناء الذي يحدث في ورقة تدفعها من كلا طرفيها نحو بعضهما. ولثني مقاطع من الصخر، فإنك تحتاج إلى قوى ضخمة تأتي من حركة صفائح الغلاف الصخري. تذكّر أن الرسوبيات قد توضعت أفقيًا طبقة تلو أخرى مع ترسب الطبقة السفلى أولاً. وبالتالي فإن الطبقة السفلى هي الأقدم في الترسيب والعليا هي الأحداث.

في أعماق القشرة، وتحت ظروف حرارة وضغط مرتفعة، تؤدي إجهادات التضاغط التي تدفع الصخر بعضه نحو بعض إلى الطّيّ. وهو شبيه بالانثناء الذي يحدث في ورقة تدفعها من كلا طرفيها أحدهما نحو الآخر.

ولثني مقاطع من الصخر، فإنك تحتاج إلى قوى ضخمة تأتي من حركة صفائح الغلاف الصخري. تذكّر أن الرسوبيات قد توضّعت أفقيًّا طبقة تلو أخرى مع ترسب الطبقة السفلى أولاً. لذا فإن الطبقة السفلى هي الأقدم في الترسيب والعليا هي الأحداث.

ومع تعرض هذه الطبقات الرسوبية، الأفقية أصلاً، إلى إجهاد، فإنها تنثني لتصبح مطويّة. يمكن للصخور أن تنثني إلى الأعلى أو الأسفل. ولكل طيّة محور؛ بحيث تكون الطبقات الصخرية على أحد جانبي المحور مرآة للجانب الآخر. يمكن أن تتخيل المحور على شكل مستوى يمتد نحو باطن الأرض، كما في الشكل 30.22. عندما تنثني الطبقات نحو محور الطّيّة تسمى **طيّة مقعّرة *(Syncline)***. وتكون الصخور في مركز الطّيّة المقعرة هي الأحدث. وكلما ابتعدت أفقيًّا عن مركز الطّيّة تصبح الصخور أقدم فأقدم. أما إذا كانت الطبقات تميل بعيدًا عن محور الطية فتسمى **طيّة محدّبة *(Anticline)***. تكون الصخور في مركز الطية المحدبة هي الأقدم، وبالتوجه أفقيًّا بعيدًا عن المحور، فإن الصخور تصبح أحدث فأحدث. يمكن التفكير بطريقة أخرى. ففي الطّيّ المحدب تتقوس الطبقات نحو الأعلى على شكل قوس أما في الطّيّ المقعر فتتقوس الطبقات نحو الأسفل على شكل حوض.



الشّكل 30.22

طيّات محدبة ومقعرة. طبقة 1 هي أقدم طبقة، و طبقة 6 هي الأحداث. ينثني جناحا المحدب (إلى الأعلى) مبتعدة عن محور الطية (سوف تتدحرج كرة مبتعدة عن محور الطية)، وتكون الطبقات الأقدم في لب الطية. ينثني جناحا المقعر (إلى الأسفل) نحو محور الطية (سوف تتدحرج كرة مقتربة من محور الطية)، وتكون الطبقات الأحدث في لبّ الطّيّة.

■ **نقطة فحص**

لماذا تكون الصخور في مركز الطّيّ المقعر أحدث من الصخور البعيدة عن المركز، في حين يحدث عكس هذا في الطّيّ المحدب؟

هل كانت هذه إجابتك؟

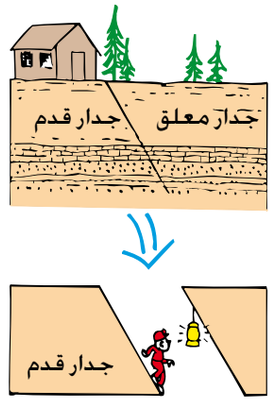
فكر في مثال الورقة. افترض وجود ورقتين إحداهما فوق الأخرى، السفلى أقدم والعليا أحدث. عندما تُدفع الورقتان، فإما أن يكون الانثناء إلى الأعلى أو إلى الأسفل. في الحالة الأولى، تكون الورقة السفلى مركز الطية، أما في الثانية فتكون الورقة العليا هي مركز الطّيّة

الصدوع(Faults)

عندما تكون الإجهادات أقوى من الصخر، والظروف ليست حارّة بما يكفي، أو أن الضغط ليس عاليًا بما يكفي للتشوه اللدن، يحدث تشوه هشّ وينكسر الصخر إلى قسمين. فإذا تحرك قسم بالنسبة إلى الآخر، فعندها يسمى الكسر **صدعًا**. قد تحدث الحركة على طول الصدع فجأة على شكل زلزال أو ببطء مع الوقت.

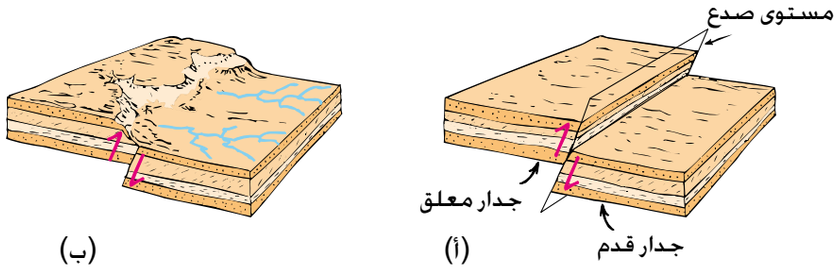
تصنف الصدوع اعتمادًا على الاتجاه النسبي للإزاحة. انظر إلى شكل 31.22 ولاحظ الخط المائل في قمة الرسم. وهذا الخط يمثل الصدع. تخيل أنك تستطيع سحب الرسم من كلا الجانبين على طول الصدع. كما في الشكل السفلي. النصف الذي يحتوي على سطح الصدع الذي يمكن أن يقف عليه أحدهم يسمى الجدار القدم. ولكن سطح الصدع النصفي الآخر مائل. ولا يمكن الوقوف عليه. ويسمى الجدار المعلق. سميت هذه الكتل من قِبَل عمال المناجم؛ لأنه يمكن تعليق ضوء على الجدار المعلق. في حين يمكن الوقوف على *الجدار القدم*. تكون الحركة على هذا النوع من الصدوع نحو الأعلى أو الأسفل- يتحرك الجداران المعلق والقدم عموديًّا على مستوى الصدع.

في الصدع الناتج عن إجهادات تضاغط. يُدفع الجدار المعلق نحو الأعلى على مستوى الصدع نسبة إلى الجدار القدم. كما في شكل 32.22. ويسمى هذا النوع *صدعًا عكسيًّا*. وقد تشكلت جبال الروكي. وجبال الروكي الكندية. وجبال الأبلاش من عملية تصدع عكسية كهذه.



الشّكل 31.22

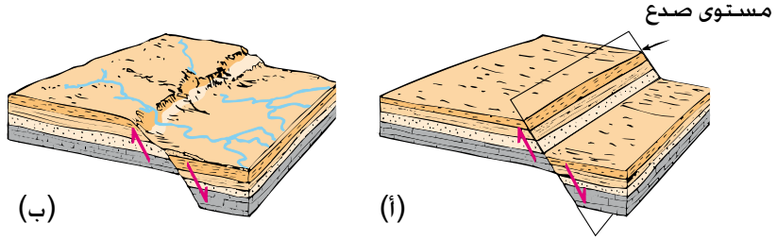
تم استخدام مصطلح *جدار معلق* و*جدار قدم* من قِبَل عمال المناجم لأن أحدهم كان يستطيع أن يعلق المصباح على الجدار المعلق ويقف على الجدار القدم.



الشّكل 32.22

صدع عكسي. في نطاق تصدع تضاغطي، يدفع الجدار المعلق إلى الأعلى بالنسبة إلى الجدار القدم (أ) صدع عكسي قبل التعرية. (ب) صدع عكسي بعد التعرية.

قد تتعرض الصخور لإجهادات شدّ. وتكون إجهادات الشّدّ التي تسحب الصخر معاكسة لإجهادات الضغط. وتؤدي إجهادات الشّدّ إلى نزول الجدار المعلق إلى الأسفل على مستوى الصدع نسبة إلى الجدار القدم فتكوّن صدعًا عاديًّا (شكل 32.22). تقريبًا. تأثرت ولاية نيفادا كلّها. وشرق كاليفورنيا. وجنوب أوريجون. وجنوب أيداهو. وغرب يوتا جميعها بعملية تصدع عادية.



الشّكل 33.22

صدع عادي. في منطقة إجهادات شدّ، ينزلق الجدار المعلق نحو الأسفل نسبة إلى الجدار القدم مشكلاً الصدع العادي. أ) صدع عادي قبل التعرية. ب) الصدع العادي نفسه بعد التعرية.

تسمى الصدوعُ التي تتعرض لحركات أفقية. بحيث تنزلق الكتل بعضها بمحاذاة بعض مع القليل من الإزاحة الرأسية. *صدوعَ المضرب* (الشكل 34.22). ويعدّ صدع سان إندرياس في كاليفورنيا أحد أشهر الصدوع في العالم. وهو صدع مضربي. عندما تعلق كتل الصخور ولا تتحرك. ثم تنزلق على امتداد سان إندرياس (فعليًّا نطاق تصدع). فإن ذلك يولد الزلازل المشهورة بها كاليفورنيا. بما في ذلك زلزال كاليفورنيا الكبير عام 1906م.

■ **نقطة فحص**

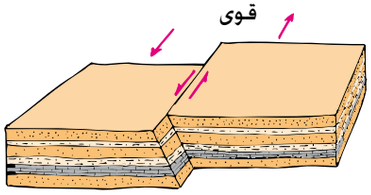
1- الصدوع العكسية هي نتاج قوى تضاغط. ماذا يحدث لقشرة الأرض في منطقة التصدع العكسية؟

2- الصدوع العادية هي نتاج الشد. ما المظاهر السطحية التي تتوقع أن تجدها في منطقة التصدع العادية؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1- تدفع إجهادات الضغط الصخور بعضها نحو بعض. لذا يحدث تقلص في القشرة في بعض مناطق الصدوع العكسية. انظر إلى الشكل 23.22. هل ترى كيف قلّصت قوى الضغط القشرة؟

2- تسحب قوة الشّدّ القشرة متباعدة بعضها عن بعض. لذا في منطقة الصدوع العادية تجد تمددًا للقشرة. انظر إلى الشكل 33.22. هل ترى كيف مدّد الشّدّ القشرة؟



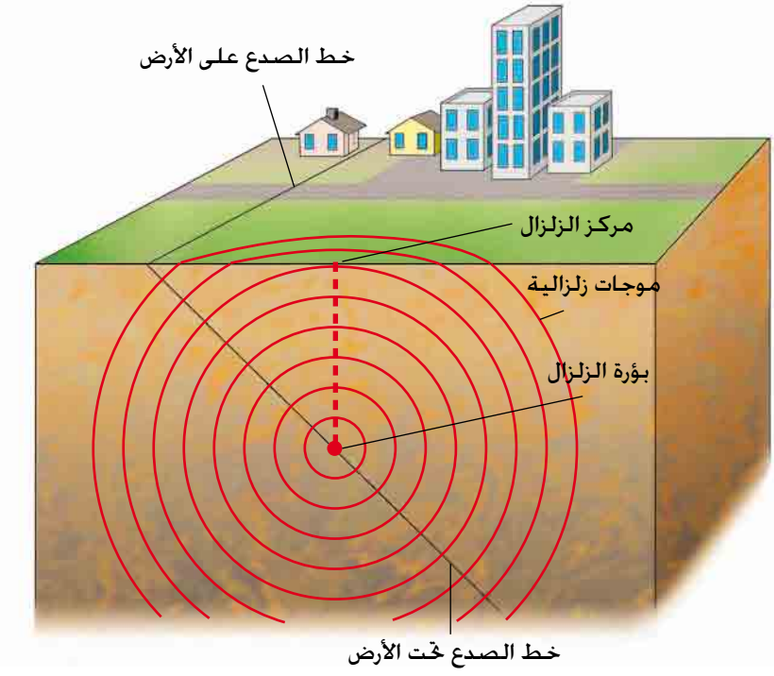
الشّكل 34.22

الحركة النسبية للصدع المضربي أفقية. لا يحدث تقلص أو تمدد للأجسام الصخرية.

الزلازل (Earthquakes)

تنتقل الطاقة المتحررة عن الزلزال على شكل موجات زلزالية في اتجاهات باطن الأرض جميعها. المكان المصدر الذي انزلقت فيه الصخور يسمى بؤرة الزلزال (الشكل 35.22). مع انتقال الطاقة إلى سطح الأرض، فإن الأرض تهتز وتتحرك.

معظم الزلازل مرتبطة بالحركات التكتونية الأرضية. يؤدي التفاعل على حدود الصفائح إلى توليد إجهادات ينشأ عنها استجابة في الصخر. تبدأ الاستجابة على شكل تشوه مرن في الأعماق. ومع زيادة الإجهاد، تقوم الصخور بتخزين الطاقة في الأعماق. وعندما تزداد الطاقة المخزنة عن الحد المرن للصخر، ينكسر الصخر فجأة وينزلق إلى مكان جديد. وعندها يتشكل الصدع. قد يحدث الشيء نفسه على امتداد صدع موجود أصلاً. وللصدوع قوة محددة لمقاومة الانزلاق؛ سطوح الصدوع ليست ملساء. ومن ثم تعلق الصخور على جانبي الصدع. وعندما يتم تجاوز قوة الصخر فإنه ينكسر فجأة.



الشّكل 35.22

البؤرة هي المكان الفعلي حيث يحدث انكسار الصخر. يقع مركز الزلزال مباشرة فوق البؤرة على سطح الأرض. تتجه الموجات الزلزالية في الاتجاهات جميعها مبتعدة عن البؤرة.

قياس الزلزال- مقياسا رختر ومركالي (Richter and mercalli scales)

تحدث مئات آلاف الزلازل سنويًّا. ومع أن معظمها صغير وغير محسوس، إلا أن خطر الزلزال الكبيرة باق. تحدث الزلازل الكبيرة في المناطق النشطة زلزاليًّا كل 50-100 سنة.

مقياس مركالي: يقيس شدة الزلزال بناء على تأثيره في البيئة المحلية. يتراوح المقياس بين 1 (يقاس بصعوبة) إلى شدة 12 (مدمر). تعتمد شدة مركالي في أي موقع على ما يلي: 1) بعد الموقع عن مكان الزلزال. 2) طبيعة المواد تحت السطح في المكان (مثلاً إذا كانت المواد صلبة ورسوبيات غير متماسكة). وهذا المقياس معيار قيم، وبسبب اعتماده على الملاحظة فإنه لا يستطيع قياس حجم الزلزال. لذا طور علماء الزلازل طريقة أدق لتحديد الطاقة المتحررة من الزلزال وهو مقياس رختر الذي يعدّ مقياسًا لمقدار الزلزال؛ فهو يقيس شدة الزلزال بناء على مقدار الطاقة المتحررة ومقدار الاهتزاز الأرضي على بعد معين من موقع الزلزال.

يعتمد مقياس رختر على أكبر سعة لموجة الزلزال المسجلة على جهاز السيزموجراف. المقياس لوغاريتمي. ما يعني أن كل زيادة واحدة على المقياس تعني زيادة 10 أضعاف في اهتزاز الأرض. لذا فإن زلزالًا بقوة 6 يهز الأرض 10 أضعاف زلزال بقوة 5، و 100 ضعف قوة 4.

ولكن كيف يرتبط مقياس رختر بالطاقة المتحررة من الزلزال؟ الطاقة المتحررة لا تقاس فقط من خلال سعة الموجة، ولكنها تقاس أيضا عن طريق ترددها وطولها- توجد الموجات الزلزالية في مدى من السعات، والترددات والأطوال. ومن خلال دراسة متأنية لأمور الزلزال والصدوع، وجد العلماء أن الطاقة المتحررة من زلزال تزداد 30 مرة مع كل زيادة رقم على مقياس رختر. فمثلاً، زلزال ألاسكا عام 1964م كانت درجته 9.2 وقد حرر 30 ضعف الطاقة، وهز الأرض 10 أضعاف زلزال طوكيو عام 1923 الذي قو=ته 8.2 على مقياس رختر. لقد حرر زلزال آلاسكا 9.2 على مقياس رختر 900 ضعف الطاقة وهز الأرض 100 ضعف زلزال كوبي في اليابان عام 1995 الذي قوته 7.2 على مقياس رختر.

لقد طور مقياس رختر لزلزال كاليفورنيا الذي له بؤر ضحلة ومتوسطة الحجم. ينكسر المقياس عند قيمة 6.5 أو أكثر. تم تطوير مقاييس أخرى مثل مقدار العزم الذي يمكن أن يمثل الزلازل الكبيرة بدقة أكبر. تأخذ هذه المقاييس في الحسبان طول الصدع والمنطقة الموجود فيها. وللزلازل الأقل من 6.5، فإن المقياسين يعطيان القيم نفسها.

وفي كلتا الحالتين، فإن الكسر المفاجئ يحرر الطاقة المرنة المخزنة، وترتد الصخور على جانبي الصدع إلى وضعها الأصلي، وهذا الارتداد إلى الشكل الأصلي هو الزلزال. تنتقل الطاقة المتحررة بعيدًا عن الموقع الرئيس للكسر على شكل موجات زلزالية. في الموقع على سطح الأرض أعلى البؤرة تمامًا- تحدث الاستجابة عادة في صورة تشوه هش للقشرة.

ولأن الزلازل عادة تحدث الحركة على امتداد الصدوع، فإن البؤرة والمركز للزلازل تتقاطع مع منطقة زلزالية معروفة. توجد معظم الزلازل في بضعة مناطق معروفة (الشكل 36.22). مثلاً منطقة حافة المحيط الهادي هي منطقة نشاط زلزالي كبير، وكذلك منطقة ظهر وسط المحيط الأطلسي. بمقارنة شكلي 36.22 و 20.22 هل ترى أن معظم الزلازل واقعة على حدود الصفائح؟

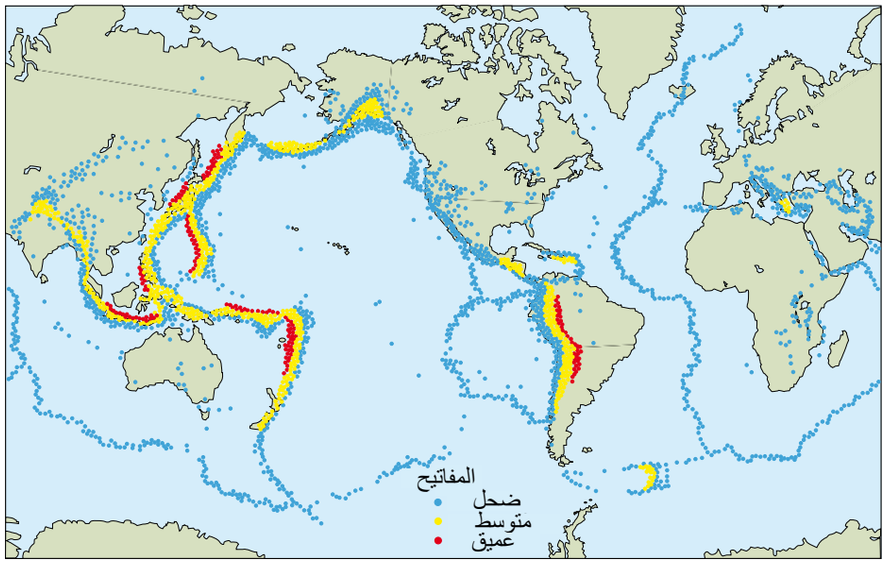
ومع ذلك، فإن الزلازل تحدث في العالم كلّه وليس على حدود الصفائح فقط. تذكر أن الأرض قديمة، وحدود الصفائح تتغير خلال الزمن الجيولوجي. لذا فإن الصدوع والزلازل المصاحبة لها يمكن وجودها داخل الصفائح- بعيدًا عن حدود الصفائح الحالية- في مناطق كانت يومًا ما حدود صفائح. وبسبب تاريخ المناطق الجيولوجية، فإن هذه المناطق بقيت مناطق ضعف. وتعد منطقة نيومدريد الزلزالية في حوض وادي المسيسبي واحدة من هذه المناطق. حدثت مجموعة من الزلازل القوية في شتاء 1811-1812 في المنطقة، وغيرت مجرى المسيسبي بمقدار 8 على مقياس رختر، كما أدّت إلى دق أجراس الكنيسة وسماعها على مسافة 1000 ميل.

لمعلوماتك

- تؤدي الزلازل إلى هز الأرض وتكسيرها. ومع هز الأرض تهتز المباني التي عليها. يقال عادة إن الزلازل لا تقتل الناس، ولكن المباني المنهارة هي التي تقتل. قد تؤدي الزلازل إلى دوران المباني، وتقليل أساسيات الحياة، وتدمير الممتلكات العامة، وموت، وخسارة تأمين الشركات، وأمراض، وانزلاقات، وتدمير الطرق والجسور، واندلاع الحرائق بسبب تكسير أنابيب الغاز والكهرباء.

مقياسا رختر ومركالي

شدة مركالي	قوة رختر	مشاهدات
1	1-2	محسوس لقليل من الناس بصعوبة.
2	2-3	محسوس لقليل من الناس خصوصًا في الطوابق العليا.
3	3-4	محسوس داخل المنزل وبخاصة في الطوابق العليا. ولكن قد لا يلاحظ أنه زلزال.
4	4	محسوس للعديد من الناس داخل المنازل وعدد قليل آخر خارج المنزل . قد يُحس به كشاحنة كبيرة تمر بالجوار.
5	4-5	محسوس من الجميع. توقظ العديد. هز الأشجار، والأعمدة والأجسام الطويلة.
6	5-6	محسوس من الجميع. يتحرك الأثاث. يسقط بعض الدهان. وتتدمر المداخن. دمار قليل في المباني.
7	6	دمار متوسط إلى قليل في المباني الجيدة. ودمار كبير في المباني الضعيفة.
8	6-7	دمار قليل في المباني المصممة جيدًا. دمار كبير في المباني العادية مع انهدام جزئي. دمار كبير في المباني الضعيفة (سقوط المداخن. والأعمدة. والآثار. والجدران).
11	8	دمار كامل. بعض المباني تبقى واقفة. دمار جسور. شقوق عريضة.
12	8 أو أكثر	دمار كامل. ترى الموجات على الأرض. الأجسام تلقى في الهواء.



الشّكل 36.22
معظم الزلازل توجد في حُزم ضيقة.

لمعلوماتك

- تسمى المنطقة المحيطة بالمحيط الهادي حزام النار. تحدث 80% من الزلازل الكبيرة في العالم في حزام النار. ولأن غوص الصفائح مصاحب للبراكين. فإن 75% من براكين العالم تحدث هناك.

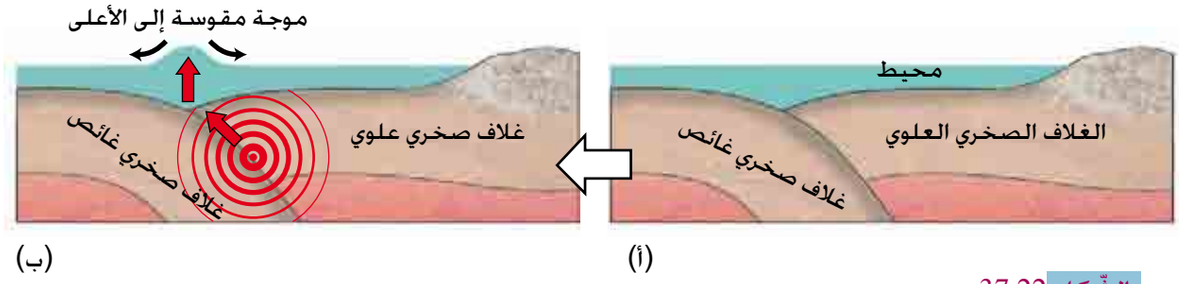
اربط مع الفيزياء

حركة الأمواج- التسونامي

التسونامي (*Tsunami*) موجة أو سلسلة موجات تولدت في جسم مائي كبير من خلال أي نوع طاقة تزيح المياه عموديًّا. تستطيع الزلازل، والانزلاقات، والانفجارات وحتى النيازك أن تولد تسونامي. عندما يتسبب زلزال في تحريك الماء، فإنه عادة ما يسمى موجات بحر زلزالية.

تحدث معظم التسونامي عند حدوث زلزال على صدع عكسي تحت الماء. تؤدي حركة قاع البحر السريعة- غالبًا إلى الأعلى- إلى دفع المياه الموجودة فوق المنطقة المرتفعة إلى الأعلى. ثم تهبط كتلة المياه الضخمة المزاحة إلى أسفل لتصبح على مستوى سطح البحر مولدة بذلك تسونامي (الشكل 37.22). لا تشبه التسونامي أمواج البحر الأخرى (فصل 24). فمثلاً، للموجات البحرية الناتجة عن الرياح طول موجي أقل من 150م، أما موجات التسونامي فذات طول 100كم أو أكثر. عمق الطاقة المنتقلة تحت موجة الماء يساوي عادة نصف طول الموجة، لذا فإن معظم أمواج البحر يؤثر فقط في الجزء العلوي من عمود الماء. ولكن نصف طول موجة التسونامي 50 كم، وهو أعمق من متوسط عمق البحر 4 كم. لذا فإن طاقة التسونامي تنتشر في كامل عمود الماء وليس في الجزء العلوي منه فقط. وهي كمية كبيرة من الطاقة. من الصعب رؤية التسونامي في البحار المفتوحة بسبب الطول الموجي الكبير. قد يرتفع المحيط مترًا واحدًا أعلى من مستواه الطبيعي، ولكن هذا المتر موزع على 100 كم، ثم إن التسونامي سريعة- فهي تسافر في البحر المفتوح بسرعة 800 كم/ ساعة.

وتظهر قوة التسونامي عند اقتراب الموجات من الشاطىء. وتعتمد سرعة هذه الموجات على عمق الماء، لذا مع اقترابها من المياه الضحلة تقل سرعتها.



الشّكل 37.22

تتكون معظم التسونامي من الزلازل في مناطق الغوص. يتم سحب طرف الصفيحة العليا في الأسفل بواسطة الصفيحة الغاطسة (أ). يتم تحرر الطاقة المرنة فجأة، مما يسبب الزلزال. عندما يرتد طرف الصفيحة المثنية إلى مكانها، فإن كامل عمود الماء يندفع إلى الأعلى (ب) ثم يعود إلى الأسفل مكونًا التسونامي.

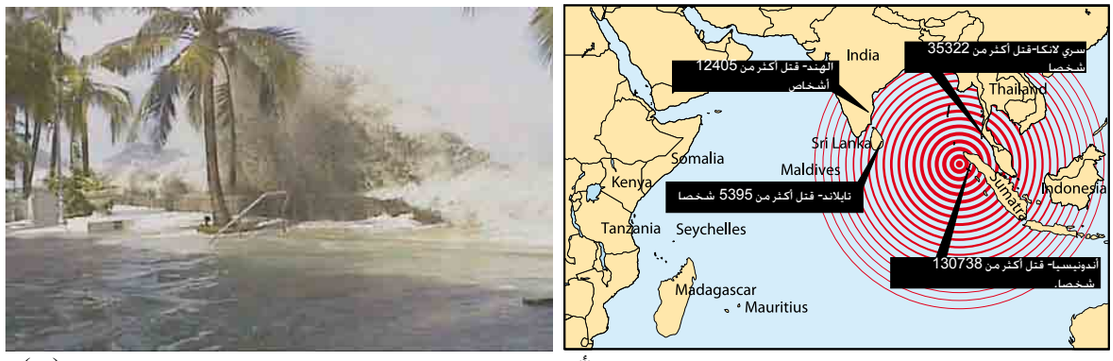
لمعلوماتك

■ في الأرض المحاذية للمحيط الهادي (حزام النار) تم وضع محطات تحذير من التسونامي منذ عام 1960م. ولسوء الحظ لم يمتد نظام التحذير للمحيط الهندي. وبعد الكارثة التي حدثت في سومطرة عام 2004 تم وضع محطة في المحيط الهندي. وهناك إمكانية لعمل نظام تحذير عالمي من التسونامي لإدخال كلّ من المحيط الأطلسي والبحر الكاريبي.

لحسن الحظ، ولأن المنطقة كانت قليلة السكان في ذلك الزمن، فإن فقدان الأرواح والممتلكات كان قليلا.

تختلف الزلازل في حجمها وقدرتها التدميرية. ففي مناطق الحدود المتباعدة، تكون الزلازل عادة ضعيفة وضحلة. أما في مناطق الصدوع التحويلية فتكون الزلازل ضعيفة إلى متوسطة. وفي مناطق الحدود المتقاربة تكون الزلازل متوسطة إلى قوية. وفي أنواع حدود الصفائح جميعها، فإن أقوى الزلازل تحدث على الحدود المتقاربة، حيث يحدث غوص الصفائح.

قد تحدث الزلازل المدمرة مع أنواع الصدوع الثلاثة: العكسية، أو العادية، أو المضربية. فقد سجّل زلزال سان فرانسسكو عام 1906م 7.8 درجة تقريبًا على مقياس رختر، وتجم عنه وفاة 700 شخص، ودمار واسع بسبب الحرائق. أما زلزال لومابريتا 1989م بالقرب من سانتا كروز كاليفورنيا، فقد سجل 7.1 درجة على مقياس رختر، وتسبب في وفاة 62 شخصا، ودمارا بقيمة 6 مليارات من الدولارات. وقد تدخل التصدع المضربي في كلا الزلزالين، لكن الطاقة التي كانت تنتشر على 4 كم انضغطت في منطقة لا تتجاوز بضع عشرات الأمتار، ثم بعد ذلك أقل. أين ذهبت هذه الطاقة؟ إلى الأعلى! قد تنمو الموجة من ارتفاع متر إلى 30 مترًا .



الشّكل 38.22

نشأ تسونامي أندونيسيا عام 2004 عن زلزال غوص شديد بالقرب من شواطىء سومطرة. ضرب التسوماني الشواطىء المجاورة بقوة كبيرة، قتل عشرات آلاف الناس ودمرت بيئات كثيرة.

ثم إن التسونامي لا تتكسر مثل الأمواج البحرية العادية. وكما تم رؤيتها من الشاطئ، تظهر التسونامي على شكل ارتفاع مفاجىء للمد- حائط مائي متحرك بسرعة. ولكن إذا وصل قاع الموجة إلى الشاطىء قبل قمتها،فإنها تبدو على شكل مد منخفض متراجع بسرعة كبيرة . ولسوء الحظ، فإن ذلك يجعل الناس تلاحظ انكشاف قاع البحر المفاجىء مع وجود الأسماك التي انحجزت مؤقتًا. ثُم تأتي قمة الموجة مباشرة فتغرق الناس المستكشفين. وبطرق عدة، فإن التسونامي على اليابسة هو مثل المطرقة الثقيلة التي تحدث ضربة شديدة.

تم توليد تسونامي سومطرة عام 2004 عن طريق غوص صفيحة الهند تحت صفيحة بورما. وبسبب حجم الزلزال (9.2 على مقياس رختر)، فإن الكمية الكبيرة من الطاقة المتحررة أدت إلى تسمية الزلزال بزلزال الدفع الضخم. تقارن كمية الطاقة المتحررة من هذا الزلزال بكمية الطاقة الناتجة عن قنبلة تزن 100 مليار طن من مادة ت ن ت (إذا كان من الممكن صنع مثل هذه القنبلة). ومع أن الزلزال تسبب في دمار كبير، فإن التسونامي بعد الزلزال كان مدمرًا أكثر. تم تدمير المناطق الشاطئية على طول المحيط الهندي، وقتل تسونامي في أندونيسيا 184000 شخص في 12 دولة (شكل 38.22) .

*إن ارتطام النيزك الذي كون حفرة تشكسولب على الحد الفاصل بين العصرين الكريتاسي و الثلاثي، قد ولد بالتأكيد تسونامي كبيرة. أما دليل التصادم - النيزك التسونامي - فقد وجد في الطبقات الصخرية في جنوب غرب الولايات المتحدة.

* التسونامي كلمة يابانية تعني" موجة الميناء" . مفردها و جمعها هو نفسه.

لقد حدثت زلازل أكبر وأكثر تدميرًا على امتداد الصدوع العكسية، خاصة تلك المصاحبة لمناطق الغوص. ومن أمثلة هذه الزلازل، زلزال ألاسكا 1964 الذي سجل 9.2 درجة على مقياس رختر. سبّب الزلزال وآثاره في قتل 131 شخصًا، وخسائر تقدر بـ 300 مليون دولار.* ومن بين أكبر المآسي في الآونة الأخيرة، زلزال تركيا في أغسطس 1999م (7.6 على مقياس رختر الذي قتل 17000 شخص)، وزلزال السلفادور في يناير 2001م، (7.7 درجة على مقياس رختر حيث قتل 844 شخصًا)، وزلزال سومطرة في ديسمبر عام 2004م (9.2 درجة على مقياس رختر حين قتل 184000 شخص). انظر الشكل 36.22 لترى كيف تمتد هذه الزلازل المدمرة مع حدود الصفائح.

لمعلوماتك

■ الزلازل شائعة جدًّا في أندونيسيا. ففي عامي 2006 و 2007م تعرضت المنطقة لأربعة زلازل أكبر من 6 درجات على مقياس رختر؛ منطقة كثيرة الاهتزاز.

* كانت الأمواج البحرية الزلزالية الكبيرة السببَ في هذه الوفيات . تسونامي. يتولد التسونامي من إزاحة الماء نتيجة الزلزال، أو انزلاق تحت الماء، أو ثوران بركان تحت بحري.

الجدول 1.22 بعض الزلالزل الملحوظة

السنة	المكان	الدرجة	الوفيات	ملاحظات
1811	نيومدريد	8	قليل	
1906	سان فرانسيسكو	7.8	700	سببت الحرائق دمارًا كبيرًا.
1923	توكيو، اليابان	8.2	150000	سببت الحرائق دمارًا كبيرًا.
1960	جنوب تشيلي	9.5	5700	أكبر زلزال تم تسجيله.
1964	ألاسكا	9.2	131	دمار بأكثر من 300 مليون دولار.
1970	بيرو	7.9	66000	انزلاق صخري كبير.
1971	سان فيرناندو	6.5	65	دمار بأكثر من 5 مليار دولار.
1975	لياوننغ، الصين	7.5	قليل	أول زلزال كبير تم التنبؤ به.
1976	تانغشان، الصين	7.6	500000	
1985	مكسيكو ستي، المكسيك	8	9000	
1989	لوما بريتا، كاليفورنيا	7.1	62	دمار بأكثر من 6 مليار دولار.
1994	نورثبردج، كاليفورنيا	6.7	57	دمار بأكثر من 25 مليار دولار.
1995	كوبي، اليابان	7.2	5500	دمار بين 95 - 147 مليار دولار.
1999	إزمت، تركيا	7.6	17000	
2001	الهند	7.6	20000	
2001	السلفادور	7.7	1000	
2003	بام، إيران	6.6	أكثرمن 30000	
2004	سومطرة	9.2	184000	دمار أكثر من 12 دولة بسبب التسونامي.
2007	سومطرة	6.4	70	

يعدّ فهم الزلزال أمرًا مهمًّا للمجتمع. ولسوء الحظ، تحدث الزلازل وحركة الصدوع مع تحذير قليل أو دونه. لذا من الصعب التنبؤ به. إن أفضل ما يمكن عمله هو حساب احتمالية حدوث زلزال مع الزمن. وهذه الاحتمالية معتمدة على وجود الزلازل في ماضي المنطقة نفسها. يدون جدول 1.22 بعض الزلازل الملحوظة في العالم بناء على أثرها في المجتمع.

7.22 النظرية التي تفسر الغلاف الأرضي

قبل وضع نظرية الصفائح التكتونية، كان فهم سبب بناء الجبال، والطّيّ، والصدوع ضعيفًا جدًّا. تفسر تكتونية الصفائح مكان حدوث العديد من المظاهر الجيولوجية وسببها. وفي الواقع، يمكن النظر إليها على أنها النظرية الوحيدة التي تربط السبب بالأثر.

لماذا وجدت جبال الأبلاش في ذلك المكان؟ ماذا عن السيرانيفادا؟ جبال روكي؟ سنجد الجواب في نموذج تكتونية الصفائح التي تفيد أن أحداث بناء السلاسل الجبلية الكبيرة جميعها تحدث بالقرب من حدود الصفائح المتقاربة.

ويمكننا أيضًا ربط تكون ثلاثة أنواع من الصخور بنظرية الصفائح التكتونية. ومع أننا سنسهل النقاش التالي من أجل توضيح تشكل الصخور، إلا أن الصخور جميعها مرتبطة بتفاعل الصفائح بطريقة أو بأخرى. أولًا، وفيما يتعلق بالصخر الناري البركاني الأكثر شيوعًا، فإن تكوّن كميات كبيرة من البازلت مرتبط بالحدود المتباعدة للصفائح؛ حيث تنصهر صخور الستار جزئيًّا لتكوين قشرة محيطية بازلتية جديدة.

وفي مناطق الغوص، يجري تسخين الصفيحة الغاطسة، وتحرير السوائل التي تؤدي إلى صهر جزئي لجزء الستار الذي يعلوها.. فتتولد ماجما بازلتية تبدأ بالتبلور. تذكّر من الفصل 20 أن عملية التبلور مستمرة، فيصبح السائل المتبقي محتويًا على نسبة من السليكا أعلى مما كان موجودًا في الماجما الأم. لذا يتكون الأنديزيت من ماجما بازلتية، ونجد حزامًا من براكين قمعية مركبة كالتي في جبال الأنديز وسلسلة كاسكيد رينج. ولكن، كيف يتكون الجرانيت؟ لا تندفع الكميات الكبيرة من الماجما الأنديزيتية في الوقت نفسه، ولكنها تتراكم في قشرة الأرض. يتم صهر بعض القشرة القارية المحيطة جزئيًا، وتنضم إلى الماجما فتزيد من نسبة السليكا. ومع تعرض الأجسام النارية المتبردة إلى التبلور، فإن السائل المتبقي يكون مشبعًا أكثر بالسليكا. عندما تتصلب هذه الماجما المشبعة بالسليكا فإنها تكوّن الجرانيت. جبال السيرانيفادا في كاليفورنيا جرانيتية وتكونت بالطريقة نفسها. الباثوليت الكبير من الصخور الجرانيتية هو جذور أو أجسام الماجما المتصلبة من حزام بركاني قديم نتج عن الغوص. وفي النهاية، فإن الضغط والحرارة المرتفعة الناتجة عن الغوص والتصادم القاري تؤدي إلى تحوّل واسع للصخور الموجودة سابقًا- ونجد صخورًا متحوّلة تحوّلًا إقليميًّا.

يرتبط معظم الصخور الرسوبية بحركة الصفائح. ومع نمو الجبال من تصادم هذه الصفائح فإنها تبدأ تتأثر بالتجوية والتعرية، يتم نقل الرسوبيات المتكونة إلى المناطق المنخفضة حيث تترسب طبقة تلو الأخرى مكونة في النهاية صخرًا رسوبيًّا.

وفي النهاية، فإنّ الزلازل كلها والنشاط البركاني يمكن ربطها مباشرة بتكتونية الصفائح. هذه الاستجابات القوية لتفاعل الصفائح نجدها عند تفاعل الصفائح بشكل دائم تقريبًا؛ نجد الزلازل على امتداد أنواع حدود الصفائح جميعها، في حين تتركّز البراكين عند الحدود المتباعدة أو المتقاربة.

لذا فإن التفاعل التكتوني بين صفائح الغلاف الصخري الذي يحدث دائمًا على حدود الصفائح يفسر أصل السلاسل الجبلية، وتكوّن قاع المحيط وتدمره . ووجود الأنواع الثلاثة من الصخور الموجودة على الأرض، والتوزع العالمي للزلازل والبراكين. تحدث الحركات الداخلية التي تغير سطح الأرض بشكل دوري. وباستخدام مبدأ النسقية- الحاضر مفتاح الماضي- يمكن لعلماء الأرض استخدام الاكتشافات في الخمسين سنة الماضية في بناء تاريخ الأرض.

ملخّص المصطلحات

الزلزال *(Earthquake)*: أو الاهتزاز أو الارتعاش للأرض عندما تتحرك صخور تحت الأرض أو تنكسر.

موجة جسمية *(Body wave)*: نوع من الموجات الزلزالية تتنقل داخل الأرض.

موجة سطحية *(Surface wave)*: نوع من الموجات الزلزالية تتنقل على سطح الأرض.

موجة أولية *(Primary wave)* (موجات P): موجات طولية جسمية تضغط وتمدد المادة التي تنتقل خلالها سواء أكانت صلبة أم سائلة أم غازية، وهي أسرع الموجات.

موجة ثانوية (Secondary wave): (موجات S) موجات جسمية مستعرضة تهتز من جانب إلى آخر، أو من أعلى إلى أسفل خلال المادة التي تتنقل فيها. ولا تسير في السوائل. لذا لا تسير في لب الأرض الخارجي.

انقطاع موهوروفتشك (Mohorovicic discontinuity) (موهو): الحد بين القشرة والستار. وهو علامة على زيادة سرعة موجات P في أثناء انتقالها نحو باطن الأرض.

اللبّ (Core): الجزء المركزي من باطن الأرض، ويقسم إلى لبّ داخلي صلب ولبّ خارجيّ سائل.
الستار (Mantle): الطبقة الوسطى من الأرض بين القشرة واللبّ.
الغلاف اللدن (Asthenosphere): قسم من الستار العلوي يقع تحت الغلاف الصخري وهو نطاق لدن سهل التّشوّه.
الغلاف الصخري (lithosphere): القشرة والجزء من الستار الذي يعلو الغلاف اللدن.
القشرة (Crust): طبقة الأرض الخارجية.
الاتزان (Isostasy): العملية التي تؤدي إلى حدوث توازن بين القشرة القارية والمحيطية بالنسبة إلى الستار- فالقشرة المحيطة العالية الكثافة تكون أعمق في الستار مقارنة بالقشرة القارية القليلة الكثافة.
الانجراف القاري (Continental drift): فرضية لألفرد فيجنر تنص على أن قارات الأرض متحركة، ووصلت إلى مواقعها الحالية نتيجة انقسام قارة بنجايا.
المغناطيسية القديمة (Paleomagnetism): مغناطيسية صخر قديمة تستخدم لمعرفة قطبية مجال الأرض المغناطيسي وموقع الصخر. وعند تكون الغلاف الصخري واستهلاكه.
توسع قاري المحيط (Seafloor spreading): ابتعاد صفيحتين محيطتين إحداهما عن الآخر على خط الانهدام في قاع المحيط.
تكتونية الصفائح (Plate tectonics): نظرية تنص على أن الغلاف الصخري مقسم إلى قطع (صفائح) تطفو فوق الغلاف اللدن؛ معظم الزلازل والبراكين توجد عند حدود الصفائح

حدود الصفائح المتباعدة (Divergent plate boundary): مكان تبتعد فيه صفائح الغلاف الصخري بعضها عن بعض؛ مركز توسع منطقة إجهاد شد؛ حيث يتم تكوين غلاف صخري جديد.
انهدام (حفرة انهدام) (Rift): فجوة طويلة رفيعة تتشكل نتيجة تباعد صفيحتين إحداهما عن الآخر.
حدود صفائح متقاربة (Convergent plate boundary): حدود صفائح، تتحرك الصفائح فيها بعضها نحو بعض، منطقة إجهاد ضغط حيث يتم استهلاك الغلاف الصخري في الستار أو تقليصه بالطّيّ والصدوع.
غوص (Subduction): عملية انحناء صفيحة تكتونية ونزولها تحت صفيحة أخرى عند الحدود المتقاربة.
حدود صفائح تحويلية (Transform plate boundary): حدود صفائح؛ حيث تتحرك صفيحتان أفقيًّا إحداهما بمحاذاة الأخرى دون حركة رأسية ملحوظة.
طيّة مقعرة (مقعّر) (Syncline): صخور مطوية حيث توجد الطبقات الأحدث في المركز، ويزداد عمر الصخور بالابتعاد عن المركز أفقيًّا.
طيّة محدّبة (محدّب) (Anticline): طيّ في الصخور بحيث تكون الصخور الأقدم في المركز، ويقل العمر بالابتعاد عن المركز أفقيًّا.
صدع (Fault): كسر تحدث عليه إزاحة ملحوظة لجانب من الصدع بالنسبة إلى الجانب الآخر.

أسئلة مراجعة

1.22 الموجات الزلزالية

1 . كيف تنتقل كلّ من موجات P و S في باطن الأرض؟
2 . هل تنتقل موجات S في السوائل؟
3 . اذكر اسم نوعي الموجات السطحية مع وصف حركة كل واحدة.

2.22 طبقات الأرض الداخلية

4 . ما مساهمة أندريه موهوروفتشك في علم الأرض؟
5 . كيف ساهمت الموجات الزلزالية في اكتشاف لبّ الأرض؟
6. ما الدليل على أن لبّ الأرض الداخلي صلب؟
7. ما الدليل على أن لبّ الأرض الخارجي سائل؟
8. صف الغلافين الصخري واللدن. ما الفرق بينهما؟
9. كيف تختلف القشرة القارية عن المحيطية؟
10. لماذا ترتفع القشرة القارية في الستار أعلى من القشرة المحيطية؟

3.22 الانجراف القاري – فكرة سبقت عصرها

11. ما الدليل الرئيس الذي استخدمه فيجنر لدعم فرضيته؟
12. افترض فيجنر أن قارات الأرض كانت مجتمعة في قارة واحدة. ما اسم هذه القارة؟

4.22 قبول فرضية الانجراف القاري

13. ما الدور الذي قامت به المغناطيسية القديمة لدعم الانجراف القاري؟
14. أين تقع أعمق مناطق المحيط؟
15. ما الاكتشاف الرئيس في قاع المحيط الذي حققه هيس؟
16. كيف يشبه قاع المحيط شريطًا مغناطيسيًّا بطيئًا؟
17. ما أوجه دعم توسع قاع المحيط لانجراف القارات؟

5.22 نظرية تكتونية الصفائح

18. صف أنواع الحدود الصفائحية الثلاثة.
19. ما أسباب حركة صفائح الغلاف الصخري؟
20. ما الانهدام؟
21 . ما نوع الحدود الفاصلة بين صفيحتي أمريكا الجنوبية وإفريقيا؟

22 -صف الأنواع الثلاثة من تقارب الصفائح.
23 -ما لصدع التحويلي؟

6.22 أدلة قارية لتكتونية الصفائح

24 -ما القوى التي تسبب الصخور المطوية: الضغط أم الشّدّ؟
25 -ميز بين الطيتين المحدبة والمقعرة.
26 -ما الفرق بين الصدعين العادي والعكسي؟
27 -أي أنواع الصدوع يتكوّن أساسًا من الشّدّ في القشرة الأرضية؟ وأيها ينتج عن ضغط القشرة؟
28 -ما التشوه المرن؟ ماذا يحدث عندما يتجاوز الإجهاد حدّ المرونة؟
29 -أين تتكون معظم براكين الأرض؟
30 -ما مصدر الطاقة الكبيرة في التسونامي؟

تمارين

لا تعبأ بالعدد الكبير من التمارين في هذا الفصل وفي غيره. إذا كان عليك تغطية العديد من الفصول، فإن مرشدك سيختار بعضها.

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

1. ● قارن بين كل من سرعة الموجات الأولية والثانوية. ما نوع المادة التي ينتقل خلالها كل نوع؟
2. ● اشرح كيف تدل الموجات الزلزالية على أن الوسط صلب أو سائل.
3. ● كيف تدل الموجات الزلزالية على التطبّق في باطن الأرض؟
4. ♦ ما الدليل على أن لبّ الأرض الداخلي صلب؟
5. ■ اشرح لماذا يكون الجزء السفلي من الغلاف الصخري صلبًا والغلاف اللدن لدنا، مع أنهما جزء من الستار؟
6. ■ مع أن اللبّين الخارجي والداخلي مكونان من حديد ونيكل إلا أن اللبّ الداخلي صلب والخارجي سائل. لماذا؟
7. ■ بماذا تخبرنا منطقة ظل الموجات المتكون بين 105 - 145 درجة الناتج عن الزلازل، عن مكونات الأرض؟
8. ● إذا كان الستار مكونًا من صخور، فكيف نقول إن القشرة تطفو فوق الستار؟
9. ■ لماذا يزداد سمك القشرة تحت الجبال؟
10. ■ أي القشرتين تمتد أكبر في الستار: القارية أم المحيطية؟
11. ♦ كيف تؤثر تعرية الجبال في عمقها في الستار؟
12. ■ صف كيف ساعدت منحنيات تجوّل القطب الظاهري على إثبات حركة القارات مع الزمن؟
13. ● لماذا تحدث معظم الزلازل على حدود الأنديز؟
15. ● ما نوع حدود الصفائح التي كونت جبال الأبلاش؟
16. ♦ لماذا تتكون الجبال في مناطق ضيقة طولية؟
17. ■ ما نوع حدود الصفائح التي تفصل صفيحة أمريكا الشمالية عن صفيحة إفريقيا؟
18. ♦ اربط تكون الصخور المتحولة بحدود الصفائح. هل تتوقع وجود صخور متحولة في الأنواع الثلاثة من حدود الصفائح؟ لماذا؟
19. ■ لماذا يتكون الجرانيت أكثر عند حدود التقارب المحيطي- القاري وأقل احتمالاً عند التقارب المحيطي- المحيطي؟
20. ♦ اذكر دليلاً على أن الغوص قد حدث مرة بعيدًا عن شاطىء كاليفورنيا.
21. ■ ميز بين الانجراف القاري وتوسع قاع المحيط.
22. ♦ هل أحواض المحيط الحالية مظاهر ثابتة؟ اشرح السبب.
23. ♦ هل القارات مظاهر ثابتة على كوكبنا؟ اشرح السبب.
24. ■ عند التبلور، فإن معادن محددة (الماجنتيت) ترتب نفسها في اتجاه المجال المغناطيسي الموجود في ذلك الوقت، موفرة أدلة مغناطيسية أحفورية. كيف دعمت مغناطيسية قاع المحيط انجراف القارات؟
25. ● عند تكون البلورات تصطف بعض المعادن، وأهمها المغناتيت، بجانب بعضها في اتجاه المجال المغناطيسي المحيط بها، وبالتالي تكون بقايا أحفورة مغناطيسية. كيف تدعم المحفوظات المغناطيسية في قعر البحار نظرية الانجراف القاري؟
26. ■ كيف يتم دعم الانجراف القاري وتوسع قاع المحيط عن طريق المغناطيسية القديمة؟
27. ● ما نوع الحدود المصاحبة لمراكز توسع قاع المحيط؟
28. ■ ماذا نقصد بانقلابات القطبية المغناطيسية؟ ما المعلومات المفيدة التي تقدمها لنا عن تاريخ الأرض؟
29. ● ما الشبه بين قشرة الأرض والحزام المتحرك؟
30. ● تنشأ الزلازل عن تحرر مفاجىء لطاقة تخزنت ببطء، وتسبب انكسار الصخور والصدوع، وتكون صدوعًا جديدة. اربط عملية التصدع هذه بحركة الانزلاق الأفقية بين صفيحتين. أين يحدث هذا النوع من الحركات؟
31. ● ما نوع الصدع المصاحب لزلزال ألاسكا 1964؟
32. ♦ يقيس مقياس مركالي شدة الزلزال، في حين يقيس مقياس رختر قوته. أيهما أدق؟ ولماذا؟

33. ■ ما السبب الأكثر احتمالًا لوجود المجال المغناطيسي للأرض؟
34. ■ يتم بناء صخور الغلاف الصخري وهدمها باستمرار. أين يحدث هذا البناء والهدم؟ هل معدل حدوث العمليتين متقارب؟
35. ● الغوص عملية نزول صفيحة تحت أخرى. لماذا يغوص الجزء المحيطي، أما القاري فلا يغوص ؟
36. ■ ما المظاهر التي يتم تفسيرها بتكتونية الصفائح؟
37. ● ضرب تسونامي كبير عام 1960م جزر هاواي دون تحذير؛ حيث دمر مدينة هاواي الساحلية. ومنذ ذلك الوقت، تم وضع محطات تحذير في المحيط الهادي. لماذا وُضعت هذه المحطات في المحيط الهادي؟
38. ■ كيف نشأت جبال الهملايا؟ كيف تكونت جبال الأنديز؟
39. ● ما المصدر الرئيس للزلازل في جنوب كاليفورنيا؟
40. ■ صف كيف يدعم وجود الصدوع والطّيّات أن صفائح الغلاف الصخري متحركة؟
41. ● تتكون الصدوع العكسية من قوى ضغط. أين نجد في أمريكا دليلاً على هذه الصدوع العكسية؟
42. ● تتكون الصدوع العادية من قوى شد. أين نجد في أمريكا دليلاً على هذه الصدوع العادية؟
43. ● تتكون صدوع المضرب من حركة أفقية. أين نجد في أمريكا دليلًا على هذه الصدع المضربية؟
44. ♦ إذا وجدت طبقات رسوبية في الميدان. فما الأدلة التي تبحث عنها لمعرفة ما إذا كان طيّة محدبة أم مقعرة؟
45. ■ هل حقيقة أن الستار تحت القشرة دليل على أن الستار أعلى كثافة من القشرة؟ اشرح.
46. ♦ اربط نشأة الماجما بحدود الصفائح. ما نوع الماجما المتكونة عند كل نوع حدود؟ كيف تكونت الماجما؟
47. ● اين توجد أطول سلسلة جبلية؟
48. ■ ما عمر المحيط الأطلسي؟
49. ■ ما نوع اللابة المتدفقة عند كلّ من الحدود المتباعدة والمتقاربة؟
50. ♦ ما الدلائل التي تبحث عنها لتعلم أن هذه كانت حدود صفائح قديمة ولكنها ليست كذلك الآن؟

مسائل

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

1. ♦ يزداد وزن قاع المحيط المؤثر في الغلاف الصخري بزيادة وزن مياه المحيط. ما الذي يسهم فيه وزن مياه عمقها 3 كم (كثافة 1 جم/سم^3) نسبة إلى وزن بازلت المحيط بسُمك 10 كم (كثافة 3جم/ سم^3)؟ وضح إجابتك بصورة نسبة مئوية من وزن القشرة.
2. ■ مقياس رختر لوغاريتمي، أي أن كل زيادة بمقدار 1 على مقياس رختر تقابلها زيادة بمقدار 10 في سعة الموجات الزلزالية المسجلة على السيزموجراف. ما عدد المرات في تأثير اهتزاز الأرض لزلزال بقوة 8 درجات على مقياس رختر مقارنة بزلزال قوته 6؟
3. ■ إذا علمت معدل الحركة على امتداد صدع، فإن مقدار الإزاحة في زمن معين يمكن حسابها من العلاقة:
السرعة = المسافة/الزمن
الحركة على صدع سان إندرياس هي 3.5 كم / سنة تقريبًا. فإذا بُني سياج عبر الصدع عام 1990م، فما المسافة بين جزأي السياج المنفصلين في عام 2010م؟
4. ■ يفصل صدع سان إندرياس صفيحة المحيط الهادي المتحركة شمال غرب، حيث توجد لوس أنجلوس عند صفيحة أمريكا الشمالية حيث توجد سان فرانسيسكو. إذا انزلقت الصفيحة بمعدل 3.5 سم/سنة، فكم سنة تحتاج المدينتان لتندمجا في مدينة واحدة كبيرة؟ (المسافة بين لوس أنجلوس وسان فرانسيسكو 600 كم)

أنشطة استكشافية

انظر إلى نافذة قديمة جدًّا، ولاحظ التأثير العدسي في الجزء السفلي من الزجاج. للزجاج خصائص صلبة وسائلة. وفي الواقع، كان يعتقد أنه سائل لزج جدًّا. ومع مرور الكثير من السنين، فإنه ينساب إلى أسفل بسبب الجاذبية بدليل زيادة سمك لوح الزجاج عند نهايته السفلى.

اربط هذه المشاهدة من السلوك اللدن في نقاشنا لتكتونية الصفائح. أي أجزاء الأرض يتصرف بلدونة؟ ما الأجزاء التي تعدّ قاسية؟ ما علاقة هذه الأفكار مع تكتونية الصفائح؟

اختبار الاستعداد للقراءة

إذا استوعبت هذا الفصل جيدًا، فعليك الإجابة عن 7 أسئلة من 10. ولكن، إذا أجبت عن أقل من ذلك، فعليك القراءة أكثر قبل التقدم إلى الأمام.

اختر أفضل إجابة لكلّ سؤالٍ مما يلي:

1 . تنشأ الماجما البازلتية في منطقة الحدود المتباعدة عن:
(أ) تبلور ماجما الستار.
(ب) الانصهار الجزئي للقشرة القارية.
(ج) الانصهار الجزئي لصخور الستار.
(د) إضافة الماء إلى صخور الستار.

2 . فرضية الانجراف القاري غير مدعومة بـ:
(أ) توسع قاع المحيط.
(ب) المغناطيسية القديمة.
(ج) الاتزان.
(د) خدوش الجليد.

3 . واحدة من الجمل التالية غير صحيحة:
(أ) يحوي الستار جزءًا من القشرة.
(ب) يحوي الغلاف الصخري القشرة كلّها.
(ج) يحوي الستار جزءًا من الغلاف الصخري.
(د) يحوي الستار الغلاف اللدن كلّه.

4 . تزداد سرعة الموجات الزلزالية عندما:
(أ) تعبر سائلا.
(ب) تصبح الصخور أكثر كثافة وأقل قساوة.
(ج) تشكل منطقة ظل.
(د) تزداد مرونة الصخر.

5 . الجزء من قشرة الأرض الأكثر كثافة هو:
(أ) القشرة المحيطية.
(ب) القشرة القارية.
(ج) الغلاف اللدن.
(د) الغلاف الصخري.

6 . مصدر التسونامي عادة هو:
(أ) صفائح تكتونية متباعدة.
(ب) زلزال.
(ج) صفائح تكتونية متقاربة.
(د) بركان.

7 . أسرع أنواع الموجات الزلزالية هي:
(أ) موجات لوف.
(ب) موجات *S*.
(ج) موجات *P* .
(د) موجات رالي.

8 . سبب الزلازل هو:
(أ) الاحتكاك بين الصفائح المتباعدة.
(ب) التحرر المفاجىء للطاقة الذي خُزّن بشكل مرن في الصخور المشوهة.
(ج) تمدد قشرة الأرض
(د) الحركة الكلية للصفائح التكتونية.

9 . يقدم توسع قاع المحيط القوة المحركة لانجراف القارات لأن:
(أ) أحدث قاع محيط يوجد بالقرب من القارات.
(ب) توسع المحيط يدفع القارات بعيدًا.
(ج) تيارات الحمل في الستار تسبب الانزلاق.
(د) الغوص يكوّن أحدث قيعان المحيطات.

10. يتم بناء غلاف صخري عند الحدود---- ويتم استهلاكه عند الحدود-----.
(أ) المتقاربة، المتباعدة.
(ب) المتباعدة، المتقاربة
(ج) المتباعدة، التحويلية.
(د) المتقاربة، التحويلية.

إجابات اختبار الاستعداد للقراءة

١٠ ،٩ ،٨ ،٧ ،٦ ،٥ ،٤ ،٣ ،٢ ،١

اكتشف المزيد

ما كفي، جون تجميع. كاليفونيا. نيويورك فرّار تراوس وجيروكس، 1993 سلسلة رودس ايد جيولوجي. (كثير من العناوين تغطي اجزاء مختلفة من أفريقيا الشمالية.) ميسواد، مونتانا: ماونتن برس.

http://pubs.usgs.gov/pv=ublications/text/dynamic.html

يشرح هذا الموقع، الحدث بصورة مستمرة، برعاية الولايات المتحدة، يشرح الصفائح التكتونية، والبراكين، والهزات الأرضية يوضع مفصل مع الرسومات، والصور. ويعتبر الموقع مصدر ممتاز للمعلومات التاريخية والنظرية العملية.

http://scign.jpl.nasa.gov/learn/pleat1.htm

الصفحة الرئيسة تحليل قسم الارض من جنوب كاليفورنيا المتكامل مع شبكة خدمات المسح الجوي العالمي لنموذج التربية. حيث توفر نموذج تربوي وأنشطة لطلاب المدرسة الثانوية وطلاب الكليات غير الجامعية. يغطي هذا الموقع المميز التفاعلي الصفائح التكتونية والهزات والأرضية.

http://www.tinynet.com/faults.html

يصف هذا الموقع أربعة أنواع مختلفة من الصدوع. كما يتضمن قوائم شاملة الروابط لمواقع جيولوجية مصفوفتاً المواقع المرتبطة بالهزات الأرضية.

http://earth.leeds.sa.uk/faults

يعتبر هذا الرابط مصدر جيد للمعلومات المفصلة حول انواع الصدوع المختلفة. يتضن الروابط معرض صور كبير للصدوع المختلفة. انقر أيقونة تعرف على الهيكل لتصفح الأقسام المختلفة من الموقع.

http://www.ucmp.berkeley.edu/geology/tectonics.html

يتضمن موقع القسم الجيولوجي من متحف جامعة بيركلي للأحافير في كاليفورنيا تاريخ الصفائح التكتونية.

الفصل 22 مصادر على الشبكة

أشكال تفاعلية

- 22.3

دروس تعليمية

- ستار الحمل الحراري والانتشار في قاع البحر
- الصفائح والحدود التكتونية

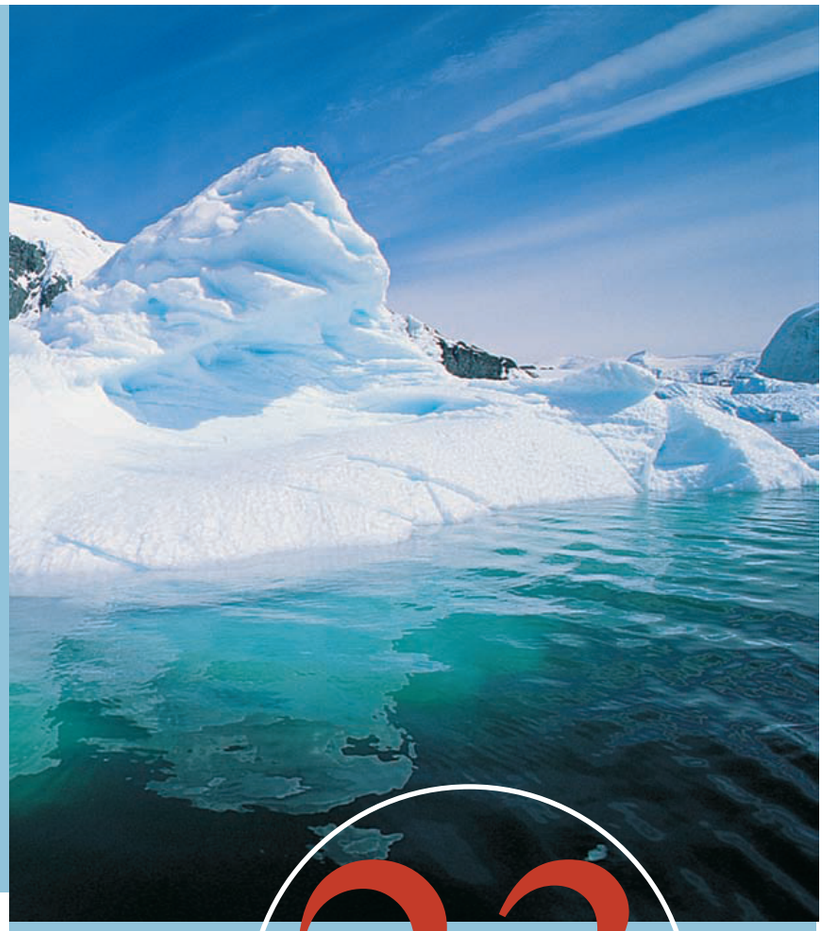
أشرطة فيديو

- الستار والقشرة
- مطيحة تكتونية
- الطيات والصدوع في القشرة الأرضية
- قصة صدع سان اندريا

اختبار قصير

بطاقات تعليمية

روابط



تشكيل سطح الأرض

23

1.23 دورة المياه

2.23 المياه الجوفيّة

3.23 عمل المياه الجوفيّة

4.23 المياه السّطحيّة وأنظمة التّصريف

5.23 عمل المياه السّطحيّة

6.23 الجليد والجليديّات

7.23 عمل الجليديّات

8.23 عمل الرّيح

■ تخيَّل نفسك تنظر إلى الأرض من الفضاء، وتستكشف سطحها. فماذا سترى؟ إنّ أول ما ستراه وتلاحظه أنّ معظم سطح الأرض مغطًّى بالماء (71%). وأمّا النسبة المتبقية 29% فهي عبارة عن قارات، تشكّلت سطوحها جرّاء عمليات التّعرية والنقل والتّرسيب.

يقوم الغلاف المائيّ والجوّيّ بدور في تشكيل سطح الأرض؛ فالماء والرّيح والجليد عوامل تقوم بمعظم هذا الدور. وسندخل لبحثنا عن سطح الأرض من خلال استكشاف كيفية تدفق هذه العوامل أولًا. ومن ثمَّ نتناول تأثيرها في سطح الأرض.

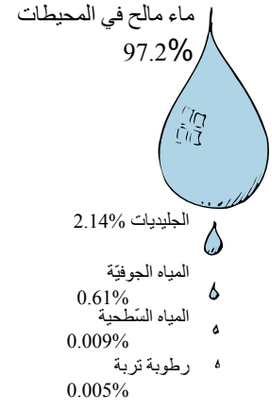
1.23 دورة المياه

إنّ أكثر من 97% من مياه الأرض موجودة في المحيطات، وما يقارب من 2% متجمد عند الأقطاب. أما الباقي، وهو أقلّ من 1% فيتكون من بخار الماء في الغلاف الجوّيّ، والمياه الجوفيّة، ومياه الأنهار، والبحيرات.

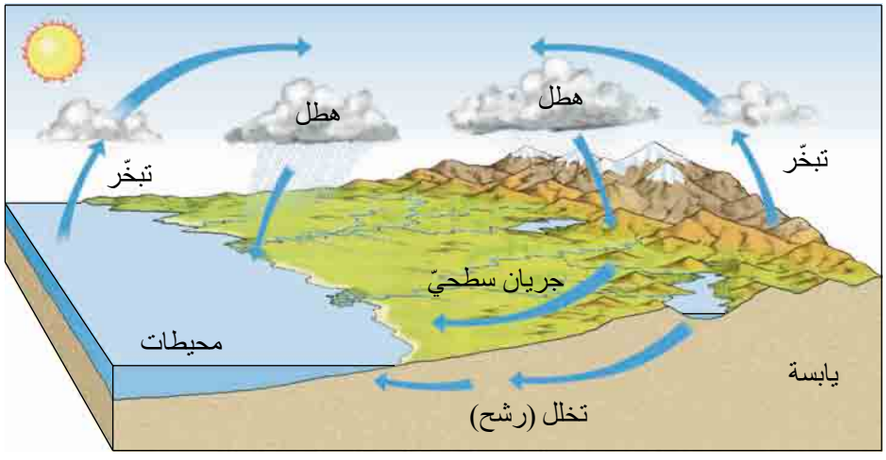
تدور المياه على الأرض بشكل ثابت بفعل حرارة الشّمس وقوة الجاذبية. تقوم الطّاقة الشّمسيّة بتبخير مياه المحيطات، فتبدأ الدورة (الشّكل 2.23). يعمل التبخّر على نقل جزيئات الماء من سطح الأرض إلى الغلاف الجوّيّ، وقد يتم نقل الهواء الرطب مسافات طويلة بواسطة الرّياح. تتكثف بعض جزيئات الماء لتكوّن الغيوم، ثم تهطل على شكل مطر أو ثلج. وإذا نزل الهطل على المحيطات فقد اكتملت الدورة من المحيط إلى المحيط.

يكون اكتمال الدورة أكثر تعقيدًا عندما تسقط الأمطار على اليابسة؛ لأنّ الماء قد ينصرف إلى الجداول ثم الأنهار في رحلة العودة إلى المحيط. أو قد تتخلل المياه إلى جوف الأرض، أو تتبخّر عائدة إلى الغلاف الجوّيّ قبل عودتها إلى المحيط. كما أنّ المياه الهاطلة على اليابسة قد تصبح جزءًا من الجليديّات. ومع أنّ الجليد يحجز الماء لعدة سنين، إلّا أنّه ينصهر أو يتبخّر في النهاية ويعود إلى الدورة. هذه هي الدورة الطّبيعيّة للماء: من المحيطات إلى الهواء، ثمّ إلى الأرض، ثمّ إلى المحيطات، ومن ثم إلى الغلاف الجوّيّ؛ تلك هي **دورة المياه***.

يقوم بخار الماء بدور مهم في دورة المياه. تبقى الكمية الكلية لبخار الماء في الغلاف الجوّيّ ثابتة مع أن الغيوم تتشكّل باستمرار. وهذا يحدث إذا توازن التبخّر مع الهطل. ولأنّ معظم سطح الأرض محيطات، فمن المنطقي إذن أن يكون التبخّر والهطل أكبر فوق المحيطات. وفي الواقع، فإنّ 85% من بخار الماء في الغلاف الجوّيّ هو ماء تبخّر من المحيطات، و75% من بخار الماء في الغلاف الجوّيّ يهطل مرة أخرى على المحيطات. أما على اليابسة، فيزيد معدل الهطل على معدل التبخّر. إنّ 15% من بخار الماء في الغلاف الجوّيّ هو ماء تبخّر من اليابسة، و 25% منه هو ماء هطل على اليابسة مرة أخرى. وعليه، يبقى التوازن بين الماء الذي يدخل الغلاف الجوّيّ (85% من المحيطات و 15% من اليابسة)، والكمية التي تهطل من الغلاف الجوّيّ (75% إلى المحيطات و 25% إلى اليابسة)*.



الشّكل 1.23
توزع مصادر المياه في الأرض.



الشّكل 2.23
دورة المياه: يدخل الماءُ المتبخّر من سطح الأرض الغلافَ الجوّيّ على شكل بخار ماء، ثم يتكاثف إلى غيوم، ثم يهطل على شكل مطر أو ثلج، ومن ثمَّ يعود إلى السّطح، فيتبخّر مرة ثانية ويعود إلى الدورة مرة أخرى.

* هذا المبدأ من مبادئ الوقاية. تذكر في الفصل 3 أننا تعلمنا المحافظة على الآثار والطّاقة. وفي الفصل 9 تعلمنا المحافظة على الشحنات الكهربائية. في حين تعلمنا في الفصل 13 المحافظة على التفاعلات النووية. أما الآن، فنتعلم أنّ كمية الماء في الأرض محفوظة. وأنّ نقصها في مكان يعني توافرها في مكان آخر، وهو غالبًا المحيط.

الجدول 1.23 زمن إقامة مصادر الماء

الموقع	معدل مدة القامة
الغلاف الجوّيّ	1 – 2 أسبوع
المحيط	
أعماق ضحلة	100 – 150 سنة
أعماق كبيرة	30000 – 40000 سنة
القارات	
أنهار	2 – 3 أسابيع
بحيرات	10 – 100 سنة
مياه جوفيّة ضحلة	مئات السنين
مياه جوفيّة عميقة	آلاف السنين
جليديّات	10000 – 20000 سنة

يعدّ المطرُ أو الثّلج الذي يسقط على اليابسة المصدرَ الوحيدَ للمياه العذبة على الأرض. وقد حُجز أكثر من ثلاثة أرباع المياه العذبة في جليد الأقطاب. ومن المدهش أنّ المياه العذبة المتدفقة بحرية ليست موجودة في البحيرات والأنهار، ولكنها تحت سطح الأرض. وعند هطل المطر وتخلله داخل الأرض فإنه ينزل إلى الأسفل. بعض الماء المتخلل يعبئ المسامات بين حبيبات الرواسب، ويسمى المياه الجوفيّة (*Ground water*).

■ **نقطة فحص**

1. ما نسبة مصادر المياه العذبة على سطح الأرض؟
2. حجم الماء المتبخّر من اليابسة كلها 60,000 كم^3/ سنة. ولكن حجم المياه الهاطلة على اليابسة 96,000 كم^3/ سنة. إنّ كمية الماء الهاطلة أكبر بـ 36,000 كم^3/ سنة من المياه المتبخّرة . لماذا لا تحدث فيضانات على اليابسة؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. أقلّ من 3% كما سترى عند جمعك للمصادر العذبة في الشّكل 1.23: جليديات 2.14% + مياه جوفيّة 0.61% + مياه سطحية 0.009% + رطوبة تربة 0.005% = 2.74%
2. الماء الزائد يأخذ طريقة إلى المحيط. وهو لا يسبب ارتفاع مستوى البحر؛ لأنّ نسبة التبخّر 85% أكثر من نسبة الهطل 75% بنسبة 10%. يبقى التوازن بين كمية الماء المتبخّرة والهاطلة فوق المحيطات (85% - 75% = 10%) والكمية المتبخّرة والهاطلة فوق اليابسة (25% - 15% = 10%).

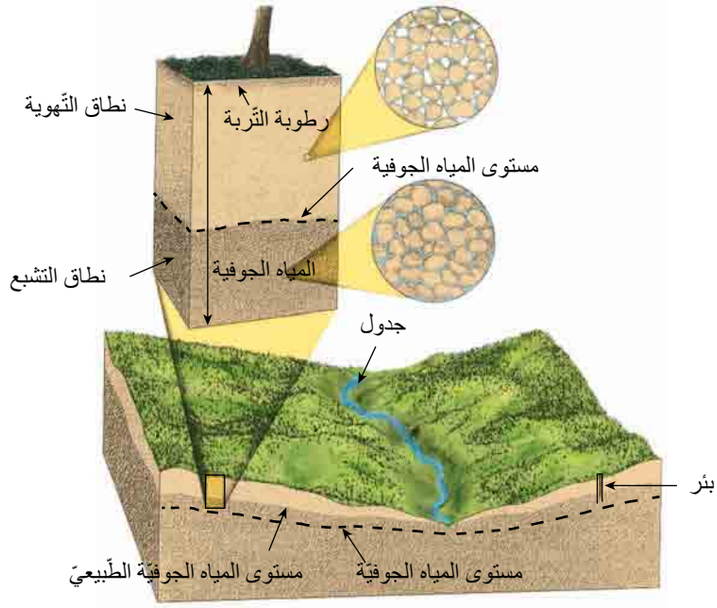
■ 2.23 المياه الجوفيّة

الماء السّائل في البحيرات، والبرك، والأنهار، والجداول، والينابيع، وبرك الوحل، هي المياه الوحيدة العذبة التي تراها بعينيك. ولكن هذه المصادر جميعها تشكّل 1.5% من الماء العذب غير الجليدي. وما تبقى وهو 98.5% موجود في المسامات تحت سطح الأرض.

يوجد الماء تحت السّطح في صورة مياه جوفيّة *ورطوبة تربة*. وتوجد هذه المياه الجوفيّة في *نطاق التشبع*، وهي المنطقة تحت السّطحيّة حيث المسامات جميعها مليئة بالماء (الشّكل 3.23).

لمعلوماتك

■ زمن إكمال كمية معينة من الماء للدورة يسمى *مدة الإقامة*: أي متوسط الزّمن الذي يمكن لجزيء ماء أن يقضيه في منطقة محددة. للماء في الجليديّات والأقطاب مدة إقامة طويلة. ولأهداف عملية، فإنّ مدة إقامة آلاف السنين للمياه الجوفيّة العميقة تعني أننا إذا استنزفناها فإنها لن تعود؛ الماء مصدر طبيعي ثمين.



الشّكل 3.23

يقع نطاق التّهوية فوق نطاق التشبع.
لا يملأ الماء الفراغات كليًّا في نطاق التّهوية. ويسمى رطوبة التربة. أمّا الماء في نطاق التشبع فيملأ المسامات كليًّا ويسمى المياه الجوفيّة.

لمعلوماتك

■ كما سترى، فإنّ الماء والرّيح والجليد عوامل مهمة في تشكيل سطح الأرض. كما تؤدي الجاذبية دورًا مهمًّا في تغيير الأرض. تسمى حركة الصخور والتربة بتأثير الجاذبية *انزلاقًا أرضيًّا*. يؤدي تضافر الانزلاقات الأرضية وحركة المياه إلى تكوين المجاري المائيّة؛ المياه تحفر المجرى، والانزلاقات توسعه. ومن الأمثلة الرئيسة على ذلك الأخدود العظيم Grand Canyon. لقد ساعدت المياه على حدوث الانزلاقات، ولكن الجاذبية بقيت القوة المسيطرة.

يقع نطاق التّهوية *فوق نطاق التشبع*، حيث توجد رطوبة التربة. الفراغات في نطاق التّهوية غير مملوءة بالماء تمامًا؛ لأنها تحوي كمية كبيرة من الهواء. وكما هو حال الماء في بركة سباحة، فإنّ الضّغط في المياه الجوفيّة يزداد مع العمق. وكما يمكننا ضخّ الماء من بركة السباحة، فإنه يمكننا ضخّ الماء من المياه الجوفيّة أيضًا. إلا أنّ وجود الهواء في المسامات يمنع سحب الماء من نطاق التّهوية.

هل لاحظت في أثناء نزول المطر أنّ الأرض الرملية تمتص الماء كالإسفنج؟ في الواقع، يختفي الماء في الأرض. تؤثر نوعية المادة السّطحيّة في كمية الماء التي تذهب إلى داخل الأرض. فبعض أنواع التربة، كالرمل، تمرر المياه إلى جوف الأرض بسهولة. ولكن هناك أنواع ترب أخرى، كالتربة الطينية مثلًا، لا تسمح للماء بالمرور. إنّ السّطوح الصّخريّة التي تحوي تربة قليلة أو لا تحوي هي أضعف السّطوح امتصاصًا للماء، حيث يتخلل الماء فقط من الشقوق في الصخر. ويتدفق الماء الذي لا يرشح إلى الأرض حيث يجد طريقه أخيرًا إلى الأجسام المائيّة كالبحيرات أو الأنهار، أو قد يتبخّر.

تعتمد كمية الماء التي يمكن جمعها تحت الأرض على مسامية التربة أو الصخر في ذلك المكان. المسامية(*Porosity*) هي حجم الفراغات في التربة، أو الرّسوبيّات، أو الصخر مقارنة بالحجم الكلي للصخر والمسامات. تعتمد المسامية على حجم حبيبات التربة أو الرّسوبيّات وشكلها ومدى تراصها. فمثلاً، التربة المكونة من حبيبات دائرية صغيرة تحوي مسامية أكبر من التربة المكونة من حبيبات دائرية مختلفة الأحجام؛ لأنّ الحبيبات الصغيرة تملأ الفراغات بين الحبيبات الكبيرة، وعليه تقلّل المسامية الكلية للتربة.

المسامية هي مقياس لحجم الفراغات تحت سطح الأرض. لذا، فإنها تمثل الكمية الأكبر من المياه الجوفيّة في منطقة معينة. ولكن المسامية لا تخبرنا عن كيفية حركة المياه الجوفيّة. **الموصليّة الهيدروليكية *(Hydraulic conductivity)*** – وهي مقياس للنفاذية- هي التي تخبرنا عن درجة قدرة مادة جيولوجية على تمرير الماء. فإذا كانت الفراغات صغيرة جدًّا وغير متصلة جيدًا (كما هو حال حبيبات الطين المسطحة) فإنّ الماء يتحرك بصعوبة. وللمقاربة؛ فكّر في هذا كما يلي:

فهم العلوم الطّبيعيّة

■ **المسامية**

تخبرنا المسامية عن نسبة الفراغات إلى كامل حجم التربة، أو الرّسوبيّات أو الصخر.

$$\text{المسامية} = \frac{\text{حجم الفراغات}}{\text{حجم الفراغات + حجم المادة الصلبة}}$$

مسألة

إذا كان حجم المادة الصلبة في الرّسوبيّات 975 سم^3، وحجم الفراغات 325سم^3. فما المسامية؟

الحل:

$$\text{المسامية} = \frac{325 \text{ سم}^3}{325 \text{ سم}^3 + 975 \text{ سم}^3}$$

$$= 0.25$$

لذا، فإنّ حجمَ الفراغات ربعُ الحجم الكلي فقط.

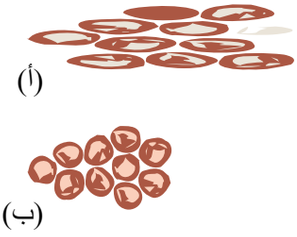
تساوي الموصليّة الهيدروليكية – أو النفاذية- للطين صفرًا تقريبًا. على الرغم من أن مسامية معظم أنواع الطين عالية. وعلى النقيض من ذلك، فإنّ الرمل والحصى لهما مسامات كبيرة مفتوحة ومتصلة جيدًا. ويتحرك الماء بحرية من فراغ إلى آخر. لذلك، فإنّ للرمل والحصى مسامية ونفاذية عاليتين (الشّكل 4.23).

■ **نقطة فحص**

لماذا تعدّ التربة الرملية أفضل لسريان الماء من التربة الطينية؟

هل كانت هذه إجابتك؟

يتحرك الماء بسهولة خلال التربة الرملية لأنها مكونة عادة من حبيبات دائرية. وتحوي مسامات كبيرة متصلة. لذا، فإنّ التربة الرملية ذات نفاذية كبيرة. ونقول الشيء نفسه عند الحديث عن الموصليّة. لا يتحرك الماء بسهولة في التربة الطينية؛ لأنّ الطين يتكوّن من حبيبات مسطحة مع مسامات صغيرة غير متصلة. ولهذا، فإنّ للتربة الطينية موصلية مائية ضعيفة. إنّ جريان الماء أسهل في التربة ذات الموصليّة المائيّة العالية.



الشّكل 4.23

المسامية والنفاذيّة

(أ) حبيبات الرّسوبيّات في الطين صغيرة وفراغاتها ضعيفة التواصل. وعليه، فإنّ للطين مسامية عالية ونفاذية قليلة (توصيل مائيّ ضعيف).

(ب) حبيبات الرّسوبيّات في الرمل أو الحصى ذات شكل وحجم متناسق تقريبًا مع مسامات كبيرة متصلة. يسمح ذلك للماء بالتدفق بسهولة. لذا فإنّ مسامية ونفاذية الرمل والحصى مرتفعتان.

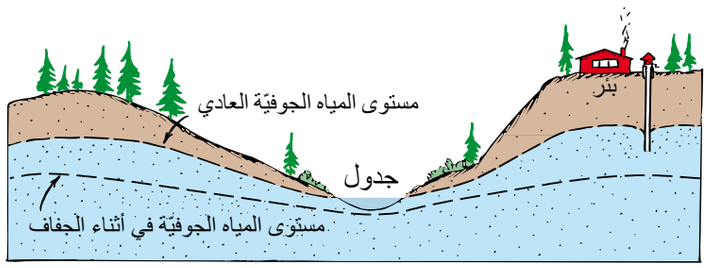
مستوى المياه الجوفيّة (The water table)

عند حفر حفرة في الأرض، فسنجد أنّ رطوبة التربة تختلف مع العمق. تحت السّطح مباشرة، يوجد نطاق التّهوية؛ حيث المسامات مملوءة جزئيًّا بالماء (الشّكل 3.23). ومع النزول أكثر، فإننا نصل نطاق التشبع حيث المسامات مملوءة كليًّا بالماء. إذا كانت الحفرة في نطاق التّهوية فإنها لا تمتلئ بالماء. أما إذا كانت الحفرة أعمق وفي نطاق التشبع فإنها تُملأ بالماء جزئيًّا. يسمى الحد العلوي لنطاق التشبع مستوى **المياه الجوفيّة** (الشّكل 3.23). يمثل مستوى الماء في الحفرة مستوى المياه الجوفيّة. وفي الواقع، فإنّ مستوى المياه في الحفرة هو مستوى المياه الجوفيّة في المنطقة.

يختلف عمق مستوى المياه الجوفيّة تحت سطح الأرض مع الهطل والمُناخ. ويتراوح بين صفر في المستنقعات إلى مئات الأمتار في بعض أماكن الصحراء. كما أنّ مستوى المياه الجوفيّة يرتفع وينخفض مع طبوغرافية سطح الأرض (الشّكل 5.23). وفي البحيرات والجداول الدائمة الجريان يكون مستوى المياه الجوفيّة فوق سطح الأرض.

الشّكل 5.23

يوازي مستوى المياه الجوفيّة سطح الأرض تقريبًا. في وقت الجفاف، ينخفض مستوى المياه الجوفيّة مما يقلل تدفق الجداول ويجفف الآبار. كما ينخفض مستوى المياه الجوفيّة إذا كان معدل ضخّ الماء من البئر أكبر من معدل تعويض المياه الجوفيّة.



الخزّانات الجوفيّة والينابيع (Aquifers and springs)

تسمّى أيُّ منطقة تحوي ماء تحت الأرض حيث يمكن للماء أن يتحرك *خزّانًا جوفيًّا*. توجد هذه الخزّانات تحت سطح الأرض في العديد من المناطق، وتحوي كميات جيدة من الماء. أكثر من نصف مساحة اليابسة في أمريكا تحوي خزّانات مائية تحت السّطح. ومن هذه الخزّانات خزّان أوجالالا الذي يمتد من جنوب داكوتا إلى تكساس، ومن كولورادو إلى أركنساس.

حتى الآن، فإننا نناقش *الخزّانات غير المحصورة*. في الخزّانات غير المحصورة، تكون التربةُ والرّسوبيّات فوق مستوى المياه الجوفيّة ذات نفاذية عالية، *مما يسمح بالمياه بالتغذية* – عملية تخلل الماء إلى أسفل الأرض- ومن ثمّ إلى الخزّان. وعلى الأقل، فإنّ الخزّانات جميعها غير محصورة جزئيًّا، كما في الشّكل 6.23.

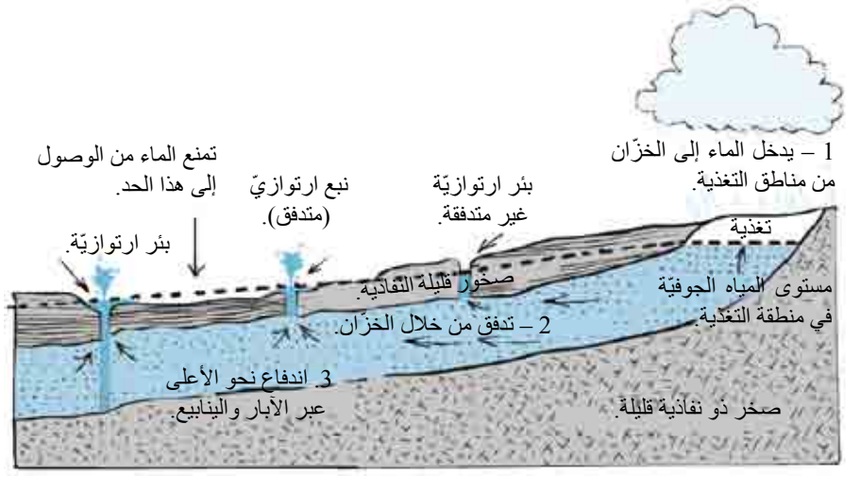
أما النوع الآخر من الخزّانات فهو الخزّان *المحصور*. يعدّ الخزّان محصورًا إذا كان بين طبقتين مستمرتين بنفاذية منخفضة (الشّكل 6.23). توجد الطبقات المحصورة في الرّسوبيّات الحاوية على تتابع طبقات رمل وطين، أو تتابع حجر رملي وغضار. في الخزّانات المحصورة لا تتم التغذية من الأعلى مباشرة؛ لأنّ الماء لا يتخلل الطبقة الحاجزة. ولكن التغذية الطّبيعيّة للخزّانات المحصورة تأتي فقط من الجزء غير المحصور من الخزّان على ارتفاعات عالية.

وكما تعلمنا في الفصل 5، فإنّ الضّغط في الماء يعتمد على ارتفاع الماء فوقه. ويكون الماء في كلّ مكان في الجزء المحصور من الخزّان تحت مستوى المياه الجوفيّة في منطقة التغذية. لذا فإنّ المياه الجوفيّة في الخزّان المحصور – تحت ضغط المياه فوقه- يتدفق من خلال الفتحات في الارتفاعات المنخفضة.

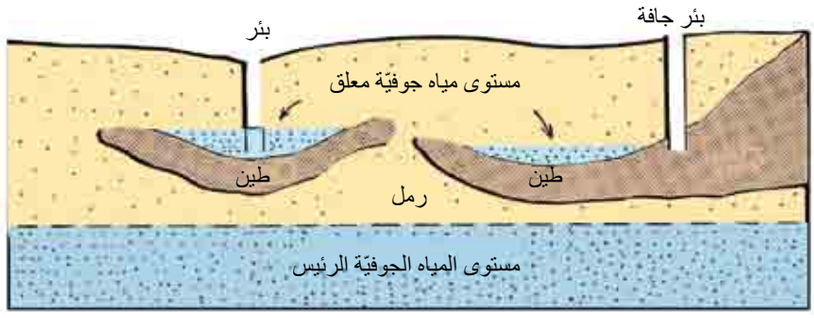
هل تريد رؤية مستوى المياه الجوفيّة؟ معظم البحيرات والبرك هي مناطق يكون فيها سطح الأرض تحت مستوى المياه الجوفيّة.

الشّكل 6.23

يتكون النّظام الأرتيزي (التلقائيّ التّدفّق) عندما ترتفع المياه الجوفيّة في خزّان محصور إلى السّطح من خلال فتحة فيه. يتدفق الماء بحرية إذا كان مستوى المياه الجوفيّة في منطقة التغذية أعلى من مستوى الفتحة (بئر ارتوازيّة متدفقة وينبوع ارتوازيّ). إذا كان ارتفاع الفتحة أعلى من ارتفاع مستوى المياه الجوفيّة في منطقة التغذية فإنّ الماء لا يتدفق (بئر ارتوازيّة غير متدفقة).



* يطلق الجيولوجيون على هذه الطبقات أكيوترز.



الشّكل 7.23
مستوى المياه الجوفيّة المعلق مفصول عن مستوى المياه الجوفيّة الرئيس من خلال طبقة عازلة، هي الطين في هذه الحالة.

هذا هو *النّظام الارتوازيّ (Artesian system)*. إذا كانت الفتحة طبيعية. وكان تدفق الماء إلى السّطح فيسمى *نبعًا ارتوازيًا*. ولكن إذا حُفرت الفتحة فتسمى بئرًا ارتوازيّة. بعض الآبار الارتوازيّة تدفع الماء عشرات الأمتار في الهواء عند حفرها أول مرة.

قد تعترض طبقات غير متصلة وقليلة النفاذية في خزّان غير محصور حركة المياه الهابطة فوق مستوى المياه الجوفيّة. وفي هذه الحالة يتكون الخزّان الجوفيّ المعلق (الشّكل 7.23).

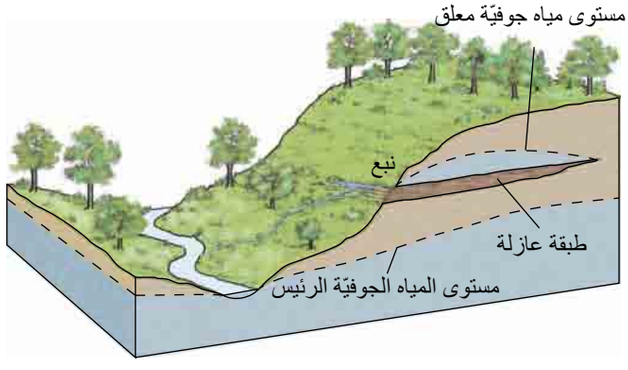
عند تقاطع سطح الأرض مع مستوى المياه الجوفيّة، فإنّ المياه الجوفيّة تظهر من الخزّان على شكل نبع، أو جدول، أو بحيرة (الشّكل 8.23). وقد توجد الينابيع عند تقاطع مستوى المياه الجوفيّة (أو المستوى المعلق) مع السّطح فجأة كجانب جبل، أو جرف على الشّاطىء. ولأنّ الماء يميل إلى أن يتسرب خلال الشقوق والكسور في الصخور، فإنّ الينابيع عادة ما تصاحب الصدوع. وفي الواقع، يحدد الجيولوجيون الصّدوع في الميدان من خلال تحديد مواقع الينابيع.

■ نقطة فحص

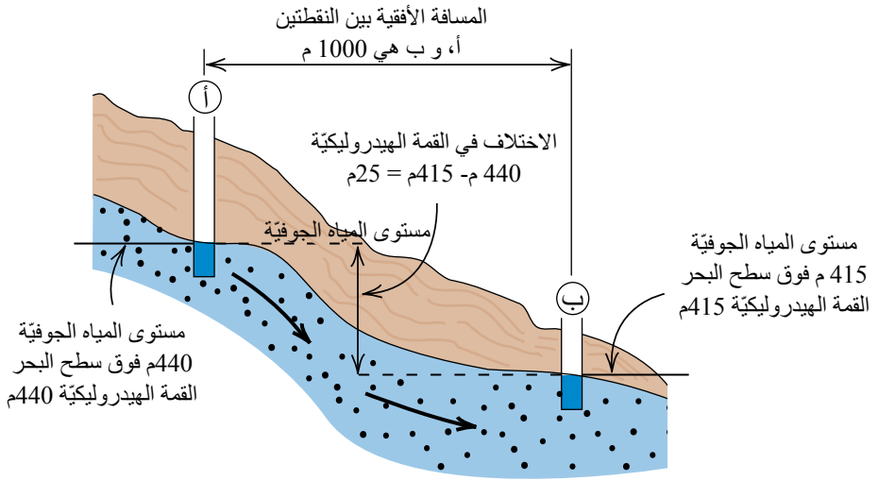
1. ما الخزّان الجوفيّ؟
2. ما الظروف الرئيسة اللازمة لتكوّن نظام ارتوازي؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. الخزّان الجوفيّ هو جسم صخريّ أو جسم رسوبيّ تتحرك خلاله المياه بسهولة.
2. الظرف الرئيس اللازم لوجود نظام ارتوازي هو وجود طبقات عازلة. تسمح هذه الطبقات العازلة للمياه الجوفيّة الموجودة في الخزّانات المحصورة أن تصبح تحت ضغط أعلى من الخزّان غير المحصور. ويؤدي هذا إلى ارتفاع الماء فوق أعلى الخزّان المحصور في الفتحات الطّبيعيّة أو التي من صنع الإنسان.



الشّكل 8.23
عند تقاطع مستوى المياه الجوفيّة مع سطح الأرض، فإنّ المياه الجوفيّة تتحرر. تتحرر المياه من مستوى المياه الجوفيّة المعلق على شكل ينبوع؛ أما من مستوى المياه الجوفيّة الرئيس فتخرج المياه على شكل جدول.



الشّكل 9.23
الممال الهيدروليكيّ هو الفرق بين الارتفاع الهيدروليكيّ بين موقعين مقسومًا على المسافة الأفقية بين الموقعين. في هذا المثال لدينا:

$$\frac{440م-415م}{1000م}$$

حركة المياه الجوفية (Ground Water Movement)

إنّ ارتفاع مستوى المياه الجوفيّة فوق مستوى معين- عادة مستوى سطح البحر- يسمى *القمة الهيدروليكية*. وهذا هو الارتفاع نفسه الذي ترتفع إليه المياه في بئر محفورة في خزّان غير محصور (الشّكل 9.23). وتذكر في الفصل 5 أنّ ضغط السوائل مكافئ لعمق السّائل. وعليه، كلما زاد ارتفاع القمة الهيدروليكية فوق مستوى معين، زاد ضغط الماء في هذا الموقع. يدعى الانحدار في مستوى المياه الجوفيّة *الممال الهيدروليكي*. ويمكن تمثيله كأيّ منحدر "الارتفاع على المسافة" أو في هذه الحالة الفرق بين القمة الهيدروليكية في نقطتين مقسومًا على المسافة الأفقية بينهما.

تتحرك المياه الجوفيّة استجابة لاختلاف الضغط – تتحرك من القمة العالية إلى القمة المنخفضة. لذا، فإنّ حركة المياه الجوفيّة في خزّان جوفيّ تعتمد على الممال الهيدروليكي. ويمكن تمثيل ذلك بـ:

معدل حركة المياه الجوفيّة ~ الممال الهيدروليكي (Hydraulic gradient)

كما يعتمد معدل الحركة على التوصيل الهيدروليكي للتربة والمقطع المساحي للخزّان. يكون المقطع المساحي للخزّان دائمًا متعامدًا مع اتجاه الحركة. (مثل أنبوب الماء، حيث إن المقطع المساحي هو دائرة تمثل قطر الأنبوب). تكون قيم التوصيل الهيدروليكي مرتفعة في الحصى ومنخفضة في الرمل الناعم أو الغرين. وعند إيجاد التوصيل الهيدروليكي والمقطع المساحي، فيمكن التعبير عن العلاقة السابقة بدقة من خلال المعادلة الآتية:

معدل حركة المياه الجوفيّة = التوصيل الهيدروليكيّ × المقطع المساحيّ × الممال الهيدروليكيّ

وقد وُضعت هذه المعادلة من قبل المهندس الفرنسي هنري دارسي عام 1856م، وتسمى *قانون دارسي*.

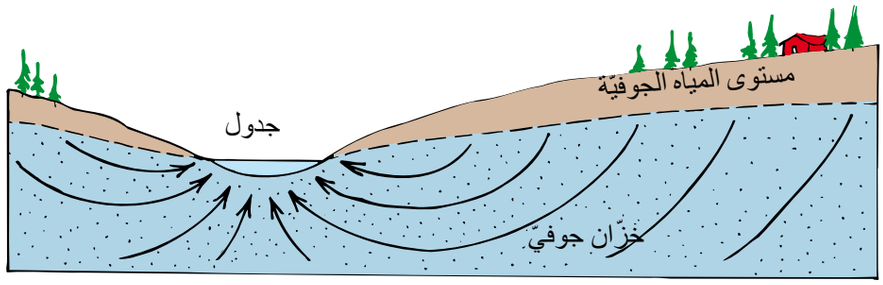
تؤدي الطبوغرافية دورًا رئيسًا في حركة المياه الجوفيّة؛ لأنها تخلق الممال الهيدروليكي. تتحرك المياه الجوفيّة من المناطق التي يكون فيها مستوى المياه الجوفيّة مرتفعًا إلى المناطق التي يكون فيها المستوى منخفضًا، أي أنها تتحدّر (الشّكل 10.23).

إنّ سرعة حركة المياه الجوفيّة، بصورة عامة، بطيئة جدًّا مقارنة بسرعة حركة الأنهار والجداول. وكلما زادت نفاذية الخزّان الجوفيّ زادت السّرعة، وكلما زاد الممال الهيدروليكي زادت السّرعة أيضًا.

لمعلوماتك

- تتحرك حركة المياه الجوفيّة، والحرارة، وتيار الكهرباء كلّها استجابة لاختلاف الضّغط.

يعدّ اتصال مفاهيم مختلفة بالمفهوم نفسه أمرًا مناسبًا.



الشّكل 10.23
تتحرك المياه الجوفيّة من مناطق القمة الهيدروليكية العالية كقاعدة جبل مثلًا، إلى مناطق القمة الهيدروليكية المنخفضة كأسفل مجرى جدول مثلًا. الأسهم المنحنية تدلّ على الحركة، مما يوضح أنّ النّهر يُغذّى من أسفل.

يمكن قياس سرعة حركة المياه الجوفيّة ومسارها عن طريق وضع صبغة في بئر ومراقبة الزمن الذي تحتاج إليه للانتقال إلى البئر المجاورة. في معظم الخزّانات الجوفيّة، تكون سرعة المياه الجوفيّة عدة سنتمترات في اليوم، مما يكفي لإبقاء الخزّان الجوفيّ ممتلئًا.

3.23 عمل المياه الجوفيّة

تسبب المياه الجوفيّة المتحركة – بصرف النظر عن مقدار بطئها – تغيرات كبيرة في الأرض. ويمكن لهذه التغيرات أن تحدث بسبب تدخّل البشر أكثر من حدوثها في حال عدم تدخّلهم.

هبوط الأرض

تحفر معظم الآبار بحيث يمكن ضخّ المياه الجوفيّة من الأرض. في المناطق التي يكون فيها ضخّ المياه الجوفيّة كبيرًا، فإنّ سطح الأرض ينخفض – يهبط.

فهم العلوم الطّبيعيّة

قانون دارسي

بمعرفة أبعاد الخزّان الجوفيّ، وتوصيله الهيدروليكي، والقمة الهيدروليكية في بداية الخزّان ونهايته ، فإنه يمكن استخدام قانون دارسي لحساب معدل حركة المياه الجوفيّة. مرة أخرى، ينصّ قانون دارسي على أنّ
معدل حركة المياه الجوفيّة = التوصيل الهيدروليكي × المقطع المساحي × الممال الهيدروليكي.
افترض وجود خزّان جوفيّ طوله 10كم بين بحيرتين. تم قياس مقطع متعامد مع الطول، أي مقطع مساحي 200000 م^2. ارتفاع المياه في بحيرة أ 215 م فوق سطح البحر. وارتفاع سطح المياه في بحيرة ب 210م فوق سطح البحر. التوصيل الهيدروليكي للخزّان 10م/ اليوم.

السّؤال الأول:
ما الممال الهيدروليكي للخزّان؟

السّؤال الثاني:
ما معدل حركة المياه الجوفيّة في الخزّان؟

حلّ السّؤال الأول:
سطح البحيرة يعطينا موقعين نعرف منهما القمة الهيدروليكية. في البداية، علينا معرفة المسافة والارتفاع الهيدروليكي بوحدات القياس نفسها.

$$10 \text{ كم} \times \frac{1000 \text{م}}{1 \text{كم}} = 10000 \text{م}$$

$$\text{ثم الممال الهيدروليكي} = \frac{210 \text{م} - 215 \text{م}}{1000 \text{م}} = 0.0005 \text{ (يتم حذف الوحدات)}$$

حل السّؤال الثاني:
معدل حركة المياه الجوفيّة =
$$10 \text{م/يوم} \times 200000 \text{ م}^2 \times 0.0005 = 1000 \text{ م}^3\text{/يوم}$$

الشّكل 11.23
برج بيزا المائل. بدأ البناء فيه عام 1173، ثم توقف عندما لاحظوا أنّ الأساسات غير مناسبة. ومن ثمّ استكمل العمل به والانتهاء من بنائه بارتفاع 60 م بعد 200 سنة. الانحراف عن العمودي هو 4.6 م. ثبتت أساسات البرج من خلال إدارة معدل سحب المياه الجوفيّة، لذا فإنّ البرج الآن سيبقى ثابتًا لسنوات.

إنّ مشكلة الهبوط تكون أبرز ما يمكن عندما تتكوّن المواد تحت السّطح من تتابع سميك من رسوبيات غير متماسكة جيدًا وليس صخرًا. ومثل هذا التتابع عادة ما يحوي طبقات طينية حاملة للماء وقليلة التّراصّ، محصورة بين طبقات رملية متتابعة في خزّان جوفيّ رمليّ. تذكّر أنّ الطين له توصيل هيدروليكي منخفض. ومع ضخّ الماء من الخزّان، فإنّ الماء يتسرب ببطء من طبقات الطين ليعوض الخزّان بعض مائه الذي تستمر منه عملية الضّخّ. ومع فقدان الطين للماء، فإنه ينكمش ويؤدي إلى هبوط سطح الأرض.

إنّ برج بيزا المائل في إيطاليا هو أشهر مثال معروف عن هبوط الأرض؛ حيث بني على رسوبيات غير متماسكة من نهر أرنو. وبمرور السّنين، أدت عملية ضخّ المياه الجوفيّة إلى الهبوط وزيادة ميل البرج (الشّكل 11.23). وفي الولايات المتحدة، ضُخّت كمية كبيرة من المياه الجوفيّة للرّي في وادي سان جوكوين في كاليفورنيا. وقد أدت هذه العملية إلى انخفاض مستوى المياه الجوفيّة 75م في 20 سنة، مما أدى إلى انخفاظ سطح الأرض 9م (الشّكل 12.23). ولأنّ مياه الرّي أصبحت الآن توزع بالقنوات، فإنّ الخزّانات الرّملية بدأت تتغذى ببطء، غير أنّ معظم الهبوط الناجم عن تراصّ طبقات الطين على الطبقات الطينية لا يمكن عكسه.

الشّكل 12.23
سطح الأرض في وادي سان جوكين في كاليفورنيا انخفض 9 م (30 قدمًا) خلال 50 سنة بسبب ضخّ المياه الجوفيّة ورصّ الرّسوبيّات.

■ **نقطة فحص**

لماذا تهبط الأرض في المناطق التي تحتوي على طبقات طينية تحت الأرض بين طبقات خزّان رملي؟

هل كانت هذه إجابتك؟

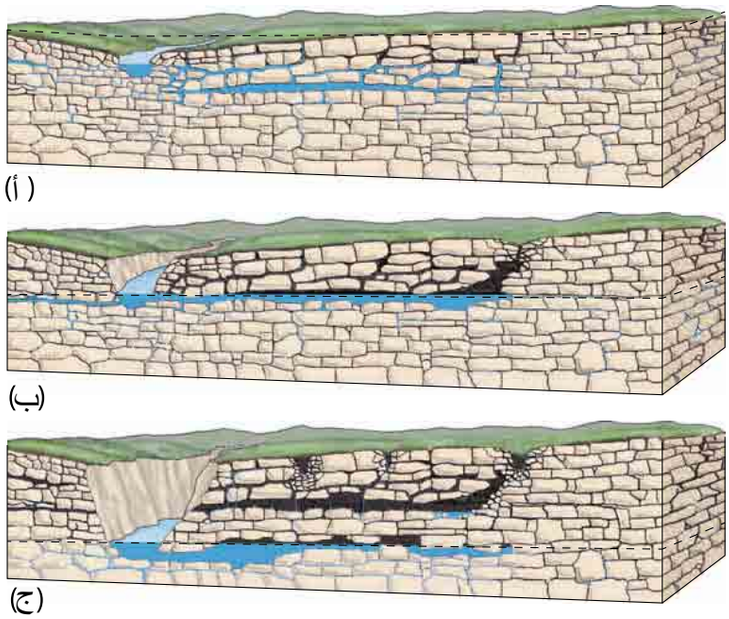
تخسر الطبقات الطينية الماء، وتتراصّ مع ضخّ المياه من الخزّانات المجاورة. ويؤدي هذا التّراصّ إلى هبوط الأرض.

ذوبان الكربونات (Carbonate dissolution)

يتم تخزين المياه الجوفيّة في رسوبيات حجارة جيرية كثيرة توجد تحت ملايين الكيلومترات المربعة من سطح الأرض. ولكن المياه الجوفيّة تأكل ببطء الحجر الجيري المستضيف لها. وتذكر من الفصل 20 أنّ الحجر الجيري مكوّن من معدن الكالسيت $CaCO_3$. تتفاعل مياه الأمطار مع ثاني أكسيد الكربون في الهواء والتربة فتكوّن حمض الكربونيك. وعندما ترشح إلى الحجر الجيري أسفل، فإنّ المياه الجوفيّة الحمضية قليلا تبدأ في إذابة الصخر جزئيًا.ومع استمرار إذابة الحجر الجيري، فإنه يكوّن مظاهر حتّ غير عادية مثل الحفر الغائرة sinkhole والكهوف. لا توجد الأنهار تحت السّطحيّة إلا في الحجر الجيري، أمّا في الصخور الأخرى والتربة، فإنّ المياه الجوفيّة توجد في المسامات، وليس في قنوات كبيرة مفتوحة.

الكهوف والمغارات لقد نحتت عملية الإذابة بالمياه الجوفيّة كهوفًا ومغارات أخّاذة. تتحرك المياه الجوفيّة في خزّانات الحجر الجيري غالبًا خلال الشقوق في الصخر وليس خلال المسامات. تتحرك مياه الأمطار (الغنية بحمض الكربونيك) المترشحة إلى الحجر الجيري نحو الأسفل خلال الشّقوق لتصل منسوب المياه الجوفيّة، وتذيب الصّخور خلال طريقها. ومع حركة المياه الجوفيّة إلى مخرجها، فإنّ المياه الحمضية نسبيًّا تذيب الحجر الجيري المحيط. فتوسع الشّقوق، وتكوّن كهوفًا وقنوات تحت الأرض (الشّكل 13.23 أ).

ماء النّهر حمضي أيضًا، ويعمل على إذابة قناة النّهر وتعميقها، في حين تعمل المياه الجوفيّة على توسعة الكهوف. ومَعَ نزول مستوى كلّ من المياه الجوفيّة والنّهر، فإنّ الماء يتمّ تصريفه من المجموعة الأولى من القنوات والكهوف.



الشّكل 13.23

يبدأ تكون الكهوف بطبقة من الصخور الكربونية ومياه جوفيّة حمضية قليلًا وفترة زمنية طويلة. (أ) تأخذ المياه الجوفيّة طريقها إلى جدول. (ب) ينخفض منسوب المياه الجوفيّة مع تعمق الوادي النّهري بسبب التعرية. يتم تآكل صخور الكربونات بسبب تعرضها للتعرية في المياه الحمضية، وتبدأ الشقوق الموجودة تكبر بحيث تتحول إلى كهوف صغيرة. (جـ) ومع تعمق الوادي أكثر، ينخفض منسوب المياه الجوفيّة أكثر وتتخلل المياه نحو الأسفل تاركة كهفًا فارغًا فوق مستوى مياه جوفيّة منخفض.

تستمر المياه الجوفيّة بإذابة الحجر الجيريّ مكونة قنوات وكهوفًا جديدة على مستوى أكثر انخفاضًا (الشّكل 13.23 ب، 13.23 جـ).

يكون الماء الذي يقطر من سقف الكهف غنيًّا بكربونات الكالسيوم؛ لذا فإنه يكوّن هوابط ذات شكل قمعيّ عند تبخّر الماء وترسب كربونات الكالسيوم. ويقطر بعض السّائل المائيّ من نهاية الهوابط ليبني صواعد ذات شكل قمعيّ على الأرض (الشّكل 14.23).

الحفر الغائرة هي فجوات ذات شكل قمعي في الأرض تكون مفتوحة نحو السماء. تتشكّل بالطريقة نفسها التي تتشكّل بها الكهوف. تعمل المياه الجوفيّة على إذابة الحجر الجيري، وفي النهاية ينهار السّطح. بعض الحفر الغائرة عبارة عن كهوف انهار سقفها. في حين تشكّل بعضها الآخر من ظروف جفاف، أو ضخّ جائر للمياه الجوفيّة.

أقاليم الكارست: عند توزع الحفر الغائرة والكهوف والمغارات على سطح الأرض، فإنّ المنطقة تسمى *طبوغرافية كارستية*. وقد سميت بهذا نسبة إلى منطقة كارست في يوغوسلافيا؛ حيث إنّ تجوية الحجر الجيري وتعريته هي المميزة لسطح الأرض. إنّ نمط الجداول في هذا النوع من الأرض غير منتظم، وتختفي الأنهار والجداول في الأرض، وتظهر على شكل ينابيع. بعض مناطق الكهوف تبدو رطبة، فتكون على شكل تلة كروية مع هبوط كبير في الوسط. يكون الهبوط عبارة عن حفر غائرة قديمة مغطاة بالنباتات الآن (الشّكل 15.23). وعمومًا تتميز المناطق الكارستية بسطوح حادة وقاسية، مع وجود تربة رقيقة أو دون تربة بسبب الجريان السّطحي العالي، وذوبان المواد السّطحيّة.

الشّكل 14.23

تشكّل صخور القطرات في الكهوف.

لمعلوماتك

- كهوف ومغارات جميلة موجودة في المكسيك، (كارلسباد)، ينابيع بلا نشادر في أركنساس، كهوف الماموث في كنتاكي، وكهف ادلسبيرج في النمسا، وكهف الحظ الجيد في بورنيو.

الشّكل 15.23

طبوغرافية الكارست مغطاة بالنباتات تكوّن التلال الكروية في جنوب وسط كنتاكي.

4.23 المياه السّطحيّة وأنظمة التّصريف

الجداول –المياه السّطحيّة المتدفقة جميعها، من أكبرها كنهر المسيسبي إلى أصغر قناة ضحلة في الغابة- هي أنظمة ديناميكية تؤثر في سطح الأرض والناس التي تعيش هناك. وللجداول فوائد كثيرة، منها: توليد الطّاقة، والرّي، ووسيلة مواصلات.

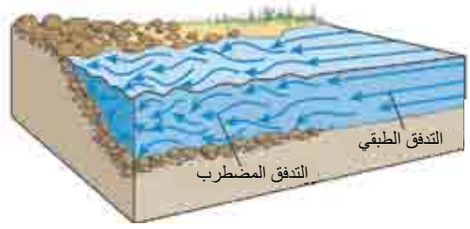
الشّكل 16.23
مظاهر الكارست في الصّين كانت موضع إلهام لفناني الرّسم الصينيين على مدى عصور.

لمعلوماتك

■ يمكن رؤية الأقاليم الكارستية حول العالم. في حوض المتوسط في بعض مقاطع جبال الألب والبرينيس في جنوب الصين. وفي أمريكا في كنتاكي. ميسوري فلوريدا وتينسي.

تعمل الجداول على نحت المشاهد الأرضية وتغييرها. ويعدّ الأخدود العظيم شاهدًا على قوة الحتّ العظيمة لنهر كولورادو؛ فقد عمل هذا النّهر على نحت جدران الوادي وتعميقه داخل الصخور خلال طريقه إلى المحيط عبر ملايين السنين. ومع ذلك. تقوم المياه السّطحيّة بدور آخر مناقض في أثناء تغيير المشاهد الأرضية-فهي تُوضّع الرّسوبيّات. وبهذه الطريقة. تكون المياه السّطحيّة مدمرة. ومكوّنة للرسوبيات والصّخور الرسوبية في آن معًا.

ينجم تغيّر المشاهد الأرضية – تغير مستمر لسطح الأرض- عن خصائص الجريان السّطحي للماء. ولطريقة التدفق تأثير كبير في كيفية تغيير الماء للمشاهد الأرضية. إنّ خصائص تدفق الماء الجاري على نوعين: مضطرب ورقائقيّ (الشّكل 17.23). فعندما تتحرك المياه نحو أسفل النّهر دون انتظام. وتحرك كلّ شيء تلامسه. فالتّدفق يكون **مضطربًا *(Turbulent)***. ولكن عندما تتدفق المياه نحو أسفل النّهر بثبات دون تحريك للرسوبيات. فإنّ التّدفق يكون رقائقيًّا. وعمومًا فإنّ التّدفّق البطيء الضّحل يكون رقائقيًّا (*Laminar*). أمّا التدفق السّريع فعادة ما يكون **مضطربًا**. وكيفما يكون التّدفق رقائقيًّا أو مضطربًا. فإنّ هذا يعتمد على طبيعة المجرى. وشكله الهندسيّ. وسرعة جريانه.



الشّكل 17.23
التدفق الطبقي بطيء وثابت دون خلط لرسوبيات القناة. التدفق المضطرب سريع يخلط كلّ شيء في التدفق.

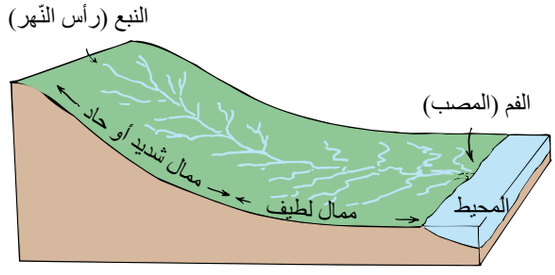
هيئة تدفق النّهر (Stream flow geometry)

تأتي الأنهار بعدة أشكال هي: مستقيم أو منحن. وسريع أو بطيء. في بداية مجرى النّهر. تكون قناة النّهر ضيقة. ويتحرك الماء بسرعة خلال أودية عميقة لها شكل حرف V. ومع التوجه نحو أسفل النّهر. يتسع المجرى. ثمّ يتحرك الماء في مجار عريضة ومنخفضة وعلى امتدادها.

وهناك ثلاثة متغيرات تؤثر في سرعة الماء في النّهر هي: *ممال النّهر. وصبيبه. وشكل القناة.* **فالممال *(Gradient)*** هو الانخفاض العمودي في المجرى مقسومًا على المسافة الأفقية لهذا الانخفاض. فإذا نظرنا إلى مقطع طوليّ لنهر (الشّكل 18.23). فسنرى أنّ الممال يكون شديدًا عند بداية النّهر وبطيئًا قريبًا من الأفقيّ عند مصب النّهر. وبسبب الجاذبية. تميل سرعة النّهر إلى أن تكون أعلى عندما يكون الممال شديدًا.

أما الصبيب *(Discharge)*. فهو حجم الماء الذي يمر من نقطة معينة في القناة في فترة زمنية محددة. ويتناسب مباشرة مع مساحة مقطع القناة العرضيّ- العمق × عرض القناة- ومعدل سرعة النّهر:

الصبيب = مساحة المقطع × معدل سرعة النّهر



الشّكل 18.23
مقطع طولي لنهر. يكون الممالُ عند رأس النّهر شديدًا، والقناة ضيقة وضحلة، وسرعة التدفق كبيرة. ولكن مع تقدم النّهر نحو الأسفل، يقلّ الانحدار، ويزداد عرض القناة، ويزداد الصبيب.

وبصيغة أخرى:

معدل سرعة النّهر = الصّبيب/ مساحة المقطع

وعادة ما تكون سرعة النّهر غير ثابتة على طول امتداده. فعند منبع النّهر، يكون المجال شديدًا. لذا، تكون السرعة مرتفعة. وفي الواقع، فإنّ هذه المقاطع المرتفعة من الأنهار تسمى "المسرِّعات/rapids" . ومع تقدم النّهر نحو أسفل مجراه، يقل المجال تدريجيًّا، ويزداد عرض القناة. ولأنّ روافد النّهر تغذّيه فإنّ صبيبه يزداد.

وبما أنّ سرعة النّهر تعتمد على ثلاثة متغيرات، فإنّ تغير سرعته أسفل المنحدر مضاد للبديهة. تخيل نهرًا يزداد صبيبه إلى الضعف أسفل المنحدر، ولكن حجم القناة وشكلها يبقيان كما هما. فبالنظر إلى معادلة سرعة النّهر، نرى أنّ سرعة النّهر تتضاعف. الآن، افترض وجود نهر ازداد صبيبه إلى الضعف أسفل المنحدر، وازدادت مساحة مقطعه إلى الضعف أيضًا. عندما يكون الاحتكاك ثانويًّا، فإنّ سرعة النّهر لا تتغير، مع أنّ الصبيب قد ازداد. وتزداد مساحة المقطع بنسبة زيادة الصبيب نفسها. لذا فإنها تعمل كبديل للكمية الإضافية من الماء دون زيادة سرعة النّهر. هل ترى أنّ سرعة النّهر أسفل المنحدر يمكن أن تقلّ؟

أما المتغير الثالث الذي يؤثر في سرعة النّهر فهو شكل القناة. الآن افترض نهرين لهما مساحة المقطع نفسها. وأنّ الماء المتدفق يلامس قاع القناة وجوانبها. يؤدي الاحتكاك بين الماء والقناة إلى إبطاء سرعة النّهر. ويحدد شكل مقطع القناة كمية الماء المتصلة بها. فكلما ازدادت مساحة منطقة الاتصال زاد الاحتكاك (الشّكل 19.23). وإذا كانت قناة النّهر دائرية وعميقة، فستكون السرعة عالية لأنّ الماء أقلّ احتكاكًا.

لمعلوماتك

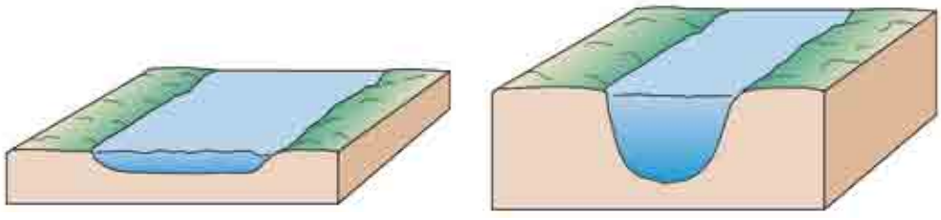
■ إذا ضغطت نهاية أنبوب ماء الحديقة البلاستيكي، فسترى ازدياد سرعة الماء المتدفق عندما تصبح الممرات ضيقة. تمامًا كما يحدث عند تدفق الأنهار.

■ **نقطة فحص**

1. افترض نهرًا تزداد حمولته إلى الضعف أسفل المنحدر، ولكن شكله وحجمه يظلان كما هما. الآن، انظر إلى معادلة سرعة النّهر. فماذا يحدث لسُرعته؟
2. افترض نهرًا يتضاعف صبيبه وتتضاعف مساحة مقطعه. وافترض كذلك عدم وجود مياه تدخل من الروافد وأنّ الاحتكاك غير مهم. فماذا يحدث لسرعة النّهر؟
3. إذا قلّ الانحدار، وبقيت مساحة مقطع النّهر كما هي، فهل يبقى الصبيب هو نفسه؟ افترض عدم دخول الماء من الروافد، وأنّ الاحتكاك غير مهم.

هل كانت هذه إجابتك؟

1. تزداد السّرعة إلى الضعف.
2. تزداد مساحة المقطع والصبيب بالنسبة نفسها. لذا فإنّ السرعة لا تزداد.
3. لا؛ لأنّ الانخفاض في المجال يقلل سرعة النّهر. والصبيب يزداد.



(أ) قناة دائرية عميقة (ب) قناة عريضة ضحلة

الشّكل 19.23

(أ) في القناة الدائرية العميقة، تكون سرعة تدفق الماء عالية نسبيًّا؛ لأنّ الكمية الملامسة للقناة قليلة (احتكاك أقلّ). (ب) في القنوات العريضة الضحلة يكون تدفق الماء بطيئًا؛ لأنّ كمية الماء الملامسة للقناة كثيرة (احتكاك أكثر).

أحواض التّصريف وشبكاته (Drainage basins and networks)

النّهر جزء صغير من نظام أكبر يسمى *حوض التّصريف*. يعرف حوض التّصريف بأنه المساحة الكلية التي تسهم في تغذية نهر معين بالماء. وقد يغطي حوض التّصريف منطقة شاسعة أو صغيرة بمقدار 1كم^2. تفصل أحواض التّصريف بعضها عن بعض *بخطوط التقسيم*، وهي خطوط تصل بين أعلى النقاط بين الأحواض. وفي معظم الأحيان، يكون الفصل تامًّا: فالمطر الذي يهطل على جانب من خط التقسيم لا يمكن أن يسيل إلى الحوض المجاور. وقد يكون خطّ التقسيم طويلًا جدّا عندما يفصل بين حوضي تصريف كبيرين، أو أن يكون مجرد مرتفع صغير يفصل جدولين. *إنّ خطّ التقسيم القاريّ* هو خطٌّ متصل يمتد من الشّمال إلى الجنوب على طول أمريكا الشّمالية، ويفصل حوض المحيط الهادي في الغرب عن حوض المحيط الأطلسي في الشّرق. وفي النهاية، يذهب الماء في غرب الفاصل إلى المحيط الهادي، أما الماء في شرقه فيسير إلى المحيط الأطلسي (الشّكل 20.23).

كما ذكرنا، تتحد الأنهار بعضها مع بعض في أثناء جريانها إلى الأسفل لتصبح أكبر وأكبر. تسمى مجموعة الأنهار التي تصرف منطقة معينة *شبكة التّصريف* التي قد تتصف بالنسق المتفرع لأنهارها (الشّكل 21.23). ولأنّ الأنهار تعرّي سطح الأرض، لذا تعرّي الصّخور والمواد الصّخرية على الأرض، إنّ أشكال التّصريف تتأثر بنوع الصّخور ونوع المادة الصّخريّ المعراة.

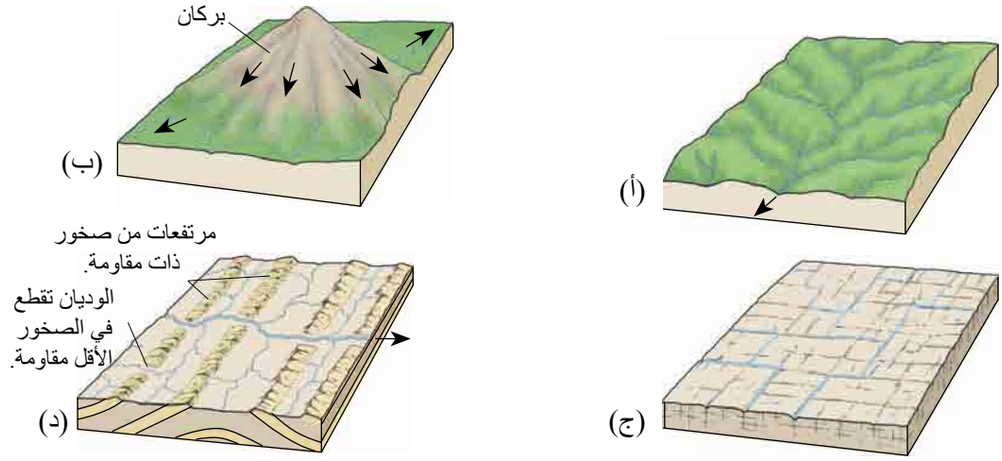
■ نقطة فحص

ما الفرق بين حوض التّصريف وشبكة التّصريف؟

هل كانت هذه إجابتك؟

حوض التّصريف هو مجموع المساحة التي تسهم في تغذية النّهر بالماء. وتتضمن الأنهار جميعها. أما شبكة التّصريف فتتضمن الأنهار التي تصرف الماء في الحوض فقط. لذا فإنّ شبكة التّصريف هي جزء من حوض التّصريف.

الشّكل 20.23
يفصل خطُّ التقسيم القاريّ في أمريكا الشمالية حوضَ الهادي في الغرب عن حوضِ الأطلسي في الشّرق.



الشّكل 21.23
أنماط تصريف مختلفة تتطور اعتمادًا على المادة السّطحيّة والتركيب السّطحي.
(أ) شجري. (ب) شعاعي. (جـ) مستطيل. (د) متواز.

5.23 عمل المياه السّطحيّة

يشكّل الماء السّطحي المتدفق سطح الأرض وينحته بطرق متعددة اعتمادًا على *البيئة الجيولوجية*. تتميز بعض البيئات بالتعرية، في حين يتميز بعضها الآخر بالتّرسيب. وبعض هذه البيئات هادئ، أما بعضها الآخر فهائج.

تعرية الرّسوبيّات ونقلها (Erosion and Transport of Sediment)

تعلمنا في الفصل 20 أنّ التجوية والتعرية تحركان الرّسوبيّات. وأنّ التعرية بالماء هي أكثر الطرق شيوعًا لنقل الرّسوبيّات الفتاتية بعيدًا عن مناطق تشكّلها. تعمل المياه السّطحيّة على تعرية الرّسوبيّات والصّخور، ونقلها إلى أسفل المجرى، وفي النهاية ترسيبها في مكان آخر. وبهذه الطريقة، يساعد الماء على تشكيل المشاهد الأرضية.

يعمل الماء المتدفق على تعرية قناة النّهر بطرق عدة. في البداية، يحتوي ماء النّهر على العديد من المواد الذائبة التي تُحْوّي كيميائيًّا وتعرّي الصّخور التي تواجهها. إنّ الآلية القوية الأخرى للتعرية هي *الفعل الهيدروليكي*؛ أي قوة المياه الجارية. فالأنهار سريعة الجريان، ولها قوة تعرية كبيرة في مرحلة الفيضان، فهي تكسر كميات كبيرة من الرّسوبيّات والصّخور وتفككها. إنّ أكثر أنواع التعرية فاعلية هو البري *abrasion*. يحدث البري عندما تصقل الحبيبات والرّسوبيّات قناة، مثلما يصقل ورق الصنفرة الخشب. وعندما تقوى بالماء الهائج، فإنّ حبات الصّخر تدور كالمثقب فتحفر فتحات عميقة (الشّكل 22.23). وكلما زادت سرعة التيار، زاد كلّ من الاضطراب والبري.

إنّ التعرية هي بداية قصة تغيير الماء السّطحي لسطح الأرض. فالأنهار لا تحمل الماء فقط ، بل إنها تنقل كميات كبيرة من الرّسوبيّات من مكان إلى آخر. وعمومًا فإنّ التدفق الرقائقي يمكن أن يحمل الحبات الصغيرة والخفيفة فقط. أمّا التدفق المضطرب واعتمادًا على سرعته، فباستطاعته حمل وتحريك مدًى كبير من الحبات: من حبات صغيرة بحجم الطين إلى حبات الحصى الكبيرة والصغيرة. يجمع التيار المضطرب الحبات ويحركها نحو أسفل النّهر عن طريق حملها أو دحرجتها وانزلاقها على قاع القناة. يمكن حمل الحبات الصغيرة الناعمة بسهولة، وتبقى معلقة لتجعل الماء عكرًا.

كما يمكن توقّع أنّه كلما ازدادت سرعة التيار، ازداد حجم الحبات التي يحملها. إضافة إلى أنه كلما زاد حجم الماء زاد حجم الرّسوبيّات التي يمكن حملها. لذا فالأنهار التي لها صبيب أكبر تستطيع حمل كميات أكبر من الرّسوبيّات، والأنهار التي تتحرك بسرعة يمكن أن تحمل حبات أكبر من الرّسوبيّات.

الشّكل 22.23
عند تقوية الحبات باضطراب الماء، فإنّها تدور كالمثقب، وتحفر في الصّخور.

لمعلوماتك

- تعمل أبعاد النّهر وماله وصبيبه وحمولته الرّسوبيّة وسرعته مجتمعة على التأثير في جريانه. وبالمثل فإنّ النّهر نظام متداخل؛ بحيث يؤدي أيُّ تغيّر في أيّ متغير إلى تغيّر في النّظام كله.

إن البري المتواصل للرسوبيات في قناة النّهر يفتتها، ويؤدي إلى نقصان نهائي في حجم الحبات أسفل النّهر. وعند فم النّهر، تبقى الحبات الناعمة من الرمل، والغرين، والطين فقط. وكما سنرى قريبًا، فإنّ هذه الحبات الصغرة تترسب لتكوّن دلتا عندما يفقد النّهر سرعته حال دخوله البحر.

■ **نقطة فحص**

أيّ التدفقين أكثر فاعلية في نقل الرّسوبيّات: الرقائقيّ أم المضطرب؟ وضّح إجابتك.

هل كانت هذه إجابتك؟

التدفق المضطرب أكثر فاعلية؛ لأنّ حركة الماء غير منتظمة، وتبقى الرّسوبيّات معلقة. يحمل التدفق المضطرب هذه الرّسوبيّات بسبب قوة مياهه. أمّا في التدفق الرقائقي، فإنّ الماء يتحرك بثبات في خطّ مستقيم دون خلط للرسوبيات في القناة.

بيئات الحتّ والتّرسيب (Erosion and Despotional Enviroments)

وفي النهاية، تسقط الحبات التي نقلت بالمياه السّطحيّة وتترسب. ويحدث هذا عندما يفقد الماء طاقته وتقل سرعته. ومع فقدان النّهر لطاقته بالتدريج، تبدأ الحبات الكبيرة في التّرسيب أوّلًا، ومن ثَمَّ الحبات الأصغر، مما يجعل فرز الرّسوبيات جيدًا.

المظهر السائد للتوضّعات المترسبة هي الطريقة التي تتوضّع بها حبات الرّسوبيّات: طبقة فوق أخرى أفقيًّا. وتسمى هذه *طبقات*. تختلف الطبقات بعضها عن بعض في السّمك والمساحة، وتمثل كلّ طبقة فترة زمنية من التّرسيب. فمثلًا، قد تنتج عن فيضان في سنة معينة طبقةٌ من الرّسوبيّات بجانب النّهر، ثم يرسّب الفيضانُ في أيّ وقت بعدها طبقةً فوقها. وتمثّل بعض الطبقات ترسيبًا قد حدث على مدى أكثر من 1000 سنة.

يحدث توضّع الرّسوبيّات وتعريتها في بيئات مختلفة، منها: المحيطات، والشواطئ، والأنهار، والجداول، والصحارى، والدّلتا. إنّ كلّ بيئة تتضمن تعرية، ونقلًا، وترسيبًا. كما أنّ لكلّ بيئة خصائص محدّدة.

الشّكل 23.23

في منطقة منبع النّهر، يساهم الممال في تكوّن المسرعات المتحركة. وعند وجود تغير مفاجئ في الممال فإننا نرى شلالات جميلة.

مجاري الأنهار والسّهول الفيضية (Stream Valley and Flood Plains)

عندما ترتطم مياه الأمطار بالأرض، تعمل على تفتيت التربة وغسلها بعيدًا. ومع هطل أمطار أكثر على الأرض، يستمر فقدان التربة وتتشكّل المجاري الصغيرة. وعندما تبدأ حبات التربة والماء التحرك في المجرى تنشأ حينها قناة الجدول. وقد تكون هذه التعرية سريعة، كما في تعرية الرّسوبيّات غير المتماسكة، أو بطيئة كما في تعرية الصّخور الصّلبة. هذا، وتساعد قوة التعرية في الماء على توسيع القناة وتعميقها، وكذلك على نقل الرّسوبيّات بعيدًا. ومع الزمن تؤدي إلى تكوّن وادٍ. أما في مناطق الجبال العالية، فتعمل تعرية الجدول على قطع الصّخور السفلى لتكوين وادٍ بحرف (V). ولأنّ الوادي ضيق، فإنّ قناته تكوّن قاع الوادي جميعه. وتعد المسرّعات والشلالات الجميلة ميزة لأودية الجبال ذات الشّكل (V) الشّكل (23.23).

عندما يغادر جدول سريع جبلي واديه الضيق فإنه يظهر على سطح واسع منبسط. تقل سرعته فجأة، ويطرح الجدول حمولته من الرّسوبيّات. وفي العادة، فإنّ هذا النوع الجداول لا يجري أكثر من ذلك. تكون الرّسوبيّات عادة على هيئة مروحة، وتنمو نحو الخارج مع إضافة الرّسوبيّات (الشّكل 24.23). تسود الجلاميد والحصى الكبير والصغير في الجزء العلوي للمنحدر من هذه الرّسوبيّات، في حين يتكون القاع والمناطق المحيطة من رمل، وغرين، وطين.

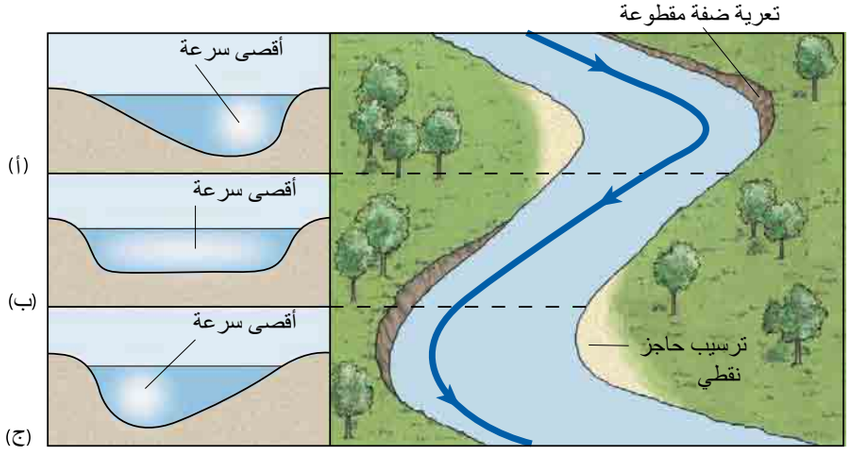
أما الأنهار التي تستمر، فإنّ سرعة الجدول تؤدي دورًا مهمًّا في الحتّ والتّرسيب. وبالإضافة إلى التغيرات التي ناقشناها سابقًا، فإنّ سرعة النّهر تختلف في القناة من ضفّة إلى أخرى.

الشّكل 24.23
رسوبيات فتاتية على هيئة مروحة ترسبت في وادي الموت، كاليفورنيا.

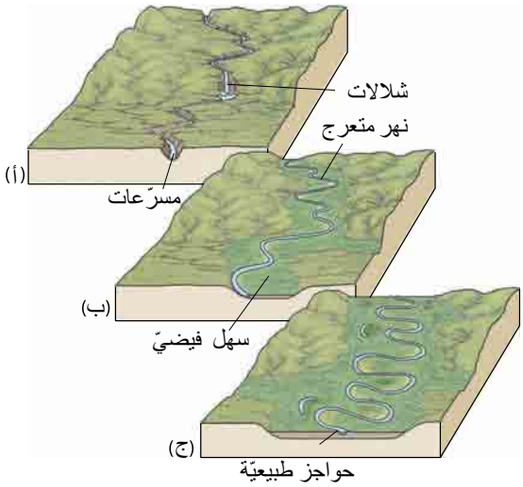
تكون سرعة الجريان أقلّ في قاع الجدول، حيث يكون الماء على تواصل مع القناة، مما يؤدي إلى الاحتكاك. وتكون سرعة الجريان أعلى ما يمكن بالقرب من سطح الماء. وفي جدول كبير ذي قناة مستقيمة، تكون أعلى سرعة جريان في وسط القناة (الشّكل 25.23 ب). أما النّهر الذي يسير في قناة متعرجة، فإنّ أقصى سرعة له تكون على الجانب الخارجي في كلّ انحناء في التّعرّج (الشّكل 25.23 أ، 25.23 جـ).

ومع جريان النّهر نحو أسفل مجراه ونقصان ماله وسرعته، يتغير تركيز طاقته من الحتّ إلى أسفل (تعميق القناة) إلى الحتّ الأفقي في حركته من جانب إلى آخر. ونتيجة لهذا العمل الجانبي، يطوّر النّهر شكلًا *أكثر تعرّجًا meandering* (الشّكل 26.23). ومَعَ تعرّج النّهر وانحنائه، تنحرف سرعة الجريان في القناة بحيث تكون أكبر سرعة في الجهة الخارجية من كلّ انحناءة (الشّكل 25.23). تكون المياه السريعة الجريان ذات فاعلية في تعرية المواد من الجانب الخارجي لكلّ انحناءة، مكونة بذلك ضفة شديدة الانحدار تسمى *ضفة مقطوعة cut bank* . وتنقل المواد التي يتم تعريتها من الضفة المقطوعة إلى أسفل النّهر، وقد تترسب في النهاية في مناطق تقل فيها سرعة النّهر. وبهذه الطريقة، تتكون حواجز *رملية نقطية point bars* في الجانب الداخلي من التّعرّج.

ومع استمرار جريان النّهر نحو أسفل مجراه، فإنّ النّهر يذهب ويجيء بعرض هذا المجرى، مرسبًا في طريقه الرّسوبيّات (الشّكل 27.23).



الشّكل 25.23
في نهر متعرج (أ، جـ)، تكون أقصى سرعة تدفق في اتجاه المنطقة الخارجية من التعرج وتحت سطح الماء. وفي قناة مستقيمة (ب)، تكون أقصى سرعة في وسط القناة بالقرب من سطح الماء. تحدث تعرية القناة في أقصى سرعة (ضفة مقطوعة) والتّرسيب في منطقة أقلّ سرعة (حاجز نقطي).



الشّكل 26.23

تغيّر مجرى نهر وتكوّن سهل فيضي. (أ) في منطقة المنبع، يتميز المجرى الذي له شكل حرف V بمال حاد، وماء سريع يحفر مجرى النّهر. تتضمن المظاهر في هذه المناطق المسرعات والشلالات.(ب) نحو أسفل مجرى النّهر، ومع نقصان المال، يركز النّهر تعريته في الجدران من جانب إلى آخر بطريقة متعرجة. وعليه، يزداد عرض مجرى النّهر. (جـ) وبالتقدم أكثر نحو أسفل مجرى النّهر، يزداد التعرج، ويزداد عرض الوادي أكثر ليكوّن سهلا فيضيًّا.

لمعلوماتك

■ لا بد أنك سمعت بمصطلح فيضان الـ 100 سنة. هل هذا يعني أنه يحدث كلّ 100 سنة؟ الجواب: ليس بالضبط. في الواقع، وكما تعلم، فإنّ فيضانًا ضخمًا قد يحدث في أيّ سنة. إنّ فيضان الـ 100 سنة هو مصطلح إحصائيّ معناه أنّ هناك فرصة واحدة من 100 فرصة تهيىء لحدوث فيضان بهذا الحجم في أيّ السنة. وقد يكون المصطلح الأفضل هو «فيضانا محتملا بنسبة 1%)

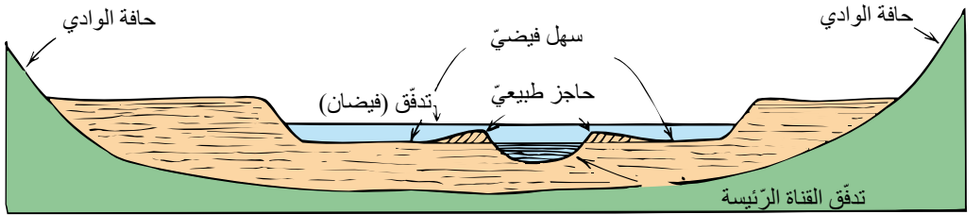
وينشأ عن هذه الحركة المتعرجة حزامًا عريضًا من أرض تكاد تكون منبسطة يسمى **السّهل الفيضيّ**. وكما يوحي بذلك الاسم، فإنّ هذا المقطع من وادي النّهر يتعرض للفيضان بالماء والرّسوبيّات عندما يفيض النّهر على ضفافه. وبسبب زيادة الصبيب وسرعة الجريان في أثناء الفيضان، تزداد قابلية النّهر على حمل الرّسوبيّات. ولهذا، عندما يفيض نهر على ضفافه، فإنّ مياهًا غنية بالرّسوبيّات تتدفق على السّهل الفيضيّ. تقلّ سرعة النّهر بسرعة مع انتشار الماء فوق سهل فيضي منبسط واسع، وترسب حبيبات متدرجة كبيرة إلى صغيرة الحجم. وكما هو متوقع، تتوضّع رسوبيّات كبيرة الحبات نسبيًّا على امتداد حواف القناة، في حين تتوضع رسوبيات ناعمة الحبيبات بعيدًا عن قناة النّهر على السّهل الفيضيّ. وتكوّن الحبيبات الكبيرة المترسبة قريبًا من قناة النّهر *رصيفًا* (*حاجزا*) *طبيعيًّا* يساعد في حصر مياه فيضانات مستقبلية (الشّكل 28.23). يحدث توسع للمجرى، كما هو موضّح في الشّكل 27.23، لأن الرّسوبيّات المتوضعة من النّهر، وخصوصًا في أثناء الفيضان، تملأ المجرى.

■ **نقطة فحص**

إنّ السّهول الفيضية مناطق زراعة جيدة. لماذا يتوجّه الناس للسكن والعمل في مناطق تميل إلى حدوث الفيضانات فيها؟

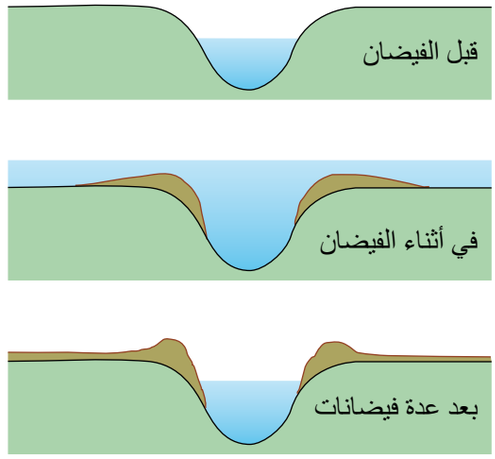
هل كانت هذه إجابتك؟

يعيش الناس ويعملون في مناطق السّهول الفيضية؛ لأنّ هذه السّهول تكون مجاورة لنهر يوفر الماء والطعام ويساعد على المواصلات. كما أنه بسبب الفيضان المتتابع، فإنّ تربة السّهل الفيضيّ تكون خصبة لذا تعد أرضًا خصبة زراعيًّا. أمّا بالنسبة لعامل الخطورة، أفلا ترى أنّ معظم الناس تربط الخطورة بأيّ شيء، ولكنهم يستبعدون دورهم في هذه الخطورة!



الشّكل 27.23

مقطع مجرى نهر. يتكون السّهل الفيضيّ عندما يتدفق نهر على ضفافه. تترسب الرمال والحصى أولًا، وتكوّن رصيفًا (حاجزًا) طبيعيًّا لحصر النّهر. ولأنّ الرمل والغرين تبقى معلقة، فإنها تتحرك خلف الرصيف وتترسب فوق السّهل الفيضيّ.



الشّكل 28.23
في أثناء الفيضان، يساعد الصبيبُ والسرعةُ النّهرَ على حمل الحبات الكبيرة وليس على حمولة كبيرة من الرّسوبيّات فقط. تترسب الحبات الكبيرة بالقرب من قناة النّهر مكونة رصيفًا طبيعيًّا يحصر النّهر بين حدين. تعمل الفيضانات على زيادة ارتفاع الرصيف، وقد تزيد ارتفاع طبقة القناة لتصبح أعلى من السّهول الفيضية حولها.

الدّلتا(Delta): نهاية خط النّهر

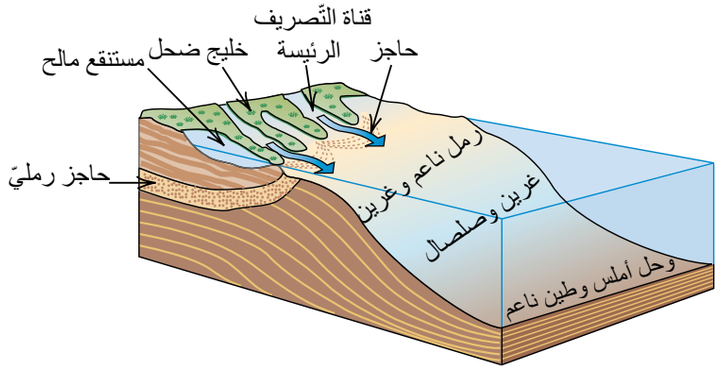
عندما يصل النّهر إلى جسم مائي ساكن مثل البحر أو الخليج أو البحيرة، فإنّ الماء المتحرك يفقد طاقته تدريجيًّا. ومع فقدان الطّاقة تقلّ سرعة النّهر، ويفقد قدرته على حمل الرّسوبيّات. وتؤدي هذه التغيرات إلى إنزال حمولته. وبهذه الطريقة تصبح منطقة النّهر والمنطقة القريبة من الشاطئ مليئة بالرّسوبيّات. تكون الرّسوبيّات المتوضّعة مروحية الشكل وتسمى **دلتا**. تتوضّع الرّسوبيّات بترتيب معين تبعًا لتناقص الوزن: حيث تترسّب الحبات الثقيلة الكبيرة أولًا قرب الشاطئ، أما الحبات الناعمة فتترسّب بعيدًا عنه. ومع استمرار وصول الرّسوبيّات من القارة، تتقدم الدّلتا وتبني نفسها نحو الخارج في صورة أرض إضافية داخل الماء.

تبدأ الدّلتا بالتّشكّل تحت سطح الماء، ولكن إضافة الرّسوبيّات تؤدّي في النهاية إلى ظهور الدّلتا على هيئة يابسة جديدة. عندما يصطدم النّهر بالرّسوبيّات، فإنه يحتاج إلى طاقة أكبر للدفع خلال الرّسوبيّات المتراكمة مقارنة بالدوران حولها. لذا تتكوّن قنوات صغيرة من القناة الرئيسة كفروع الشجرة. تسمح هذه الفروع للمياه بالتدفق إلى البحر. ومع استمرار تكوّن الدّلتا نحو الخارج، فإنّ الفروع أيضًا تعاق في الحركة مع استمرار وصول الرّسوبيّات. لذا فإنّ أول مجموعة من الفروع تأخذ شكل أصابع اليد (الشّكل 29.23). وعندما تغلق الأصابع، فإنّ التفرع يتكرر مع استمرار **تدفق** النّهر إلى البحر والتوسع نحو الخارج (الشّكل 30.23). ولهذا فإن بيئة الدّلتا هي منطقة تتشكّل فيها أرض جديدة باستمرار.

لمعلوماتك

■ بعض الأنهار الضخمة لها دلتا كبيرة عند فمها. فقبل ملايين السنين، كان فم نهر المسيسبي حيث مدينة القاهرة، إلينوي اليوم. ومنذ ذلك اليوم اتسعت الدّلتا 1600 كم جنوبًا إلى مدينة نيوأورليانز. وقبل أقل من 5000 سنة كان موقع نيوأورليانز تحت الماء في خليج المكسيك.

ما نهاية المياه المتدفقة كلّها؟ وما هو مستقر معظم الرّسوبيّات؟ تجري المياه في النهاية إلى المحيط، وتستقر الرّسوبيّات في قاع المحيط.



الشّكل 29.23
الدّلتا منطقة تتكون على اليابسة. ومع جريان النّهر إلى البحر فإنه يحمل الرّسوبيّات. تترسّب هذه الرّسوبيّات بترتيب معين بحسب تناقص الوزن، حيث تترسّب الحبات الثقيلة قرب الشاطئ، أما الحبات الناعمة فتترسب أبعد في اتجاه البحر. وتنشأ الدّلتا من توضّع هذه الرّسوبيّات طبقة فوق أخرى.

الشّكل 30.23
صورة أقمار صناعية لدلتا نهر المسيسبي.
لاحظ كيف أنّ الجداول الصغيرة تكون متفرعة عن النّهر الرّئيس.

6.23 الجليد والجليديّات

إنّ أكبر الأنهار على الأرض هي أنهار صلبة متجمدة، وحركتها بطيئة لا تزيد على بضعة سنتمترات في اليوم. تسمى هذه الأنهار الجيليدية بالجليديّات. لقد غطت هذه الجليديّات نسبة عالية من الأرض عدة مرات في الماضي البعيد. ولا يزال الجليد يعمل في مناطق كثيرة من العالم، منها جليديات ألبية صغيرة في الجبال، وحقول جليدية ألبية كبيرة، ومسطحات جليد قارية ضخمة في القطبين الشّماليّ والجنوبيّ.

تشكّل الجليد وحركته

يتكون الجليد في الجليديّات من ثلج متبلور. بعد هطل الثّلج، فإنّ تراكمه يغير شكل رقائقه المنفردة تدريجيًّا إلى كتلة كروية من الجليد. ومع استمرار هطله فإنّ الضّغط المتولّد على طبقة الجليد السّفلى يرصّها ويعيد تبلورها إلى جليد.

لا يصبح هذا الجليد جليدية حقيقية حتى يتحرك تحت تأثير وزنه. وعندما تصل كتلة الجليد إلى سمك 50 م تقريبًا، فإنّ الضغط يؤدي بطبقة الجليد السفلى إلى أن تتشوه تشوهًا لدنًا وتنساب نحو أسفل المنحدر. ويشبه هذا التشوه اللدن ما يحدث لورق اللعب. عند دفع ورق اللعب من جانب، كما في الشّكل 31.23، تنزلق الأوراق بعضها بالنسبة إلى بعض، فتنزلق الأوراق جميعها. والتشوه اللدن في الجليديّات يكون أكبر في قاعدة الجليد حيث يكون الضغط مرتفعًا.

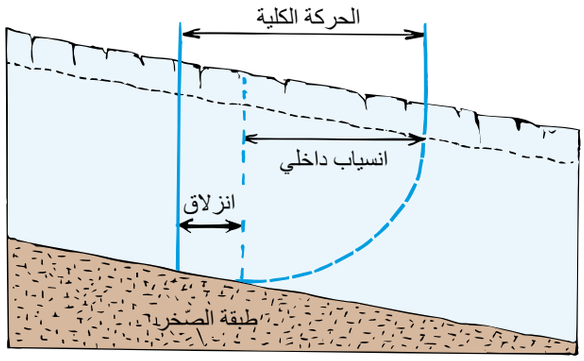
إنّ الانسياب اللدن الناجم عن انزلاق بلورات الجليد، لا يعدّ المكوّنَ الوحيد لحركة الجليد. تقل درجة انصهار الجليد مع زيادة الضغط. وعند تكوّن الجليد المصهور — *ماء الانصهار* - عند قاع الجليدية، تحدث *عملية انزلاق القاعدة**. وهذه هي الآلية الثانية لحركة الجليد التي تؤدي إلى انزلاق كامل الجليدية نحو أسفل المنحدر، حيث يعمل الماء المنصهر كمادة زَلِقة. تزداد سرعة الجليدية من القاعدة إلى السّطح حيث أعلى سرعة لها (الشّكل 32.23). تحمل الطبقات العليا كالحمل على الكتفين عند حدوث التشوه اللدن، في حين يحدث الانزلاق القاعدي في الطبقة السفلى.

لمعلوماتك

■ تتحرك الجليديّات عند تسخين الرّسوبيّات أسفلها من خلال حرارة الأرض الداخلية. ويبقى الدفء؛ لأنّ عملية العزل عن الغلاف الجوّيّ البارد تحدث بسبب وجود غطاء سميك من الجليد. يحدث الانصهار عند تخلل الماء المنصهر إلى الرّسوبيّات، مما يجعلها رطبة، وتتحرك بسهولة تحت تأثير وزن الجليد فوقها.

الشّكل 31.23
عند دفع مجموعة من ورق اللعب من جانب، تنزلق الأوراق فوق بعضها، وعليه تنزاح المجموعة كلها.

* قد ينتج الماء المنصهر من ضغط الجليد العلوي (تقل درجة الانصهار مع زيادة الضغط)، أو من حرارة الأرض الباطنة، أو من توليد الحرارة باحتكاك الجليد. ومهما يكن سبب الحرارة، فإنّ الماء المنصهر يسهم في حركة الجليدية.



الشّكل 32.23
مقطع عرضي في جليدية. لحركة الجليدية مركّبتان هما: التدفق الداخلي والانزلاق الناجم عن التشحيم من الماء المنصهر. تكون الحركة بطيئة في القاع بسبب الاحتكاك، ولكنها سريعة على السّطح. الجزء العلوي من الجليدية محمول كأنه على الظهر من قبل التدفق اللدن في الجليد.

يُحمل أعلى جزء من الجليدية من قِبَل انزلاق القاعدة والتشوه اللدن الداخلي. ويتصرف ككتلة قاسية هشة قد تتكسر. وقد تتولد شقوق كبيرة تسمى *هوة* crevasse في سطح الجليد (الشّكل 33.23). ومن الممكن أن تمتد الهوة إلى أعماق كبيرة. وعليه، فهي ذات خطورة على من يعبر هذه الجليدية.

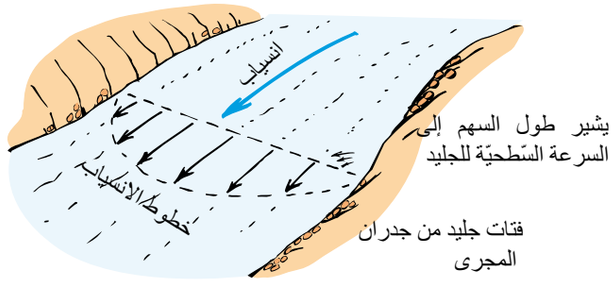
تختلف سرعة الجليدية من واحدة إلى أخرى. وقد تتراوح من عدة سنتمترات إلى مئات السنتمترات في اليوم. ويتم قياس هذه السرعة البطيئة عن طريق وضع علامات على شكل خط على الجليد. وملاحظة تغيره في الموقع خلال أيام إلى سنوات. يتحرك الجليد بمعدل أسرع في الوسط. ولكنه يسير بمعدل أبطأ على الأطراف بسبب الاحتكاك (الشّكل 34.23). تتعرض بعض الجليديّات لفترة حركة سريعة بسبب انصهار القاعدة والحركة المفاجئة للكتلة. وقد يكون معدل التدفق في هذه الأوقات 100 ضعف المعدل الطبيعي. وبالنظر من أعلى، فإنّ الحزم المتدفقة من الفئات والجليد ذات طابع متواز. ولكن خلال الحركات السريعة يصبح التدفق مطويًّا (الشّكل 35.23).

الشّكل 33.23
قد تمتد الهوة إلى أعماق كبيرة وقد تكون خطيرة للعبور.

توازن كتل الجليد

تتغيَّر كتلة الجليد من فصل إلى آخر. وخلال فترة طويلة من الزمن. يزداد حجم الجليديّات في الشّتاء مع تراكم الثّلج على سطحه. وتسمّى كميةُ الثّلج المضاف. وعمليةُ إضافة ثلج إلى جليديات **تراكمًا** (***Accumulation***).

ومع تراكم الجليد. وبدء تحركه أسفل المنحدر. فإنه قد يتحرك إلى خطوط عرض أعلى حرارة. وعندما يبدأ الجليد في الانصهار. فإنه يفقد بعض كتلته. كما قد يفقد بعض كتلته في أثناء حركته أسفل المنحدر إلى الشاطئ؛ حيث يتكسر ليكون قطعًا تطفو على سطح البحر. يعدّ الانصهار والتجزئة الآليتين الرئيستين اللتين يفقد بهما الجليد جزءًا من كتلته. ومع أنها غير ملاحظة. إلا أنّ الجليد قد يفقد جزءًا من كتلته عندما يتسامى إلى بخار. وتسمّى الكميةُ الكلية التي يفقدها الجليد وعمليةُ الفقدان تآكلا (*Ablation*)(الشّكل 23.36).



الشّكل 34.23
مشهد علوي لجليدية. تكون السرعة الأكبر في وسط الجليدية، وتقل تدريجيًّا على طول الحواف بسبب الاحتكاك.

(أ) (ب)

الشّكل 35.23
تدفّقا الجليد: (أ) طبيعي. (ب) سريع.

لمعلوماتك

■ يكون التآكل أكبر من التّراكم في مناطق متزايدة بسبب الاحترار العالمي. ومع تقطّع الجليديّات إلى البحر، ومع انصهار مسطحات الجليد القاري، فإنّ مستوى البحر سيرتفع.

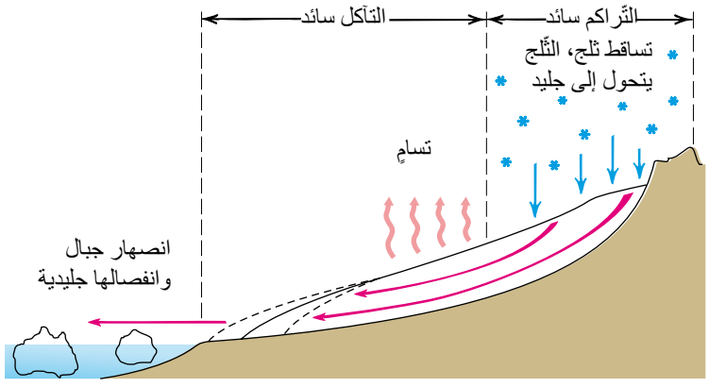
عندما يكون التّراكم مساويًا للتآكل، فإنّ حجم الجليدية يبقى ثابتًا. فمثلًا في جبل جليدي يحدث التّراكم مع هطل الثّلج في الشّتاء في المناطق الخلفية العليا من الجليد. ويحدث التآكل في الأجزاء السفلى حيث يحدث الانصهار الأعظم في الصّيف والربيع. وعندما يتساوى معدلا التّراكم والتآكل، فإنّ انصهار الأجزاء السفلى؛ يُعوّض بانسياب الأجزاء العليا نحو أسفل المنحدر. ونتيجة لذلك، فإنّ مقدمة الجليدية لا يتغيَّر مكانها. وعندما يكون التّراكم أكبر من التآكل، فسيزداد الجليد. ولكن عندما يكون التآكل أكبر من التّراكم، فإنّ الجليد يقلّ. وفي هذه الحالات جميعها، يتدفق الجليد نحو أسفل المنحدر.

■ **نقطة فحص**

ما الظروف التي تجعل مقدمة الجليدية في الموقع نفسه من سنة إلى أخرى؟

هل كانت هذه إجابتك؟

تبقى مقدمة الجليدية في المكان نفسه عندما يتساوى معدلا التّراكم (النمو) والتآكل (التقلص). ففي الربيع، وبسبب انصهار الجليد في المقدمة، فإنّ الجليدية تتراجع نحو أعلى المنحدر. وفي الوقت نفسه، تكون الكتل المضافة من تراكم الشّتاء السابق السبب في تقدم الجليدية نحو الأمام. وعندما يتساوى معدل التقدم إلى الأمام مع معدل الانصهار، فإنّ موقع الحافة الأمامية لا يتغير.



الشّكل 36.23
يحدث التّراكم على الجليدية في ارتفاعات عالية بسبب سقوط الثّلج وتحوله إلى جليد. أما التآكل، فيحدث في ارتفاعات منخفضة مع انصهار الجليد وتجُزئه إلى جبال جليدية تطفو على الماء أو بسبب التسامي.

7.23 عمل الجليديّات

تمامًا كما تعمل المياه الجارية في الأنهار، فإنّ الجليديّات يمكنها تعرية الرّسوبيّات وترسيبها. تكوّن كلتا العمليتين أشكالًا أرضية مميزة تعدّ دلائل على جليديات قديمة مندثرة.

تعرية الجليد وأشكال الحتّ الجليدية

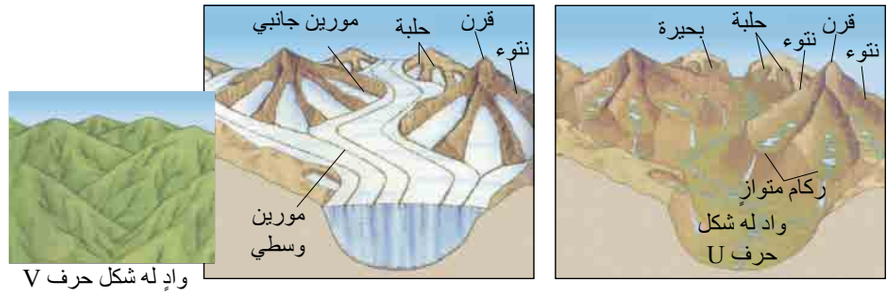
تعدّ الجليديّات عامل تعرية فاعل. قامت عمليات الجليديّات بتكوين الأراضي الجميلة في التبت، ونيبال، وبوتان في آسيا، وجبال الألب في سويسرا، والفيوردات في النرويج، ووادي اليوسميت والبحيرات العظيمة في أمريكا الشمالية. تشبه الجليديّات المحراث بعدة صور؛ حيث تكشط وتقتلع الرّسوبيّات والصخور. كما أنها كالمزلاج؛ لأنها تحمل حمولتها الثقيلة لمسافات بعيدة. ومع حركة الجليديّات على سطح الأرض، فإنها تفتت كتلًا من الصخور وتحملها، وتضمها إلى الجليد. تكشط القطعُ الصخرية الكبيرة المحمولة في قاع الجليدية الطبقاتِ الصخريةَ السفلى، وتترك خدوشًا طويلة متوازية (مثل أثر الزّلّاجة) تشير إلى اتجاه تدفق الجليد (الشّكل 37.23). تسمى هذه الخدوش *حزوزًا*.

ينتج عن نوعي الجليديّات؛ *الألبيّة والقارّيّة* تأثيرات تعرية مختلفة، وتكوين أشكال أرضية متنوعة. تتكون الجليديّات الألبية في المناطق الجبلية، وعادة ما تكون محصورة في مجارٍ محددة، في حين تغطي جليديات القارات مساحات أوسع. تحدث الجليديّات الألبية في معظم السلاسل الجبلية العالية في العالم مثل جبال الروكي، والأنديز، والهملايا. يوضح الشّكل 38.23 مظاهر التعرية في الجليديّات الألبية.

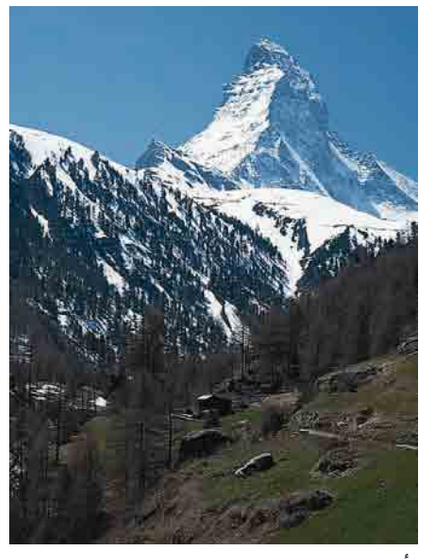
الشّكل 37.23
علامات تحزيز تدلّ على وجود جليديات قديمة.

لمعلوماتك

■ قد تتذكر أنّ ألفرد فيجنر قد استعمل الحزوز الجليدية لإعادة تركيب الكتل القارية القديمة. أثبتت الأدلة من حزوز الجليد أنّ الجليديّات تحركت في إفريقيا نحو المحيط الأطلسي، ومن المحيط الأطلسي إلى أمريكا الجنوبية. وقد اقترح فيجنر عدم إمكانية وجود هذه الجليديّات، إلا إذا كان المحيط الأطلسي غير موجود، والقارات متصلة.

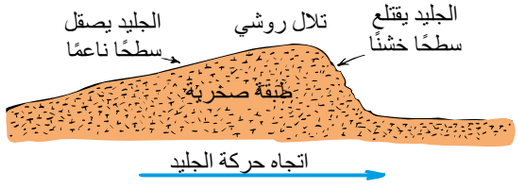


(ب)



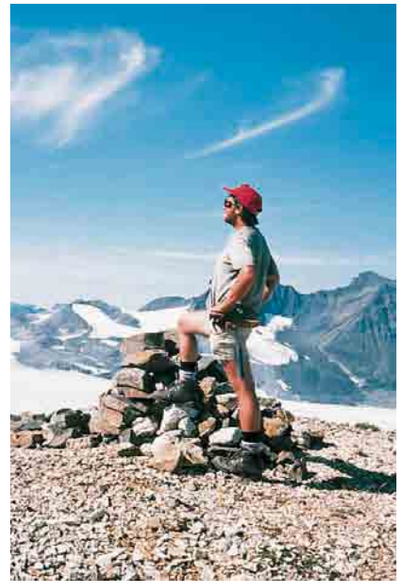
(أ)

الشّكل 38.23
المظاهر العديدة للجليديات الألبية. (أ) القرن: سمي لمظهره الذي يشبه القرن. (ب) الوديان المعلقة مظاهر توجد في مناطق تشكلت من تعرية الجليديّات الألبية. شلالات برايدافيل في حديقة يوسميت تتدفق من وادٍ معلق إلى الوادي الأكبر الذي كانت تحتله الجليدية الرئيسة.



الشّكل 39.23
تلال صغيرة غير متناظرة تبين اتجاه حركة *الجليديّات القارية*. يكون الانحدار ناعمًا وبسيطًا في جانب التل المواجه لحركة الجليديّات. أمّا في الجانب البعيد من الجليديّات المتقدمة، فيكون الانحدار خشنًا وحادًّا مع مظاهر اقتلاع.

تنتشر الجليديّات القارية فوق سطح اليابسة، وتعمل على تنعيم الطبوغرافية تحتها وتدويرها. ومع أنّ الحزوز تنتج عن الجليديّات الألبية والقارية، إلا أنّ لها دورًا كبيرًا في دراسة جليديات القارات القديمة. ولأنّ الجليديّات القارية تعمل على صقل مساحات واسعة من الأرض، فإنها تترك خلفها القليل من الوديان الواضحة (مما يجعل من الصعب معرفة اتجاه تدفق الجليد). ومن رسم خرائط الحزوز على الأرض التي كانت مغطاة بالجليديّات، يستطيع الجيولوجي تحديد اتجاه تدفق هذه الجليديّات. يعرف اتجاه تدفق الجليد أيضًا من خلال تلال صغيرة غير متناظرة الجوانب (الشّكل 39.23) تعرف باسم *تلال روشي*. في الجانب المقابل لتدفق الجليد، يكون ميل التل قليلًا ومحززًا من بري الجليد على الطبقة الصخرية. أما في الجانب السفلي لحركة الجليد فيكون الميل حادًّا وخشنًا؛ لأنّ الجليد المتحرك يقتلع الصخور من شقوق في الطبقة.


الجيولوجي بوب إبرامز يراقب عظمة مسطح جونو الجليدي في ألاسكا.

التّرسيب الجليدي وأشكاله

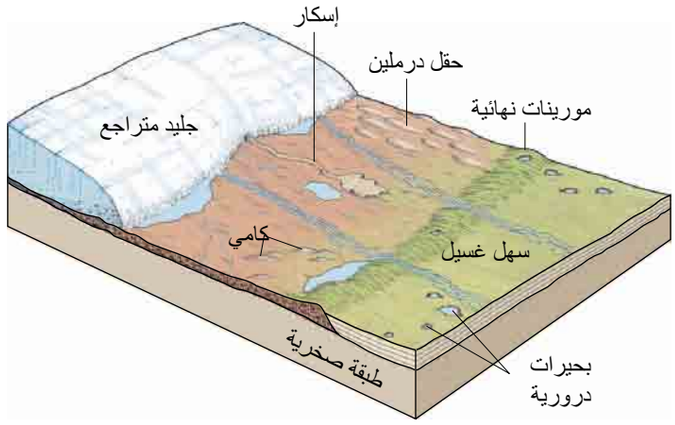
مع تقدم جليديات عبر اليابسة، فإنها تنقل كميات كبيرة في الفتات. ومع تراجع الجليديّات، فإنها تترك الفتات خلفها بسبب انصهار الجليد. ولأنّ الجليدية تبري وتلتقط كلّ شيء في طريقها، فإنّ رسوبيات الجليديّات تتكون من قطع صخرية ذات حواف حادة ورديئة الفرز بعدة أشكال وأحجام. تسمى الرّسوبيّات الجليدية باسم عام هو **"المنجرفات" *(Drift)***. وهو مصطلح يعود إلى القرن التاسع عشر عندما اعتُقِدَ أنّ الفتات جميعه قد الجرف من الفيضان التوراتي.

تحتوي بعض البيئات الجليدية على عناصر من عدة بيئات رسوبية أخرى، ويعود ذلك إلى العديد من العمليات العاملة المدفوعة بالماء والرّيح والجليد. مثال ذلك، يكوّن ماء الجليدية المنصهر أنهارًا تنتهي على شكل دلتا في البحيرات أو الخلجان أو البحار. ولرسوبيات الجليد مظاهر فريدة: فعندما ينصهر الجليد، فإنه يرسب مجموعة غير مفروزة من الحمولة المنوعة المكونة من جلاميد، وحصى، ورمل، وطين. يعدّ وجودُ مدى كبير من أحجام الحبات علامةً مميزة لرسوبيات الجليد عن المواد الأحسن فرزًا المترسّبة من الأنهار والرّيح.

تترسّب المجروفات بطريقتين: عندما تتحرر رسوبيات الجليدية إلى الماء المنصهر، فإنها تنقل وترسب كأيّ رسوبيات مائية فتكون جيدة الفرز. أمّا المواد المترسبة مباشرة من صهر الجليد، فتكون خليطًا من الفتات الطيني والجلاميد. وقد وجد أنّ العديدَ من الجدران الحجرية القديمة في بعض مناطق نيوإنجلاند مكونةٌ من حجارة مأخوذة من رسوبيات جليدية. لقد أزال السكان الذين حاولوا زراعة الأرض الجلاميد الكبيرة كلها قبل الحراثة، وجمعوها على حوافّ حقولهم. وعادة ما توجد الجلاميد الكبيرة التي تختلف جذريًّا عن الصخور المحلية في رسوبيات الجليد. توفر الجلاميد الكبيرة دليلًا على إمكانية الجليد في نقل الحمولات الثقيلة لمسافات طويلة. وإن أمكن العثور على الطبقة المصدرة للجلمود، فيمكن تقدير المسافة والاتجاه الذي تحركه الجليد.

إنّ أكثر الأشكال الأرضية الناتجة عن الجليديّات شيوعًا هي *المورينات* (*Moraine*)، وهي مظاهر أرضية على شكل ظهور (جمع ظهر) تبين حدود التدفق الجليدي. ومن أنواع المورينات المختلفة كلها، فإنّ أكثرَها أهميةً *المورينات* النهائية؛ لأنها تحدد أبعد نقطة وصل إليها الجليد (الشّكل 40.23).

تلاحظ المظاهر الجيولوجية بشكل أفضل من الطائرة. في المرة القادمة عندما تسافر بالطائرة، اطلب مقعدًا بجانب النافذة وتمتع بالجيولوجيا أسفل منك.



الشّكل 40.23
أشكال التّرسيب الجليدي. أهمها المورينات النهائية التي تحدد أبعد نقطة وصلها تقدم الجليد.

من أشكال الأرض الأخرى المميزة للرسوبيات الجليدية *الكثيب الجليدي*. وهو ,l, تل طويل يشبه ظهر الحوت. تتشكّل بواسطة الجيليديات القارية، وتصطفّ في اتجاه التدفق الجليدي، ولها نهاية شديدة الانحدار على الجانب الذي يأتي منه الجليد. أما جانبها الآخر، فله ميل متدرج لطيف (الشّكل 41.23). وقد يكون أشهر درملين في الولايات المتحدة هو تل بنكر في مساشوسيت.

إنّ العديد من بحيرات العالم الصغيرة والكبيرة هي نتاج فعل الجليديّات. تعمل هذه الجليديّات على تعميق الوديان، وترسيب رسوبيات تكون كحدود تحجز تصريف النّهر في بعض الوديان مكونة بحيرات. وتعدّ بحيراتُ فنجر في نيويورك، و 10000 بحيرة في مينوسوتا، والبحيرات العظيمة في أمريكا شاهدًا على نتاج فعل الجليديات.

الشّكل 41.23
خريطة طبوغرافية تبين الشّكل البيضويّ المميز للكثيب الجليدي في نيويورك. الكثيب ذو ميل حادّ من الجانب الذي يأتي منه الجليد، وذو ميل تدريجي لطيف من الجانب الآخر. بالنظر إلى الخريطة، هل يمكن أن تحدد اتجاه تدفق الجليد القاري؟

لمعلوماتك

■ من المظاهر الفريدة لتكوّن الكثبان الرملية التطبق المتقاطع الموجود على الجانب الخلفي من الكثيب (بالنسبة إلى الرّيح).. يشير اتجاه التطبق المتقاطع إلى اتجاه الرّيح (أو تيار الماء) الذي رسّب هذه الرّسوبيّات. ومن أفضل الأماكن لرؤية تطبق متقاطع قديمة حديقة زيون في يوتا. التطبق المتقاطع مظهر شائع في دلتا الأنهار ورسوبيات الأنهار.

لمعلوماتك

■ مع أنّ بيئة الصحراء تفتقر إلى الرطوبة، فما يزال الماء هو العامل الرئيس لتعرية الرّسوبيّات ونقلها. كما يندر وجود الماء في الصحراء، يندر المطر الغزير، وعند حدوثه لا يجد فرصة للتخلل في الأرض، مما يؤدي إلى فيضان لحظيّ قويّ. تحمل هذه الفيضانات ثم ترسب كميات كبيرة من الفتات والرّسوبيّات نحو أسفل منحدرات الجبال، أو على قاع الوديان العريضة والأحواض.

■ **نقطة فحص**

ما أشكال الأرض التي يمكن استخدامها لمعرفة اتجاه حركة الجليد؟

هل كانت هذه إجابتك؟

يمكن معرفة اتجاه حركة الجليد من الحزوز (خدوش طولية متوازية في اتجاه حركة الجليد)، *وتلال روشي* (تلال صغيرة غير متكافئة)، *والكثيب الجليدي* (تلال طولية الشّكل، شكلها مثل ظهر الحوت).

■ 8.23 عمل الرّيح

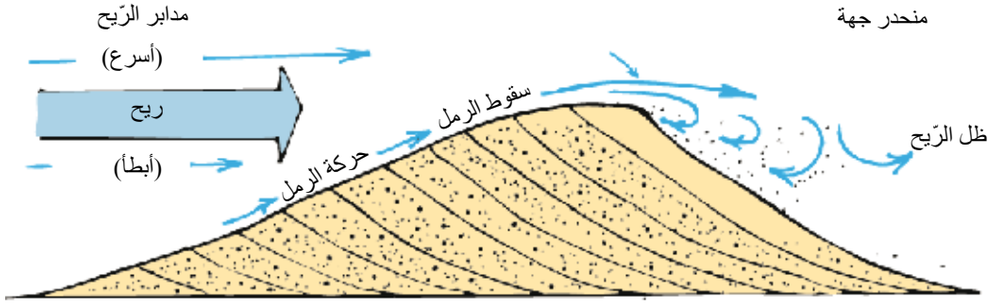
الماء هو العامل السّائد بين عوامل التغير الذي يغير شكل الأرض، إضافة إلى الهواء الذي يقوم بدور كذلك. إذا كنت يومًا في ريح عاصفة، أو على الشاطئ في يوم عاصف، فقد تكون شعرت بتأثير العسف الرملي للرياح التي تحمل الحبيبات في الهواء إلى مسافات بعيدة. ولقد عُثر على غبار أحمر من الصحراء الكبرى في شمال إفريقيا على جليديات الألب في سويسرا، وعلى جزر في المحيط الكاريبي. وتُحمل حبات ناعمة من الكوارتز من أواسط وسط آسيا إلى جزر هاواي.

تتحرك الرّياح في الصحراء فوق سطح رمليّ جاف. فتحمل الحبات الصغيرة سهلة النقل، وتترك الحبات الكبيرة الصعبة التحريك خلفها. تنتقل الحبات الصغيرة على امتداد أرض الصحراء، فتضرب حبات أكثر إلى الهواء لتكوّن *علامات النيم* (*Ripple Marks*) والتي هي كثبان رملية صغيرة (الشّكل 42.23). يمكن لعلامات النيم أن تتكون بحركة حبات الرمل في تيارات الماء كما ترى في الأنهار الضحلة، أو تحت الأمواج عند الشواطئ.

تبدأ **الكثبان الرملية** (**Sand Dunes**) في التشكّل عند وجود عائق أمام تيار الهواء مثل صخرة أو تجمع نباتات (الشّكل 42.23). ومع حركة الرّيح فوق الجسم وحوله، تقل سرعة الرّيح، فتهبط حبات الرمل من الهواء في منطقة ظل الرّيح (الشّكل 43.23). يشكّل الرمل الهابط كومة، ويحجز تيار الهواء أكثر. ومع زيادة الرمل وزيادة الرّيح، تنمو الكومة لتصبح كثيبًا. ومع استمرار نمو هذا الكثيب فإنه يبدأ بالتحرك مع الرّيح.

الشّكل 42.23

علامات النيم المكونة من هبوب الرّيح هي مرتفعات ضيقة من الرمال مفصولة بقيعان أعرض. وتعدّ كثبانا رملية صغيرة طولية. يمكن رؤية الكثبان الرملية الكبيرة في خلفية الصورة.



الشّكل 43.23
تكوّن الكثبان الرملية عند اعتراض جريان الرّيح تقلّ سرعتها، فتنزل حبات الرمل في منطقة ظلّها. ومع استمرار هذه الرّيح، تترسب حبات الرمل أكثر ويتكون الكثيب. ومع نمو الكثيب، تتحرك حبات الرمل في جهة الرّيح نحو أعلى المنحدر حتى القمة، ثم تسقط في جهة مدابر الرّيح الذي يؤدي إلى حركة الكثيب كله مع الرّيح.

يتحرك الكثيب الرملي؛ لأنّ الحبات في منطقة جهة الرّيح على المنحدر تتحرك نحو الأعلى وفوق قمة الكثيب، وتسقط على جهة مدابر الرّيح. وبهذه الطريقة، يحرك الرّيح الرمل من مؤخرة الكثيب ويرسبه في مقدمته. ومع الزمن تؤدي هذه العملية إلى تحريك الكثيب كله.

ملخّص المصطلحات

دورة المياه Hydrologic cycle: الدورة الطّبيعيّة لحالات الماء جميعها: من المحيط، إلى الغلاف الجوّيّ ثمَّ إلى اليابسة، وأخيرًا إلى المحيط.
المياه الجوفيّة Groundwater: المياه تحت الأرض من نطاق الإشباع.
المسامية Porosity: حجم الفراغات في الصخر أو الرّسوبيّات مقارنة حجم المادة الصلبة كلها مع الفراغات.
الموصليّة الهيدروليكية Hydraulic conductivity: قياس قابلية صخر أو راسب مسامّي على تمرير سائل.
مستوى الماء الجوفيّ Water table: الحدّ العلوي لنطاق التشبع الذي تكون المسامات تحته مملوءة بالماء كليًّا.
النظام الارتوازي Artesian system: نظام يكون فيه الماءُ الجوفيّ المحصور تحت ضغطٍ قادرًا على الارتفاع فوق منسوب الماء الجوفيّ العلوي.
تدفق مضطرب Turbulent flow: الماء المتدفق عشوائيًّا وبسرعة فيحرك كلّ شيء.
التدفق الرقائقي Laminar flow: تدفق الماء بسهولة وببطء في خطوط مستقيمة دون خلط للرسوبيات.
الممال Gradient: النقصان العمودي في الارتفاع لقناة النّهر مقسومًا على المسافة الأفقية للنقصان. انحدار الميل.
الصبيب Discharge: كمية الماء التي تعبر موقعًا محددًا في قناة النّهر خلال فترة زمنية محددة.
ضفة مقطوعة Cut bank: ضفة حادة في الانثناء الخارجي لقناة النّهر؛ منطقة تعرية.
حاجز نقطي Point bar: ضفّة رملية متدرجة في الانثناء الداخلي لقناة النّهر؛ منطقة ترسيب.
سهل فيضي Floodplain: سهل عريض من أرض تقريبًا منبسطة على جانبي قناة النّهر تغمر في أثناء الفيضان. السهل مكون من رسوبيات نقلت في أثناء الفيضان.
دلتا Delta: تراكم رسوبيات، وغالبًا ما تشكّل سهلًا مثلث الشّكل، أو كالمروحة تترسّب عند وصول النّهر إلى جسم مائي ثابت.
جليديات Glacier: كتلة كبيرة من الجليد تشكّلت من تراص الثّلج وإعادة تبلوره. وتتحرك نحو أسفل المنحدر تحت تأثير وزنها.
تراكم Accumulation: كمية الثّلج المضاعفة وعملية إضافة الثّلج إلى جليديات.
تآكل Ablation: كمية الجليد المفقودة وعملية فقدان الجليد من جليديات.
مجروفات Drift: مصطلح عام لرسوبيات الجليديّات.
كثيب رملي Sand dune: شكل أرضي تكوّن عند اعتراض جسم جريان التيار فتقل سرعة الهواء ويترسّب الرمل المنقول.

1.23 دورة المياه

1. أين يحدث معظم هطل الأمطار على الأرض؟
2. عند هطل الماء على اليابسة، أين يذهب الماء؟ أين ينتهي معظم الماء على اليابسة؟

2.23 المياه الجوفيّة

3. ميز بين *المسامية و التوصيل الهيدروليكي*.
4. إذا حفرت حفرة في نطاق التّهوية، فهل تمتلئ بالماء؟ اذكر السبب إذا كان الجواب بالنفي أو الإيجاب.

5. قارن بين نطاق كلّ من التّهوية والإشباع.
6. أي أنواع التربة تسمح لكميات كبيرة من الأمطار بالرشح؟
7. ما النظام الارتوازي؟ وكيف يتشكّل؟

3.23 عمل المياه الجوفيّة

8. صف نتيجة واحدة للضّخّ الجائر للمياه الجوفيّة.
9. كيف يصبح ماء المطر حمضيًّا؟ كيف يؤثر في الحجر الجيري؟
10. كيف تتشكّل الصواعد والهوابط؟
11. سمِّ ثلاثة مظاهر تعرية تحدث بسبب المياه الجوفيّة في الحجر الجيري.
12. ما الفرق بين الكهف والمغارة؟

4.23 المياه السّطحيّة وأنظمة التّصريف

13. ما معنى مال النّهر؟ وكيف يؤثر في سرعة النّهر؟
14. ماذا يحدث لسرعة النّهر عندما يزداد الصبيب؟ وماذا يحدث للصبيب عندما تزداد سرعة النّهر؟
15. كيف يؤثر شكل القناة في تدفقها؟

5.23 عمل المياه السّطحيّة

16. أيّ التدفقين يعدّ الناقل الأكبر للرسوبيات: الرقائقي أم المضطرب؟ لماذا؟
17. اذكر ثلاث طرائق تعرِّي فيها حركة المياه قناة النّهر. أيها تؤدي إلى تكون الحفر العميقة؟
18. أيّ العوامل مسؤولة عن تكون مجرى النّهر؟
19. تحت أيّ ظرف يتكون النّهر المتعرج على امتداد سهل فيضيّ؟
20. أيّ أنواع الأنهار ومجاريها توجد في أقاليم الجبال العالية؟
21. تحمل الأنهار – غير الماء- كميات كبيرة من الرّسوبيّات من مكان إلى آخر. ما المدى الحجمي للحبيبات التي يمكن أن يحملها النّهر السريع؟
22. ما الدّلتا؟

6.23 الجليد والجليديّات

23. كيف تتكون الجليديّات؟
24. بأي طريقتين تتدفق الجليديّات؟
25. تحت أيّ ظروف تتقدم مقدمة الجليد؟ ماذا عن التراجع؟

7.23 عمل الجليديّات

26. ما الشّكل الأرضي الأكثر شيوعًا الذي ينتج عن الجليديّات؟
27. ما مظاهر التعرية التي توجد في مناطق الجليديّات الألبية؟ انظر الشّكل 38.23
28. ما المظاهر الأرضية الناتجة عن ترسيب الجليديّات؟

8.23 عمل الرّياح

29. كيف تهاجر الكثبان الرملية؟
30. كيف تتشكّل علامات النيم؟

تمارين

مرة أخرى، لا تجزع من العدد الكبير من المسائل.
إذا كان المقرر يشتمل على العديد من الفصول، فإن المدرس سيختار بعض التمارين فقط.

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

1. ● ما النسبة المئوية للماء العذب في الأرض؟ وأين يوجد معظمه؟
2. ■ أين ينتهي معظم ماء المطر الساقط على اليابسة قبل أن يصبح مطرًا مرة أخرى؟
3. ● من خزّان محصور، يمكن للماء أن يرتفع في بئر فوق قمة الخزّان. ماذا يسمى هذا النظام؟
4. ■ لأيّ ارتفاع يصل الماء في بئر في خزّان غير محصور؟
5. ■ كيف تتأثر دورة المياه المحلية من سحب مياه الشرب من نهر، وإعادة ماء المجاري إلى النّهر نفسه؟
6. ● هل يسمى الماء في نطاق التّهوية ماء جوفيًّا؟ لماذا؟
7. ♦ إذا كان مستوى الماء الجوفيّ في منطقة مجاورة لنهر أقل منها في النّهر، هل يتدفق الماء في النّهر إلى الماء الجوفيّ أم العكس؟ اشرح.
8. ♦ مع زيادة الجريان السّطحي إلى النّهر، أيّ متغيرات تدفق النّهر ستزداد (كما شرح في النص)؟
9. ● ما معنى هندسة النّهر؟
10. ● ماذا يحدث لسرعة نهر زاد صبيبه إلى الضعف، في حين بقي حجم القناة وشكلها ثابتين؟
11. ● ماذا يحدث لسرعة نهر تضاعف كلّ من صبيبه ومقطعه العرضي؟
12. ● ما المتغيرات الثلاثة المؤثرة في سرعة النّهر؟
13. ● ما دور الاحتكاك في الحركة الخارجية للجليد؟ وكيف يؤثر في الحركة الداخلية؟
14. ♦ يتناقص مال النّهر تدريجيًّا مع التقدم، ويزداد عرض قناته. ما العوامل التي تزيد الصبيب؟ وما العوامل التي تقلله؟
15. ● في الدّلتا، أين ترسب الحبات الخشنة متبوعة بالناعمة؟ دافع عن إجابتك.
16. ♦ ما سبب تكون التفرعات عن القناة الرئيسة في منطقة الدّلتا؟

17. ● ما الحفرة الغائرة؟ ما العوامل المساهمة في تكونها؟
18. ■ أيّ العوامل الثلاثة الآتية ينقل الجلاميد الكبيرة: الرّياح، الجليد، المياه؟ لماذا؟
19. ■ أيّ العوامل الثلاثة الذي ينقل الصخور الصغيرة فقط؟ لماذا؟
20. ♦ تتكوّن صخور الكربونات بشكل رئيس في البيئة البحرية. لماذا نجد كميات كبيرة من صخور الكربونات على اليابسة؟
21. ● هل توجد أنهار تحت الأرض؟ برّر إجابتك.
22. ♦ هل تعتقد أنّ تدفقًا رقائقيًّا لنهر يمكن أن يصبح مضطربًا دون زيادة كمية الماء فيه؟ برّر إجابتك.
23. ● صف تكوّن الهوابط.
24. ■ لماذا تعدّ المياه السّطحيّة مشكلة ومدمرة للرسوبيات والصخور الرسوبية؟
25. ■ لماذا تتكون الحواجز النقطية على الانحناء الداخلي لقناة النّهر؟
26. ■ كيف تختلف تلال روشي عن الكثيب؟
27. ● ما المشاهد الأرضية الأكثر شيوعًا التي تحتها الجليديّات؟
28. ■ كيف تختلف الرّسوبيّات الجليدية عن رسوبيات الأنهار؟
29. ■ إزالة المياه الجوفيّة قد يسبب الهبوط. إذا توقف ضخّ المياه الجوفيّة، فهل سترتفع الأرض مرة أخرى إلى مستواها الأصلي؟ برّر إجابتك.
30. ♦ هل يجب على النّهر زيادة سرعته ليحمل رسوبيات أكثر؟ اشرح.
31. ● ما الذي يميز كتلة كبيرة من الجليد عن الجليديّات؟
32. ■ لماذا تتكون الأخاديد على سطح الجليديّات؟
33. ■ هل يتحرك الجليد كله في الجليديّات بالسرعة نفسها؟ اشرح.
34. ■ ما أهمية الجلاميد الكبيرة غير الموجودة في مكانها التي توجد أحيانًا في رسوبيات الجليديّات؟
35. ● كيف تتكون الكثبان الرملية؟

مسائل

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

1- ■ نعلم في الشّكل 1.23 أنّ 97.2% من مياه الأرض هي في المحيطات والباقي 2.8% مياه عذبة. ما النسبة المئوية من هذه المياه العذبة موجودة في: أ-جليد الأقطاب؟ ب- المياه الجوفيّة؟ ج- الأنهار والبحيرات والجداول؟

2- ■ يزداد عرض النّهر مع تقدمه نحو أسفل مجراه. باستخدام إجابتيك للفرعين أ و ب، صف تغير الصبيب.

أ- إذا كانت مساحة مقطع النّهر 1 $م^2$ وسرعة النّهر 0.5 م/ ث . ما مقدار صبيب النّهر؟

ب- إذا زادت مساحة مقطع النّهر إلى 2 $م^2$ وبقيت السرعة ثابتة، فما مقدار صبيب النّهر؟

ارجع إلى صندوق تصور العلوم الطّبيعيّة صفحة 607 – لحلّ مسائل 3، و4، و5.

3- ■ تم حفر بئر ضخّ في خزّان رمليّ. وقبل الضّخّ، تم قياس المال الهيدروليكي ومعدل التدفق فكانا 0.0001 و1$م^3$/ يوم على الترتيب. وعند بدء الضخّ أصبح المال 10 مرات أكبر مما قبل ذلك. كم مرة يزداد معدل التدفق؟

4- ♦ يعطينا قانون دارسي *معدل حجم التدفق* – الحجم في وحدة الزمن (مثل $م^3$/ يوم). أحيانًا لا يمكن معرفة مساحة مقطع القناة للحساب في قانون دراسي. هذا صحيح عند استخدام بئر لمعرفة التدفق في خزّان. حجم البئر أقل من المقطع العرضي لخزّان. لذا لا نستخدم مساحة المقطع العرضي لحساب معدل التدفق. وهناك طريقة أخرى لمعرفة الكمية، هي وحدة المساحة. فمثلا، إذا كان لدينا $م^3$ فإننا نعرف أنّ قاعدته 1$م^2$ - مساحة مقطع المكعب- وارتفاعه 1م. وإذا ملأنا المكعب بالماء، فسنقول إنّ لدينا مترًا من الماء في وحدة المساحة. يمكن إعادة ترتيب قانون دارسي لحساب معدل التدفق في وحدة المساحة، ويسمى صبيبا نوعيًّا specific discharge ويستعمل وحدات طول في وحدة الزمن. (مثلا م/ يوم). وبتكملة الجزء أ إلى جـ، سنعرف كيفية ارتباط الصبيب النوعي بمعدل التدفق الحجمي. (مساعدة: افترض أنّ وحدة التوصيل الهيدروليكي م/ يوم ووحدة المساحة $م^2$).

(أ) افترض ضخ 1$م^3$ من الماء من بئر إلى خزّان أسطواني فارغ. إذا كان مستوى الماء أعلى من القاعدة بمترين، فما مساحة مقطع الخزّان؟

(ب) إذا احتجنا إلى نصف يوم لضخّ 1 $م^3$ من الماء للخزّان، فما معدل التدفق مقيسًا بالحجم لكل وحدة زمن وبالصبيب النوعي كذلك؟

(ج) اكتب قانون دارسي لحساب الصبيب النوعي.

أرجو أن تتأكد من فهم المسألة 4 قبل الانتقال إلى المسألة 5.

5- ♦ القمة الهيدروليكية في نقطة أ هي 209م. أما في نقطة ب التي تبعد 300 م عن أ فهي 210م. يتكون الخزّان الجوفيّ من رمل بتوصيل هيدروليكي 150م/ يوم. تتحرك المياه الجوفيّة مباشرة من نقطة ب إلى أ. ما مقدار الصبيب النوعي؟

اختبار الاستعداد للقراءة

إذا كنت متمكنًا من استيعاب هذا الفصل، فعليك الإجابة عن 7 أسئلة من 10 على الأقل. وإن أجبت عن أقل من ذلك، فعليك أن تدرس أكثر قبل الاستمرار.

اختر أفضل إجابة لكلّ سؤالٍ ما يلي:

1. كمية الصبيب في النّهر عادة _____ نحو أسفل مجرى النّهر:
(أ) تصبح مضطربة
(ب) تتعرج
(ج) تقل
(د) تزداد
2. معظم مياه الأرض العذبة موجودة:
(أ) في البحيرات.
(ب) في الجليديّات.
(ج) في الأنهار.
(د) تحت الأرض.
3. تقوم المياه السّطحيّة بكلّ ما يلي ما عدا:
(أ) التعرية.
(ب) التّرسيب.
(ج) هبوط الأرض.
(د) تكوين الدّلتا.
4. تُقاس أكبر كمية من الماء يمكن لتربة حمله من خلال:
(أ) المسامية.
(ب) النفاذية.
(ج) درجة الإشباع.
(د) كمية التغذية *recharge*.
5. يصبح الهطل الذي لا يرشح إلى باطن الأرض ولا يتبخّر:
(أ) مياها جوفيّة.
(ب) مستوى المياه الجوفيّة.
(ج) رطوبة تربة.
(د) جريانًا سطحيًّا.
6. تتكون الكثبان الرملية لأنّ الرّيح:
(أ) تبعثر الرمال.
(ب) تحرك الرمال من مؤخرة الكثيب إلى مقدمته.
(ج) تحرك الرمال من مقدمة الكثيب إلى مؤخرته.
(د) تعترض التتابع الطبيعي للترسيب.
7. تتكون الدّلتا عندما:
(أ) تغلق الفيضانات الدورية قناة النّهر.
(ب) تغلق التعرية قناة النّهر.
(ج) يقلّ مال النّهر.
(د) يدخل النّهر إلى جسم مائي ثابت.
8. العوامل المؤثرة في سرعة النّهر هي:
(أ) الصبيب.
(ب) طول القناة.
(ج) مال النّهر.
(د) ب+جـ .
(هـ) أ+ جـ.
9. يتحول الثّلج إلى جليد عند تعرضه لـ:
(أ) نقصان الحرارة.
(ب) ضغط.
(ج) مطر.
(د) انزلاق قاعدي.
10. تسمى المياه تحت سطح نطاق التشبع:
(أ) مياهًا جوفيّة
(ب) رطوبة التربة.
(ج) مستوى المياه الجوفيّة.
(د) نظامًا ارتوازيًّا.

إجابات اختبار الاستعداد للقراءة

أ10، ب9، ج8، د7، د6، ب5، د4، ب3، أ2، ج1

اكتشف المزيد

http://water.usgs.gov/education.html

هذا الموقع هو من المصادر الجيدة لتعلم خصائص تضاريس العالم. يحتوي على مسرد للمصطلحات المصورة الوصفية لتضاريس الأرض، إضافة إلى خطة درس عند المستوى الابتدائي إضافة إلى روابط مع خطط أخرى.

http://www.geocities.com/monte7doc

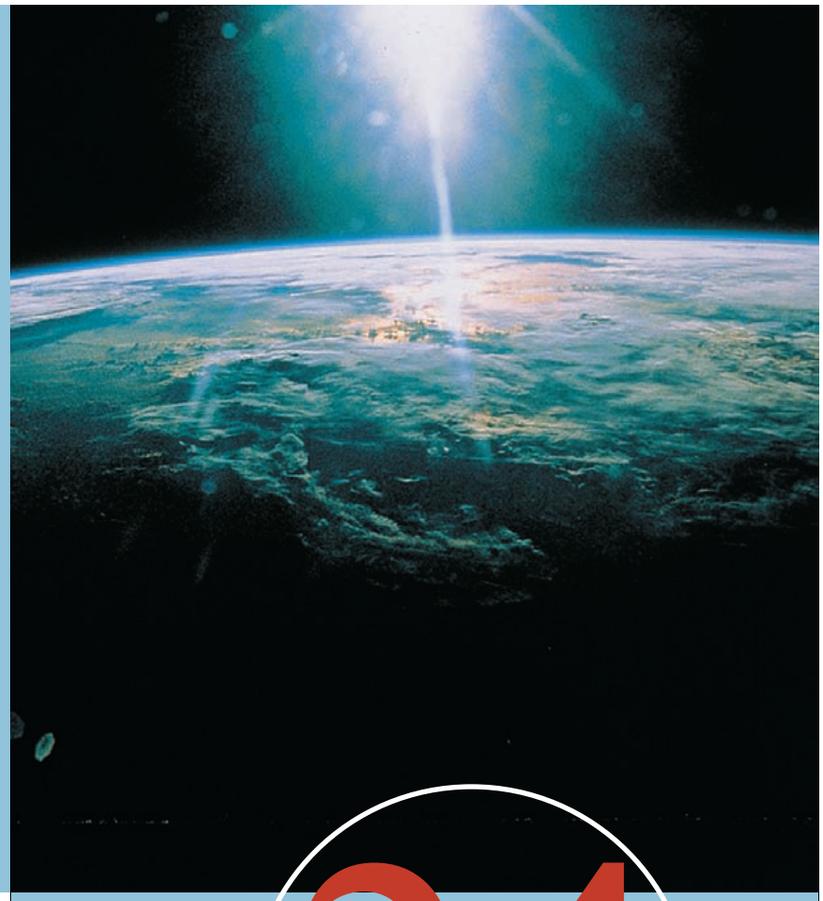
تزدحم صفحة الموارد التعليمية هذه بالروابط مع مواقع ممتازة حول الماء والبيئة. راجع قسم علم الماء للمدارس للحصول على معلومات حول الماء مليئة بالصور، والبيانات، إضافة إلى طريقة مصادر مرفقة بمركز تفاعلي لاختبار معارفك حول الماء.

تمتلئ الصفحة الرئيسة لمجلس الثقافة البيئية بالمعلومات حول الهواء، والماء، والتعرية، والنظم البيئية، والمناخ. يزخر الموقع بالنصوص المرفق بها روابط مع مواقع أخرى واقتراحات.

الفصل 23 مصادر على الشبكة

دروس تعليمية
- نشاط الدورة الهيدرولوجية
- تشكيل سطح الكوكب

أشرطة فيديو
اختبار قصير
بطاقات تعليمية
روابط



المحيطات، والغلاف الجوي، والتأثيرات المناخية

24

1.24 الغلاف الجوي للأرض ومحيطاتها

2.24 مكونات محيطات الأرض

3.24 أمواج المحيط ، المدّ والجزر وخطوط الشّواطئ

4.24 مكونات الغلاف الجوي للأرض

5.24 الطّاقة الشّمسيّة

6.24 القوى المسبّبة لحركة الهواء

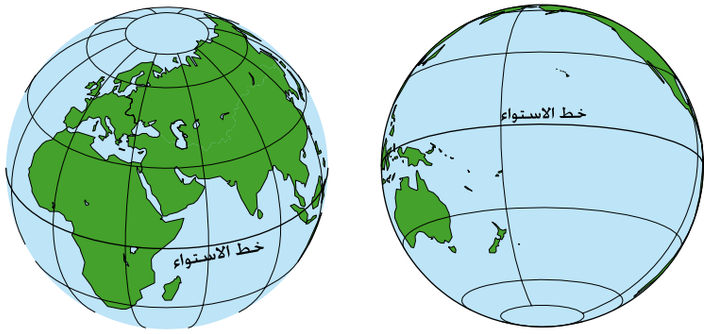
7.24 أنماط الدوران العالميّ

■ يتراءى لنا شكل الأرض من الفضاء باللونين الأزرق والفضي؛ فاللون الأزرق سببه الماء في المحيطات، أما اللون الفضي فبسبب الغيوم في الغلاف الجوي. كيف نشأ غلافنا الجوي الجميل والمحيطات؟ مِمَّ يتكون الغلاف الجوي؟ كيف يتفاعل كلّ من الغلاف الجوي والمحيطات؟ هناك العديد من الأسئلة التي ترد إلى العقل.

سوف نبدأ الإجابة عن هذه الأسئلة من خلال تعرف تطوُّر الغلاف الجوي للأرض والمحيطات. ثم نستكشف مظاهر مهمة لهذين الغلافين المائعين عند البحث في انتقال الطاقة بينهما، وكيف يؤثر نقل الحرارة في مناخ الأرض. ونختم بالنظر في الآليات التي تؤثر في أنماط جريان الغلاف الجوي والمحيطات وتأثير هذه الأنماط في المناخ.

1.24 الغلاف الجوي للأرض ومحيطاتها

يتكون سطح الأرض من ماء بنسبة 71% (الشكل 1.24). ويابسة بنسبة 29%. معظمها موجودة في النصف الشمالي للكرة الأرضية (الشكل 2.24). ومع أننا نسمّي كلّ محيط على حدة إلا أنها في الحقيقة محيط واحد كبير متواصل.



(أ) نصف الكرة المحيطي (ب) نصف الكرة القاري

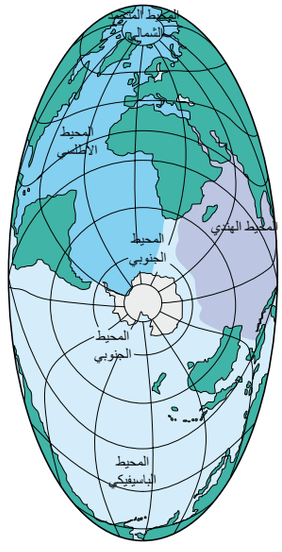
الشّكل 1.24
معظم سطح الأرض مغطى بالماء. يمكن تقسيم الأرض إلى: (أ) جزء تسوده المحيطات. (ب) جزء تسوده اليابسة.

كما تعلمنا في البند 1.23، فإنّ المحيطات هي الخزان الذي تتبخر منه المياه إلى الغلاف الجوي لتهطل لاحقًا على شكل مطر أو ثلج. تؤدّي المحيطات دورًا رئيسًا في تعديل مناخ الأرض ودرجة حرارتها. وتذكر من الفصل السادس أنّ للماء حرارة نوعية عالية؛ أي أنّها تسخن وتبرد ببطء. لذا، فإنّ المياه تنقل كميات كبيرة من الطاقة الحرارية إلى ما حولها عندما تبرد وتمتص كميات كبيرة من الطاقة الحرارية مما حولها عندما تسخن. هذه الخاصية للماء هي السبب وراء الحرارة المعتدلة للأرض على حدود المحيطات. ويمكن رؤية التأثير المعتدل للمحيطات عند النظر إلى تغير الحرارة الفصلي لمدينتين على خط العرض نفسه: مدينة سان فرانسيسكو الساحلية في كاليفورنيا ومدينة وشيتا الداخلية في كانساس (الشكل 3.24)؛ ففرانسيسكو لها تغير حرارة فصلي قليل. أما وشيتا ففيها تذبذب فصلي كبير: شتاء بارد وصيف حار. تعمل المحيطات عملاً جيدًا في تعديل المناخ. من خلال جعل الصيف أبرد والشتاء أدفأ.

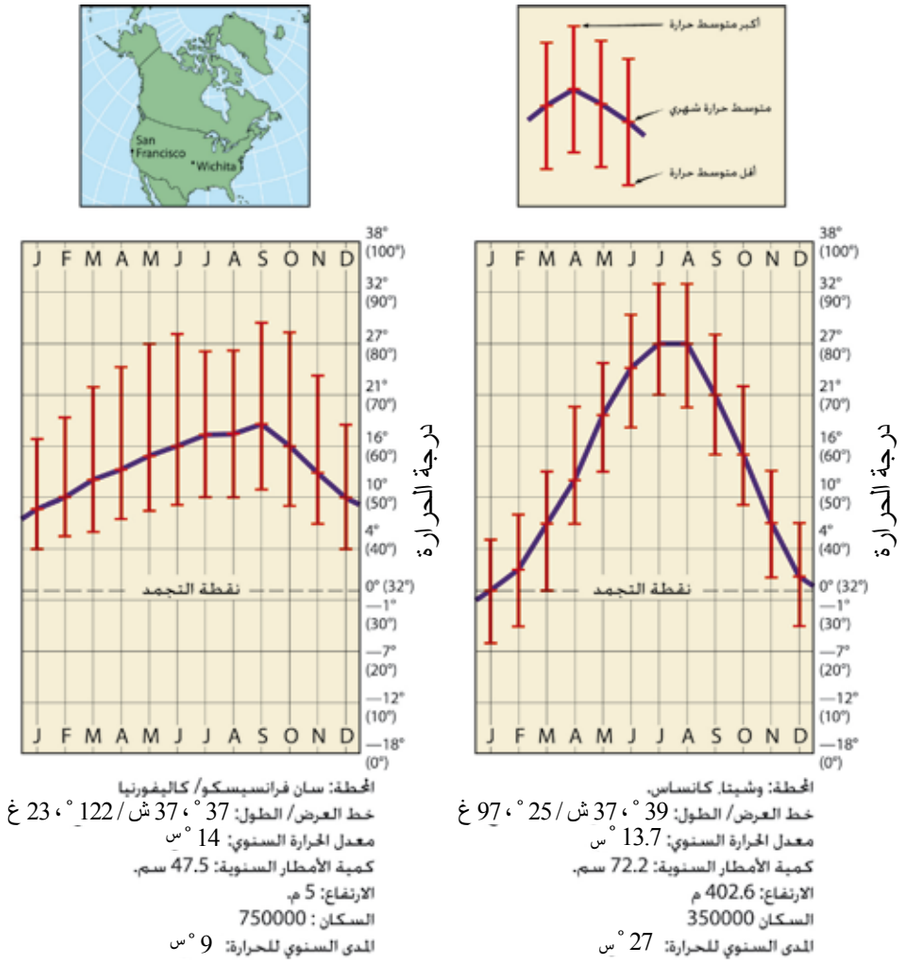
تطور الغلاف الجوي للأرض والمحيطات

يحتمل أن كان للأرض غلاف جويّ - غلاف من الغازات يحيط بها – قبل وصول الشمس إلى وضعها النهائي. لقد كان هذا الغلاف الجوي الابتدائي مكوّنًا من الهيدروجين والهيليوم فقط. وهما أكثر عنصرين شيوعًا في الكون. مع كميات قليلة من الأمونيا والميثان. كما أنّ هذا الغلاف الجويّ لم يحتو على الأكسجين الحرّ. ولكن بعد أن أصبحت الحرارة والضغط في المركز المنكمش للشمس- التي ما زالت تتكون- عاليين بما يكفي لبدء تفاعل اندماج نووي. ولدت شمسنا. وقد أدى تحرّر الطاقة من تكون الشمس إلى تدفق خارجي قوي من الأجسام المشحونة؛ تدفق قوي وكافٍ لإزالة الغلاف الجوي الأولي للأرض. عندها تكون غلاف جوي جديد.

وقد حدثت أوائل مراحل تكونه غالبًا عندما تسرّبت الغازات المحبوسة في داخل الأرض الحار من خلال البراكين والشقوق إلى سطح الأرض. وقد تسللت هذه الغازات إلى الخارج من خلال الثورانات المبكرة التي كانت غالبًا كالغازات الموجودة في ثورانات البراكين اليوم – ما يقارب 90 – 95% بخار ماء. والباقي ثاني أكسيد الكربون. لم يحتوِ الغلاف الجوي المبكر حتى الآن على أكسجين حرّ. ولا يستطيع دعم الحياة الموجودة حاليًا.



الشّكل 2.24
عند وضع مركز الخريطة فوق القطب الجنوبي، يمكن رؤية انتشار محيطات الأرض بالنسبة إلى الحجم والكمية؛ حيث يشكل المحيط الهادئ أكثر من نصف محيطات العالم وهو أكبر محيط. في الواقع، يمكن وضع كلّ من المحيطين الأطلسي والهندي في المحيط الهادئ.



الشّكل 3.24
مدى تغيرات درجة الحرارة في مدينتي سان فرانسيسكو في كاليفورنيا ووشيتا في كانساس.

كما تعلمنا في الفصل الحادي والعشرين، فإنّ الأكسجين الحرّ لم يتوافر في غلاف الأرض الجوي حتى ظهرت بكتيريا أولية تسمى سيانوبكتيريا، وكائنات دقيقة أخرى تشبه الطحالب. تمامًا كالنباتات الخضراء التي تبعت. فقد استخدمت هذه الكائنات التمثيل الضوئي لتحويل ثاني أكسيد الكربون والماء إلى كربوهيدرايت وأكسجين حرّ:

$$CO_2 + H_2O + \text{ضوء} \rightarrow CH_2O + O_2$$

وبعد بداية تراكم الأكسجين الحرّ (O_2)، قامت التفاعلات الكيميائية بإنتاج طبقة الأوزون في أعلى الغلاف الجوي. ولأنّ طبقة الأوزون تسلك سلوك مصفاة لتقليل كمية الأشعة فوق البنفسجية الواصلة إلى سطح الأرض، فقد أصبح السّطح قادرًا على دعم الحياة.

ومع استمرار تبريد الأرض، فإنّ كميات بخار الماء الكبيرة التي أُنتجت تكاثفت لتكون المحيطات. وقد أسهمت قطع المذنبات السّاقطة من الفضاء في إضافة بعض الماء للمحيطات حيث تعدّ أساسية لتطور الحياة. ومن ثَمَّ لتطور البيئة الشاملة الموجودة حاليًّا وبقية تاريخ الأرض.

■ **نقطة فحص**

1. لِمَ توجد أكثر المُناخات حرارة على الأرض في وسط القارات؟
2. هل وجدت طبقة الأوزون قبل تطور السيانوبكتيريا؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. تعمل الحرارة النوعية العالية للماء على إبقاء المناطق الشاطئية بعيدة عن درجات الحرارة المتطرفة. لذا، تكون درجات الحرارة العالية بعيدة عن المحيط.
2. لا. تكوّن الأوزون سُبِق بتكوين الأكسجين الحرّ الذي جاء من البناء الضوئي لكائن السيانوبكتيريا.

■ 2.24 مكونات محيطات الأرض

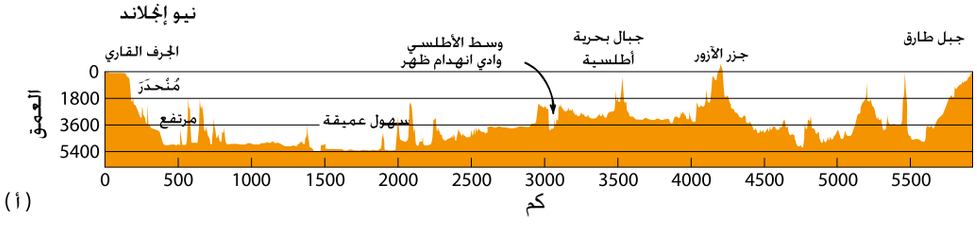
تعدّ المحيطات على الأرض المظهر السائد على كوكبنا. وقد تعجب بعض الفلاسفة من عدم تسمية كوكبنا محيطًا بدلاً من تسميته أرضًا. إذا صرفنا الماء من محيطات الأرض، فإننا سنرى سلاسل جبلية مدهشة في وسط أحواض المحيط، وأخاديد عميقة تحيط بالعديد من القارات، وليس قاع المحيط المنبسط العديم المظاهر الذي تم تصور وجوده قبل الاكتشافات في أواسط القرن العشرين.

إنّ المحيط جسم مائيّ، مالح، هائل. وتسهم طبيعته المالحة في تنوع كثافته التي تسهم بدورها في حركة تيارات المحيط. تتحرك الأمواج خلال المحيط استجابة لحركة الغلاف الجوي، ولكن المحيط أيضًا يستجيب للتأثيرات خارج الأرض؛ فالقمر والشمس يكوّنان المدّ والجزر. ولأنّ جزءًا كبيرًا من سطح الأرض مغطًّى بالمحيطات، فإنّ هذه المحيطات تحوي كنوزًا عالمية قيمة. ولكن بسبب اتساعها - لا زال لدينا الكثير لنكتشفه - نعرف عن سطح القمر أكثر مما نعرف عن قاع المحيط.

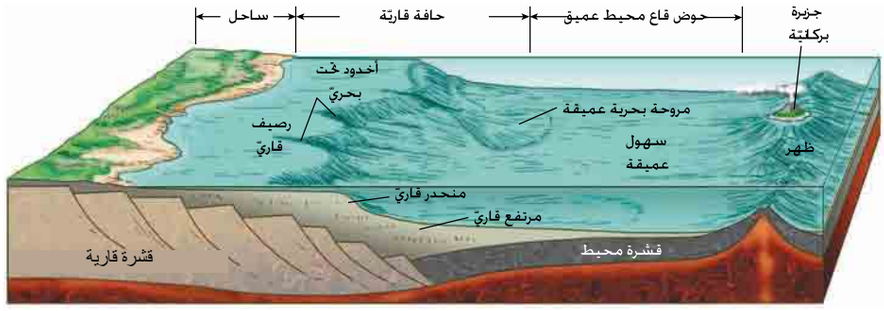
قاع المحيط

إنّ مظاهر قاع المحيط واضحة جدًّا. في الحقيقة، ترتفع الأرض فوق سطح البحر بمتوسط 840 مترًا، في حين ينخفض قاع المحيط تحت سطح البحر بمعدل 3800 متر. إذا قارنا ارتفاع جبل إفرست في الهملايا وهو 8848 مترًا فوق سطح البحر من جهة، وعمق أخدود مريانا في المحيط الهادئ 11035 مترًا تحت سطح البحر من جهة أخرى، فسنرى أنّ المحيطات أكثر عمقًا من ارتفاع جبال الأرض.

يتكون قاع المحيط من حواف قاريّة، وأحواض محيط عميقة، وظهور وسط محيط، وأخاديد عميقة. ولكن بعيدًا عن حواف القارات، تختلف طبوغرافية قاع المحيط كثيرًا؛ فمرتفعات ظهور وسط المحيط التي تحيط بالعالم عالية ومتباينة، أما قاع المحيط المغطى بالرسوبيات فمنبسط نسبيًّا، وقد تكون أخاديد المحيط عميقة بالقرب من حدود القارات (الشكل 4.24).



الشكل 4.24
تبيّن خريطة قاع المحيط الاختلافات الطبوغرافية. (أ) مقطع المحيط الأطلسي. (ب) مقطع المحيط الهادئ.



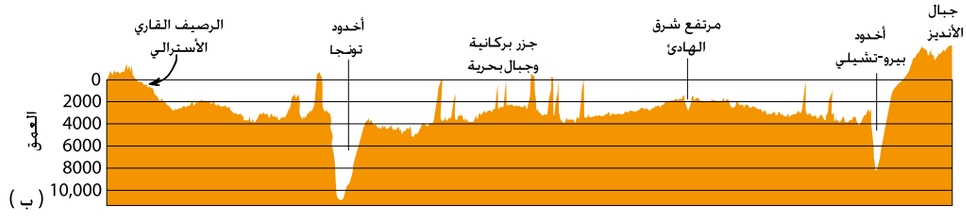
الشّكل 5.24
مقطع يبين الحافة القارية من اليابسة إلى قاع المحيط العميق.

توجد **الحافة القاريّة (*Continental margin*)** على الحدود بين القارة والمحيط. وكما يبيّن الشكل 5.24 فإنّ الحافة القاريّة تتكون من: 1- *الرّصيف القاريّ* (الجزء المغمور القريب من اليابسة). 2- *المنحدر القاريّ* (نقطة انحدار الرصيف حيث يصل إلى عمق 2 – 3 كم). 3- *المرتفع القاريّ* (المنطقة من قاع المنحدر إلى قاع المحيط العميق).

بالقرب من القارات، ينحدر **الرّصيف القاريّ** بلطف تحت الماء ممتدًّا من خط الشاطئ نحو حوض المحيط- إنه امتداد القشرة القارية تحت الماء. ولكن لأنّ الرصيف مغمور، فإنه يعدّ جزءًا من قاع المحيط. تتغير كمية حافة القارة التي تُعدّ رصيفًا قاريًّا خلال الزمن الجيولوجي بسبب ارتفاع مستوى البحر وانخفاضه. وعندما يكون مستوى البحر أقل من المستوى الحالي، كما كان خلال آخر عصر جليدي، فإنّ الرصيف القاري يكون ضيقًا؛ لأنّ منطقة أقل تكون مغمورة بالماء. وفي المقابل، عندما يرتفع مستوى سطح البحر، كما يمكن أن يحدث إذا انصهرت كتل الجليد في القطب الجنوبي وجرينيلند، فإنّ الرّصيف القاريّ سيكون أعرض؛ لأنّ بعض الأراضي القارية ستنغمر بالماء. وبغض النظر عن مستوى سطح البحر، يختلف الرصيف القاريّ كثيرًا من مكان جغرافي إلى آخر. ففي بعض الأماكن لا يوجد رصيف قاري، ولكن في أماكن أخرى يمتد 1500 كم.

أما *المنحدر القاريّ* فهو الحافة الخارجية المنحدرة من القارة، وهي تشير إلى الحد بين القشرتين القارية والمحيطية. والمنحدر القاري حادّ عند الشواطئ الجبلية التي توجد في مناطق الحدود المتقاربة، وتنحدر بلطف على امتداد الشواطئ التي لا تحوي حدود صفائح (مثل الحافة الشرقية لأمريكا الشمالية والهند).

في حين يمثّل *المرتفع القاريّ* المنطقة الانتقالية بين الحافة القارية وقاع المحيط العميق. وهو عبارة عن مجموعة من الرسوبيات القارية التيتراكمت على قاع المنحدر القاري على شكل إسفين. تنقل التيارات القوية التي تجذب الرسوبيات إلى المرتفع القاريّ من الرصيف والمنحدر، غالبًا بسبب الانزلاقات تحت الماء. وتنحت التيارات المضطربة من الرسوبيات الناتجة عن هذه الانزلاقات أودية شديدة الانحدار تحت الماء. ومع



وصول الرسوبيات إلى قاع الوادي على شكل مروحي. تتكون *مراوح أعماق البحر*. ومع الزمن، تنمو مراوح أعماق البحار، وتتحد لتكون المرتفع القاريّ. إنّ الحواف القارية جميعها لا تحتوي على مرتفع قاري. مثلاً، على طول الحدود المتقاربة النشطة، فإنّ المنحدر القاريّ يصل مباشرة إلى أخدود محيطي عميق.

تشكّل أحواض المحيط العميقة 30% من مساحة سطح الأرض، ويتراوح عمقها بين 3 – 5 كم، وتتميز بالسهول العميقة، والأخاديد البحرية، وظهور وسط المحيط، والجبال تحت البحرية. تبدأ السهول العميقة عند نهاية الحافة القارية، وهي من أكثر مناطق الأرض انبساطًا وعمقًا- بسبب السّمك الكبير للرسوبيات الناعمة المتراكمة التي تدفن المظاهر غير المستوية للقشرة المحيطية.

توجد مجموعة من القمم البركانية فوق الرسوبيات المتراكمة في أعماق المحيط– قمم بحرية وتلال صغيرة عميقة. تنتهي السهول العميقة عند بداية ظهر وسط المحيط. وتشكل ظهور وسط المحيطات سلسلة جبلية متواصلة تحت الماء تمتد في المحيطات جميعها مثل الدرز على كرة البيسبول. إنّ متوسط الارتفاع على قمة الظهر 2.5 كم فوق قاع المحيط. أما بعض الجزر مثل آيسلندا، فإنّها توجد حيث ارتفع ظهر وسط المحيط أعلى من مستوى سطح الماء. يختلف عرض نظام ظهر المحيط على امتداد طوله، ولكن معدل العرض 1000 كم. إنّ نظام الظهر جميعه بركاني مكون من البازلت، وهناك تتكون القشرة المحيطية. على طول القمة، يعمل توسع قاع المحيط على تكوين نطاق انهدام في الوسط حيث تؤدي قوى الشّدّ من الحدود المتباعدة للصفائح إلى تكون صدوعًا عادية وزلازل صغيرة (انظر الفصل 22).

توجد الأخاديد البحرية في أحواض المحيط التي تحيط بحدود الصفائح المتقاربة، وتعدّ هذه الأخاديد أعمق أماكن الأرض، حيث تتجاوز أحيانًا 10000 م (أكثر من 6 أميال) عمقًا. أي، أعمق من ارتفاع معظم جبال الأرض. إنّ الأخاديد البحرية هي أماكن نشاط تكتوني توجد عند نقطة الغوص؛ حيث يرغم الغلاف الصخري على النزول إلى الغلاف اللدن، وهذا يؤدي إلى حدوث زلازل – أحيانًا كبيرة – وتكوين براكين ذات ثوران عنيف.

لمعلوماتك

■ لا توجد ظهور وسط المحيطات جميعها في وسط المحيط. فمثلاً مرتفع شرق الهادئ قريب من الحدود الشرقية للمحيط الهادئ وليس في الوسط. وعلى أيّ حال، توجد ظهور المحيطات عند توسع قاع المحيط. لذا فإنها علامة على الحدود المتباعدة حيث وجدت.

ماء البحر

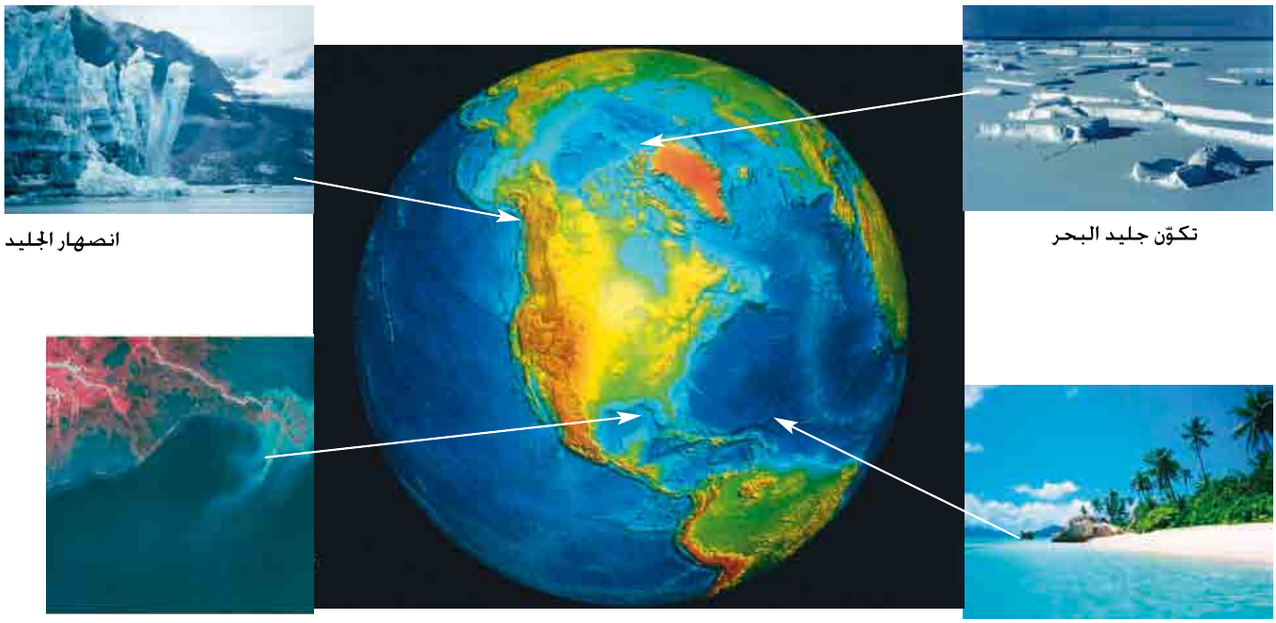
إنّ ماء البحر محلول معقد من المعادن الذائبة، والغازات الذائبة، والمادة الحيوية المحللة. يوجد كلّ مركب طبيعي بتركيز معين في المحيط. وللماء قدرة عالية على إذابة الأملاح (الفصل 18). لذا، فإنّ الملح يكوّن معظم المادة الذائبة في البحر. وتركيب ماء البحر بسيط بسبب وجود عدد قليل فقط من العناصر. والمركبات: الكلور، والصوديوم، والكبريتات، والماغنسيوم، والبوتاسيوم تشكّل أكثر من 99% من أملاح البحر (الجدول 1.24).

لمعلوماتك

■ الدليل على وجود نشاط بركاني على قاع المحيط مثير – أكثر من 20000 قمة بركانية وجدت في المحيط الهادئ وحده.

الجدول 1.24 عناصر رئيسة في أملاح البحر

العنصر	الرّمز الكيميائيّ	النسبة بالوزن
كلور	Cl^-	55.07
صوديوم	Na^+	30.62
كبريتات	SO_4^-	7.72
ماغنسيوم	Mg^{+2}	3.68
كالسيوم	Ca^{+2}	1.17
بوتاسيوم	K^+	1.10
المجموع		99.36



الشّكل 6.24
تزداد الملوحة مع نقصان التزويد بالماء العذب. وتتضمن العوامل التي تزيد الملوحة تكون الجليد والتبخر. وتقل الملوحة مع زيادة التزويد بالماء العذب. وتتضمن العوامل التي تقلل الملوحة كلًّا من: أ) الجريان السطحي من الأنهار والجداول. ب) الهطل. ج) انصهار الجليد.

تقاس كمية الأملاح الذائبة في مياه البحر **بالملوحة(Salinity)**. وهي كتلة الأملاح الذائبة في 1000 جم من ماء البحر. إنّ متوسط ملوحة ماء البحر 35 جم/ 1000 جم من ماء البحر؛ أو 35 جزءًا من ألف. (يضع العلماء هذه النسبة على شكل ‰). أي أنّ نسبة الملوحة في المحيط تساوي 35%.

تختلف الملوحة من مكان إلى آخر في المحيط. إلا أنّ التركيب الكليّ لماء البحر متساو من مكان إلى آخر – خليط من 96.5% ماء، و 3.5% ملح. يتأثر تغير الملوحة بعوامل زيادة التزويد بالماء العذب أو نقصانه (الشكل 6.24). يدخل الماء العذب المحيط من ثلاثة مصادر، هي: 1- الجريان السّطحيّ من الأنهار والجداول. 2- الهطل.3- انصهار الجليد. وتغادر المياه العذبة المحيط بطريقتين، هما: 1- التّبخر. 2- تكوّن جليد البحر. يزيد التبخر من ملوحة البحر؛ لأنّ بخار الماء النقي فقط هو الذي يخرج من محلول ماء البحر. أما الأملاح فتبقى. وعندما يتكون جليد البحر، تتجمد جزيئات الماء فقط. وتترك الأملاح مرة أخرى عند التجمد. وهناك اختلاف بسيط في الملوحة؛ فملوحة المحيطات في المناطق شبه الاستوائية الجافة حيث التبخر عال تصل إلى 37%. أما المحيطات في خطوط الاستواء، فيقلّ تركيز الأملاح فيها إلى 33% بسبب الأمطار الغزيرة. ويحدث الاتزان الكليّ عند تعويض التبخر بالهطل والجريان السّطحيّ وتعويض تكون الجليد بانصهاره.

نقطة فحص

إذا أردت تحضير كمية من ماء مالح بملوحة ماء البحر نفسها ، فكم جرامًا من الملح تحتاج لعمل كجم واحد من ماء البحر؟ وكم جرامًا من الماء؟

هل كانت هذه إجابتك؟

ملوحة الماء المالح 35% لذا، خذ 35 جم من الملح، وضعها في 965 جم من الماء لعمل كجم واحد من ماء البحر.

لمعلوماتك

تؤثر الحياة البحرية في تركيب ماء البحر عن طريق إزالة الأملاح والغازات الذائبة ومواد أخرى. تقوم الكائنات ذات القشرة الصلبة كالصدف والسرطانات بأخذ أملاح الكالسيوم لبناء أجسامها. الدياتومات تسحب السليكا الذائبة لتكون صدفها. تركز بعض الحيوانات على عناصر معينة، كالسرطان الذي يأخذ النحاس والكوبلت. في حين تركز بعض النباتات البحرية على اليود، أما خيار البحر فيأخذ الفناديوم.

3.24 أمواج المحيط ، المدّ والجزر وخطوط الشّواطئ

تأتي أمواج المحيط بعدة أحجام وأشكال، من تموجات صغيرة (نيم) إلى أمواج ضخمة بسبب الأعاصير. إن أمواج البحر هي كباقي الأمواج، تبدأ بنوع من الاضطراب. وتعدّ الرياح أكثر عوامل الاضطراب شيوعًا، والتي تسبب أمواج المحيط.

انفخ في وعاء مملوء بالماء، وسترى سلسلة من التموجات الصغيرة (النيم) تتحرك فوق سطح الماء. إن تكوين الأمواج في البحر مشابه لذلك. ومع زيادة سرعة الرياح، تنمو النيم لتصبح أمواجًا. وعند هبوب رياح أقوى تتكوّن أمواج أكبر. ومع انتقال الأمواج بعيدًا عن مصدرها، فإنها تتحول إلى أمواج دائرية لطيفة ذات نسق عادي تسمّى *انتفاخًا* – وهي التموجات الناضجة في المحيط المفتوح.

تذكر من دراستنا للأمواج في الفصل 10 أنّ حركة الأمواج يمكن وصفها عن طريق جَيب المنحنى (الشكل 7.24) وأنّ **الاضطراب** هو الذي يتم حمله بالموجة، وليس المادة التي تتحرك خلالها الموجة. تتحرك الموجة بعرض المحيط، أما الماء المشكل للموجة في معظم الأجزاء فيبقى في مكان واحد.

إنّ الأمواج على سطح المحيط *دوارة*. ومع عبور الموجة نقطة معينة، فإنّ الماء في تلك النقطة يتحرك بشكل دائريّ. ويمكن رؤية هذه الحركة الدائرية بملاحظة قطعة خشب طافية على سطح المحيط، تتأرجح قطعة الخشب في أثناء الاهتزاز إلى الأعلى والأسفل، وهي في الحقيقة تتبع دائرة في كلّ دورة موجة. تحدث هذه الحركة الدائرية بالقرب من سطح الماء، وتتناقص تدريجيًّا مع العمق (الشكل 8.24). وعلى عمق نصف طول الموجة تقريبًا، تكون الحركة الدورانية للموجة مهملة. ولهذا السبب، يمكننا القول إنّ الأمواج التي تتكون من الرياح توجد على السّطح بشكل رئيس.

وعند اقتراب موجة من الشاطئ حيث يقلّ العمق فإنّ قاع المحيط يعيق الحركة الدورانية. ومع نقصان عمق الماء فإنّ الجزء السّفليّ من الدائرة ينبسط – يصبح إهليلجيًّا – بالانجراف على قاع المحيط، وتتباطأ الموجة. يحدث هذا التحول على عمق نصف طول الموجة. يبقى زمن (فترة) الموجة ثابتًا؛ لأنّ المياه العميقة تستمر في الارتفاع نحو الشاطئ. ونتيجة لذلك، فإنّ الأمواج القادمة من المحيط تتغلب على الأمواج البطيئة التي أمامها، وتقلّ المسافة بين الأمواج . يُنتج تراكم الأمواج هذا في نطاق ضيق أمواجًا أعلى وأكثر ميلا. وعندما يصبح ارتفاع الموجة حادًّا إلى نقطة لا يستطيع الماء عندها دعم نفسه، فإنّ الموجة تنقلب وتندحرج نحو الأمام، وتتكسر على الشاطئ. يسمى الماء المضطرب المتكون من التكسر (*سيرف*) .يعني *نطاق السيرف* المنطقةَ النشطةَ من الماء بين منطقة تكسّر الموجات وخطّ الشاطئ (الشكل 9.24).

(أ)

(ب)

الشّكل 7.24
لأمواج المحيط خصائص موجات الجيب البسيطة.

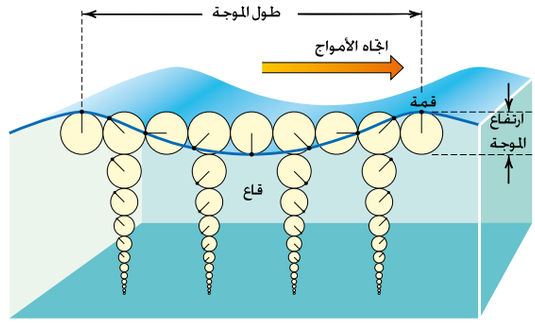
تتكوّن تيارات بدلاً من التيارات الموازية للشاطئ عند اقتراب الأمواج من الشاطئ عمودية عليه؛ بحيث يكون خطّ قمة الموجة موازيًا للشاطئ.

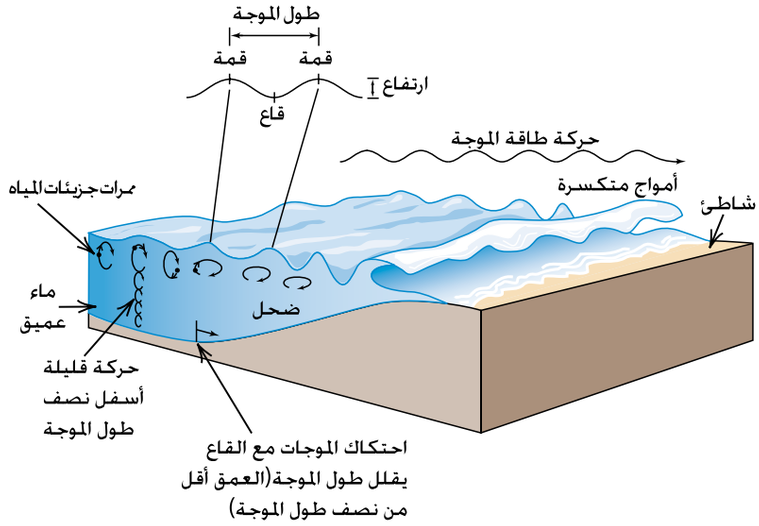
انكسار الأمواج (Wave Refraction)

مع دخول الأمواج إلى المياه الضحلة، يتغير اتجاه تقدمها عند اقترابها من الشاطئ، وتصبح ذات زاوية. يبدأ جزء الموجة القريب من الشاطئ بلمس قاع المحيط على عمق نصف طول الموجة. وتقلّ سرعة هذا الجزء من الموجة القريبة من الشاطئ، ويتباطأ خلفها أجزاء من الموجة التي ما زالت في الماء العميق بعيدًا عن الشاطئ، مع لمس الجزء الثاني من الموجة القادمة للقاع فإنها تتباطأ. وعليه، وعلى نحو مستمر، فإن خطّ قمة الموجة ينحني عند تحركها نحو ماء ضحل متمحور حول الجزء البطيء من الموجة لتصبح أكثر موازاة لخط الشاطئ (الشكل 10.24). وهذا هو انكسار الموجة. إضافة إلى أنّ الاقتراب المائل للموجات من الشاطئ يسبب تكون *التيارات الموازية للشاطئ*.

إنّ انكسار الموجات ذات تأثير مهم في الشواطئ غير المنتظمة؛ حيث تجعلها مستقيمة ومنتظمة. ويكون التأثير أكبر في الشواطئ التي فيها نتوءات وخلجان صغيرة. إن الانكسار يؤدي إلى عدم انتظام توزع طاقة الموجة (الشكل 11.24). وترتكز طاقة الموجة على مناطق رؤوس البَرّ حيث يدخل خطّ الشاطئ في البحر، لأنّ الموجة تتعرض للمياه الضحلة أولاً في هذه المناطق.

الشّكل 8.24
حركة جزيئات الماء عند مرور الموجة. تتحرك الجزيئات في مدار دائريّ. تكون الحركة الدائرية كبيرة على السطح، وتقل تدريجيًّا مع العمق. وتكون الحركة الدورانية مهملة على أعماق أكبر من نصف طول الموجة.





الشكل 9.24
تغير الأمواج شكلها عند انتقالها من الماء العميق إلى الماء الضحل، ومن ثَمَّ إلى الشاطئ. تكون الحركة دائرية في الماء العميق. في حين تصبح الحركة إهليلجية في المياه الضحلة بسبب التماس مع القاع. يؤدي هذا التغير إلى نقصان سرعة الموجة. ومع استمرار تقدم الأمواج، تقلّ المسافة بينها فيزيد ارتفاعها. وعند وصولها إلى ارتفاع حرج، تنكسر وترتطم في نطاق السيرف.

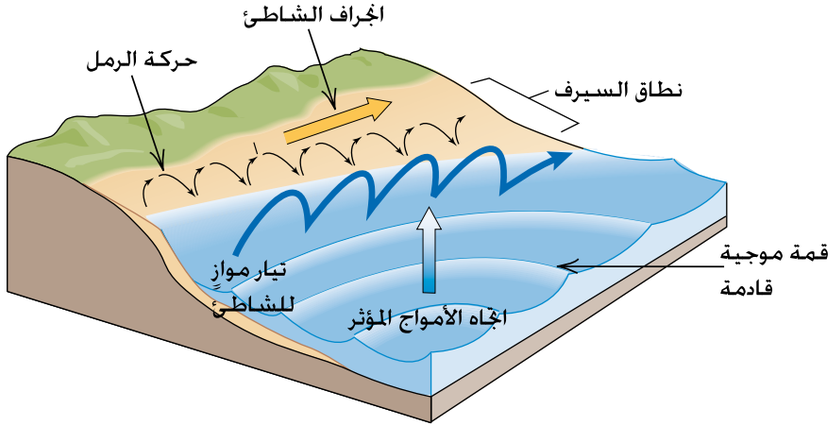
إن الطاقة الزائدة المتركزة هنالك تؤدي إلى زيادة معدل التعرية. أما في الخلجان المجاورة، فيبتعد خطّ الشاطئ نحو اليابسة مما يخفف من طاقة الموجة. يسهّل ماء الخليج الانسيابي توضّع الرسوبيات. وتتآكل الرؤوس البارزة متراجعة نحو اليابسة. في حين تعمل الخلجان على تراكم الرسوبيات نحو البحر.

■ نقطة فحص

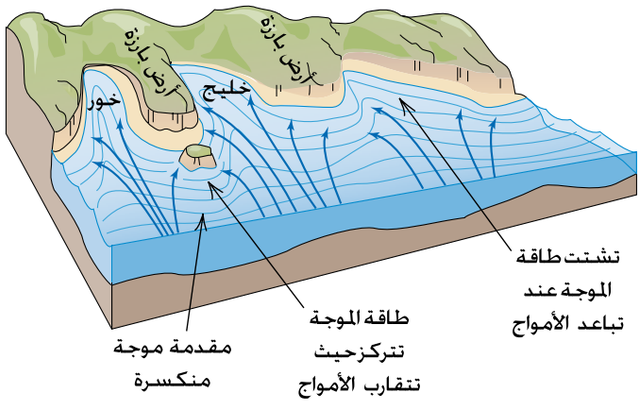
1. لماذا يبقى راكب الأمواج المستريح في البقعة نفسها في منطقة انتفاخ بحريّ عاديّ؟
2. ما الذي يسبب تباطؤ الموجة مع اقترابها من الشاطئ؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. فكّر في قطعة الخشب المتأرجحة. يتحرك الماء أسفل راكب الأمواج المستريح بشكل دائري. فيتحرك إلى الخلف بالمقدار نفسه الذي يتحرك به إلى الأمام. لذا، فما لم يقم راكب الأمواج بالتجديف نحو الشاطئ أو بعيدًا نحو البحر، فإنه سيتأرجح إلى الأعلى والأسفل في الموقع نفسه.
2. تقل سرعة الموجة عندما يرتطم جزؤها السفلي في حركتها الدائرية بقاع المحيط. ويبدأ شكلها بالانبساط.



الشكل 10.24
عند اقتراب الأمواج من خطّ الشاطئ، فإنها تنكسر بحيث تصبح قمة الموجة القادمة موازية للشاطئ في أثناء انتقالها إلى المياه الضحلة. ولأنّ الاتجاه الكليّ لحركة الموجة مائل مع الشاطئ، فإنّ تيارات موازية للشاطئ تتكون، محرِّكة الماء والرمل بموازاة خطّ الشاطئ.



الشّكل 11.24
تتركز طاقة الموجة في الشواطئ غير المنتظمة عند اقترابها من يابسة بارزة، وتتشتت عند ابتعادها في الخلجان.

عمل أمواج المحيط

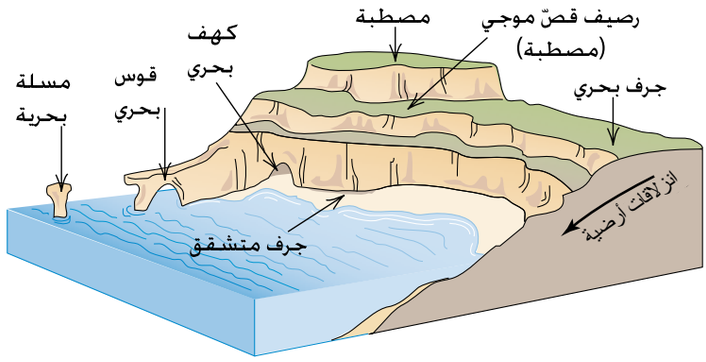
إن قوة المحيطات ظاهرة للعيان لمن يزور الشاطئ. ففي الظروف العادية، نلاحظ أنّ بعض السواحل هادئة، أمّا بعضها الآخر فيصمد أمام التدمير التي تقوم به الأمواج العاتية. وفي أثناء العواصف الكبيرة، تكون الشواطئ جميعها تحت رحمة المحيط الهادر.

على امتداد الشاطئ (Along the coast)

تكوّن الرياحُ التي تهب على عرض سطح المحيط الأمواجَ. ومع اقتراب الأمواج في المياه الضحلة قرب اليابسة تصبح أعلى وأشد انحدارًا. ومن ثَمَّ تنهار أخيرًا أو تتكسّر. وفي نطاق السيرف يحرك نشاط الأمواج الرسوبيات إلى الأمام والخلف في اتجاه الشاطئ ونحو البحر. ولأنّ كمية الأمواج على الشاطئ تختلف مع الزمن. ولأنّ الصخور على الشاطئ كذلك لها قدرات مختلفة على مقاومة التعرية، فإنّ الأمواج قد تعمل مظاهر تعرية مختلفة؛ فالصخور الرسوبية قليلة التماسك، والصخور النارية والمتحولة ذات الشقوق الكثيرة تتعرى بسرعة. أمّا الصخور الرسوبية المتصلة جيدًا، والصخور النارية والمتحولة غير المتشققة فتتعرى ببطء.

على امتداد خطوط الشواطئ المكونة من صخر صلب، تعمل الأمواج الضاربة على قصّ قاعدة اليابسة إلى حفر. ومع استمرار التعرية، تبدأ الحفر بالتعمق، وتبدأ الصخور فوقها تبرز فوق الفراغ السفلي. ومع سقوط الصخور المعلقة فإنّ الجرف يتراجع. ومع الزمن، تعمل الأمواج على قصّ الجرف لتكوين سطح مستوٍ نسبيًّا يسمى *منصّة القصّ الموجيّ* (الشكل 12.24).

يجب على حبات الصخر التي تعرت من الشاطئ أن تترسّب عاجلاً أم آجلاً. وتترسب معظم المادة في بيئة الترسيب الأكثر شهرة، ألا وهي *الشّاطئ*. إنّ الشّواطئ الرملية هي نتاج الحركة المضطربة في نطاق السيرف. وتميل هذه الشواطئ إلى أن تكون طولية بسبب التيارات الموازية للشاطئ والتي تتكون عند اقتراب الأمواج منه. بزاوية مائلة مثلاً، تسببُ الأمواجُ الآتية من الشمال الغربي التي تقترب من خط شاطئ يمتد شمالا – جنوبًا تكوينَ تيار مواز للشاطئ في اتجاه الجنوب (الشكل 10.24). تحرك هذه التيارات الرّمال على طول الشاطئ.



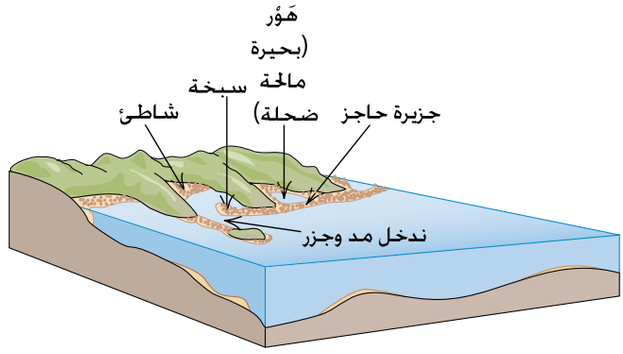
الشّكل 12.24
أشكال الأرض المميزة لتعرية الشواطئ. تقص الأمواج الجروف لتكون الأرصفة والمصاطب. تتعرض بعض الجروف للحتّ لتصبح كهوفا بحرية. وتتكون الأقواس البحرية إذا التقى كهفان بحريان على جانبي رأس بارز من اليابسة. وعند انهيار قوس بحري، تنشأ مسلّة بحرية في موقعه. ومع الزمن، تعمل قوة الأمواج على تعرية المسلة.

لمعلوماتك

■ هناك 280 جزيرة حاجزة تقريبا تحيط بشواطئ المحيط الأطلسي وخليج المكسيك، حيث تشكّل الحواجز بين الشاطئ والمحيط المفتوح. إنّ مناطق اللاغون التي تفصل الجزر الضيقة عن الشاطئ هي مياه هادئة. تستخدم القوارب الصغيرة في هذه اللاغون عادة كحجرات بين فلوريدا ونيويورك. لذا، فهي تتجنب الماء الهائج في الأطلسي المفتوح.

لمعلوماتك

■ يختلف رمل الشاطئ تبعًا للمنطقة المعرضة للتعرية؛ ففي الشواطئ المدارية مثل فلوريدا أو هاواي، نجد أنّ الشاطئ مكون من مادة عضوية؛ حبات بحجم الرمل من الشعاب المرجانية والأرصفة الكربوناتية. وبالمقابل، فإنّ الرمل في العديد من الشواطئ في القارات غير عضوي، أي أنه مكون من معادن سيليكاتية تم تعريتها من صخور قاريّة.



الشّكل 13.24
أشكال الأرض الترسبية المميزة للشواطئ.

وحيث يتم ترسيب الرمل من التيارات يتكون **بروز**. تبدأ البروزات على شكل مرتفعات رملية مغمورة. ومع استمرار تراكم الرّمل، يظهر البروز فوق سطح الماء ممتدًّا من الشاطئ نحو المياه المفتوحة. غالبًا ما تكون كقطعة تبدو كالإصبع. (الشكل 13.24).

عند تكوُّن المرتفعات الرملية في المياه بعيدة عن الشاطئ وموازية له، فإنها تتكون في النهاية على شكل **جزر حاجزة**. تتكون الجزر الحاجزة عندما تفصل هذه المرتفعات سطح الماء لفترة طويلة بحيث يبدأ نمو النباتات. وفي أثناء العواصف الكبيرة، تنظم الأمواج الأراضي المنخفضة مكونة مدخلا إلى اللاغون (الهور) بين الجزر الحاجزة والشاطئ (الشكل 13.24). تعدّ منطقة اللاغون هذه بيئة هادئة، وتحتوي على طمي وطين يميز الطبقة المتقاطعة، وعلامات تموجات صغيرة ناشئة عن الحركة الاهتزازية للماء في اللاغون (الهور). أما الشاطئ، فيتكون من حجارة ملساء، وحصباء دائرية، و/ أو رمل.

لمعلوماتك

■ تتكوّن الشعاب المرجانية القديمة من تتابع طبقي من مادة مسامية وطين كتيم. يعطي هذا التطبق الشعاب المرجانية القديمة أهمية لكي تسلك كمصدر للنفط والغاز، مما يجعل اكتشافها مهمًّا اقتصاديًّا.

اربط مع علم الحياة

■ الشعاب المرجانية

تتكون الشعاب المرجانية من كائنات مرجانية نامية تخزن هياكلها الخارجية كربونات الكالسيوم في أثناء نموها. وعند إمعان النظر في قطعة مرجان أو شعاب مرجانية، فإننا نرى الهيكل الخارجي المكون من كربونات الكالسيوم، وليس كائن المرجان الطّريّ. يكوّن معظم المرجان - وليس كلّه - مستعمرات تعدّ البناء الرئيس في الشعاب التي تنمو نحو الخارج مع الزمن، ولكنها قد تنمو في اتجاه الأعلى عندما يلتصق مرجان جديد فوق مرجان ميت.

وتعيش العديد من أنواع الشعاب المرجانية في المياه الضحلة؛ لأنّ مصدر الغذاء الرئيس لهذا المرجان هو الطحالب التي تقوم بالبناء الضوئي، وتحتاج إلى ضوء لكي تعيش. تعيش الطحالب والمرجان معًا حياة تكافلية؛ حيث يوفر المرجان الحماية للطحالب، في حين توفر الطحالب الأكسجين والغذاء للمرجان. ولكي تزدهر هذه الأنواع من المرجان، فإنها تحتاج إلى مياه دافئة وصافية، وخالية من الرسوبيات.

إنّ الأرصفة الكربوناتية أكبر كثيرًا من الشعاب المرجانية، غير أنّ وجودها يعزى إلى الكائنات الحية. وهذه الأرصفة الكربوناتية عبارة عن مقابر الكائنات الخازنة لكربونات الكالسيوم، وتتكون في المياه الضحلة قريبًا من القارات أو متصلة بها. كما أنّ هذه الأرصفة هي السبب في النسبة العالية من الرسوبيات الكربوناتية في المحيطات.

ويمكن تدمير الشعاب المرجانية والأرصفة الكربوناتية جزئيًّا بحركة الأمواج المستمرة في أثناء نمو الشعاب واقترابها من سطح البحر، وهذا هو التدمير الطبيعي. إلا أنّ الشعاب المرجانية تدمر أيضًا بعوامل غير طبيعية. وعليه، فهي تدل على صحة المحيط. وكما نعلم فإنّ المناخ الدافئ يحفز ترسب الكربونات؛ لأنّ هذه الكربونات تذوب بسهولة في الماء البارد، بخلاف ذوبانها في الماء الدافئ. ولكن الكائنات المرجانية هي كائنات حية، وعندما يصبح الماء دافئًا جدًّا، فإنّ الطحالب تترك المرجان، أو أنّ المرجان يقوم بطرد الطحالب. ومع انقطاع الغذاء يبدأ المرجان يفقد لونه يبدأ تدريجيًّا في الموت* . ويرى العلماء أنّ فقدان المرجان للونه يعدّ علامة على الاحترار العالمي. وبعيدًا عن درجات الحرارة المرتفعة للمحيط، فإنّ العلاقة التكافلية بين المرجان والطحالب قد تتأثر بزيادة الملوثات، وارتفاع مستوى الأشعة فوق البنفسجية، واختلاف الملوحة، أو المفترسات، أو بعدد من هذه العوامل مجتمعة.

* إنّ اللون الجميل للمرجان ناجٌ عن العلاقة التكافلية مع الطحالب؛ فالمرجان لا لون له.

لمعلوماتك

■ الأرض ليست صلبة قاسية، ولكنها قابلة للتشكل إلى حد ما (تذكر التدفق اللدن في الستار). ولهذا السبب يحدث المدّ والجزر الأرضيّ، وهو أقلّ وضوحًا من المدّ والجزر المحيطي. يرتفع السطح الصلب وينخفض من الأرض مرتين يوميًّا بمقدار 25 سم (للمقارنة، يرتفع المحيط وينخفض كلّ يوم مترًا واحدًا). هناك أيضًا مدّ وجزر للغلاف الجويّ الذي يؤثر في الأشعة الكونية التي تصل سطح الأرض. المجال المغناطيسي الأرضي هو الذي يتحكم بقوة في هذه الأشعة، مما يؤدي إلى تغيرات في الأحياء. هل يسلك أحد أصدقائك سلوكًا غريبًا عند وجود القمر في حالة البدر؟

■ **نقطة فحص**

1. كيف تختلف أرصفة القصّ الموجيّ عن الشواطئ؟
2. توفر الجزر الحاجزة خطّ دفاع أوليًّا ضد أمواج الأعاصير ذات الطاقة العالية في المحيط المفتوح. هل تعدّ الجزر الحاجزة من المظاهر الثابتة في الشاطئ؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. تتكون أرصفة القصّ الموجيّ بسبب التعرية، أمّا الشاطئ فيتكون من الترسيب. إنّ أرصفة القصّ الموجيّ ، والمصاطب، وأقواس البحر، والمسلات البحرية كلّها مظاهر تعرية. في حين تعدّ الشواطئ، والبروزات، والجزر الحاجزة مظاهر ترسيب.

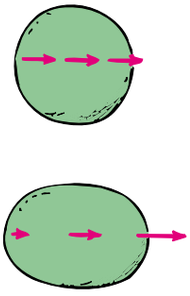
2- تعدّ الجزر الحاجزة من المظاهر الثابتة لأنها تتكون دائمًا. ولكنها غير ثابتة؛ لأنها حساسة لقوى الطبيعة. تتكون هذه الجزر الحاجزة من رمل منقول؛ مادة غير متماسكة ناتجة عن فعل التعرية من الأمواج والرياح التي تضرب الشاطئ.

المدّ والجزر (Tides)

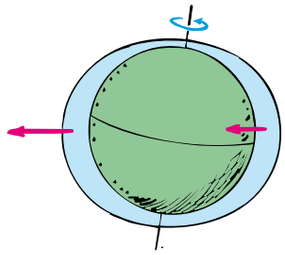
من السهل ملاحظة أنّ مستوى المحيط يرتفع وينخفض بشكل دوري على امتداد أيّ شاطئ. ويسمّى هذا التغير اليومي في ارتفاع المحيط *المدّ والجزر*. علم البحارة منذ القدم أنّ هناك علاقة بين المدّ والجزر من جهة والقمر من جهة أخرى. ولكن حتى مجيء إسحق نيوتن، لم يستطع أحد أن يقدم تفسيرًا مقنعًا لوجود مدّين في اليوم الواحد. بيّن نيوتن أنّ المدّ والجزر في المحيط يحدث بسبب *الاختلافات* في قوى الجذب من القمر على جانبي الأرض. إنّ قوى الجاذبية بين القمر والأرض تكون أقوى على جانب الأرض القريب من القمر، ولكنها ضعيفة على الجانب البعيد عنه؛ لأنّ قوة الجاذبية تضعف مع زيادة المسافة.

ولفهم سبب تكون المدّ والجزر من اختلاف قوة جذب القمر على جانبي الأرض؛ تخيل أنّ لديك كرة كبيرة من الجيلاتين. إذا أثرت فيها بقوة متساوية من الجهات جميعها، فإنها تبقى كرة. ولكن إذا سحبت بقوة جانبًا أكثر من الآخر، فإنّ الكرة تصبح إهليلجية، بسبب اختلاف القوى (الشكل 14.24).

وهذا هو ما يحدث للكرة الكبيرة التي نعيش عليها؛ يتم سحب الجزء القريب من القمر بقوة أكبر في اتجاه القمر مقارنة بالجانب الآخر. ولهذا، فإنّ الأرض ذات شكل كرويّ تقريبًا. لا يدور القمر بشكل دائرة حول الأرض بالمعنى الحرفي. والأرض تتسارع نحو القمر بسبب وجود قوة عليها؛ حيث توجد محصلة القوى يوجد تسارع. إنّ القوة المؤثرة في الأرض هي التسارع *المركزي*. الأرض، مركز الكتلة لنظام الأرض – القمر (نقطة في الأرض تقع على ثلاثة أرباع المسافة بين المركز والسطح). يتعرض القمر والأرض إلى تسارع *مركزي* عند دورانهما حول بعضهما حول مركز الكتلة في الأرض – القمر.



الشكل 14.24
تبقى كرة الجيلاتين دائرية عند سحب أجزائها كلّها بشكل متساو في الاتجاه نفسه. ولكن عند سحب جانب بقوة أكبر من الجانب الآخر يصبح شكلّها بيضويًّا إهليلجيًّا.

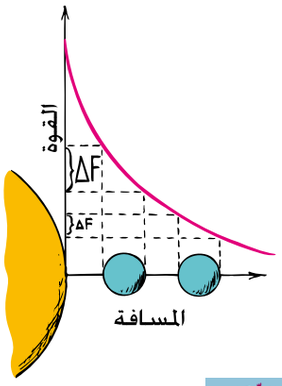


الشكل 15.24
انبعاجان مدّيان وجزريان يظلان ثابتين بالنسبة إلى القمر في أثناء دوران الأرض اليومي حول نفسها.

وهذا ما يجعل الأرض والقمر بيضويين قليلاً. إنّ الشكل البيضويّ للأرض غالبًا ما يوجد في المحيطات حيث تنبعج بالتساوي في جانبين متقابلين.

تدور الأرض حول نفسها مرة في اليوم. لذا، فإنّ نقطة ثابتة على الأرض تعبر أسفل كلا الانبعاجين كلّ يوم. وأيّ جزء من الأرض يمرّ أسفل أحد الانبعاجين يحدث فيه مدٌّ. ويؤدي ذلك إلى تكون مدّين يوميًّا مفصولين بـ 12.5 ساعة تقريبًا. ولكن، لماذا لا يفصل بين المدّين 12 ساعة؟ السبب في هذا هو أنّ الأرض في أثناء دورانها حول نفسها، يدور القمر في مداره حول الأرض. لذا يظهر القمر في سمائنا في الموقع نفسه كلّ 24 ساعة و 50 دقيقة. ومن ثمّ فإنّ المدّ الثّاني يتبع الأول بـ 12 ساعة و25 دقيقة وهكذا. وهذا هو سبب عدم تكون المدّ والجزر في الوقت نفسه كلّ يوم.

تسهم الشّمس أيضًا في مدّ وجزر المحيط. ومع أنّ تأثيرها أقلّ من نصف تأثير القمر في عمل المدّ، إلا أنّ سحبها للأرض يعادل 180 ضعف سحب القمر. لماذا لا تسبب الشّمس مدّ وجزر 180 ضعف المدّ والجزر الذي يفعله القمر؟ إنّ الإجابة تعتمد على كلمة رئيسة، هي: *الاختلاف*. فبسبب بُعد الشّمس الكبير، فإنّ الاختلاف في سحبها الجذبي على جانبي الأرض صغير (الشكل 16.24). كما أنّ نسبة الاختلاف في سحب الشمس للأرض 0.017% تقريبًا مقارنة بـ 6.7% نسبة سحب القمر. إنّ سبب تأثير الشّمس المتواضع على المدّ والجزر في الأرض هو أنّ سحب الشمس يساوي 180 ضعف قوة سحب القمر. ومع ذلك، فإنّ المدّ والجزر بسبب الشّمس لا يكون نصف ارتفاع مدّ وجزر القمر (180 × 0.017% = 3% أي تقريبًا نصف 6.7).



الشّكل 16.24
إسقاط للجاذبية مقابل المسافة. كلما زاد البعد عن الشمس قلت قوة F. والتي تختلف بـ $1/d^2$. وكلما قلت قوى السحب الجذبيّ على كلا الجانبين ΔF والتي تختلف بقدر $1/d^3$ يقلّ المدّ.

ومع ذلك، فإنّ الشّمس ما زالت تقوم بدور في المدّ والجزر المحيطيّ. وعند وجود الشّمس والقمر والأرض على الخطّ نفسه ، يتضافر المدّ والجزر بسبب الشّمس والقمر معًا، حيث يكون لدينا مدّ أكبر من المتوسط وجزر أقلّ من المتوسط؛ إنّه **مدّ الرّبيع (*Spring tide*)** (الشكل 17.24). (مدّ الربيع لا علاقة له بفصل الربيع). يحدث مدّ الربيع عندما يكون القمر محاقًا أو بدرًا.

الشّكل 17.24
يحدث مدّ الربيع عند وجود الشّمس والقمر والأرض على الخطّ نفسه، كما هو الحال في أثناء البدر والمحاق.

وعندما يكون القمر في نصف المسافة بين البدر والمحاق يكون سحب القمر والشّمس متعامدين. لذا، فإنّ مدّا الشّمس والقمر لا يجتمعان. وفي هذه الحالة، لا يكون المدّ عاليًا، ولا الجزر منخفضًا. وهذا ما يسمى **المدّ المحاقيّ *(Neap tide)*** (الشكل 18.24).

الشّكل 18.24
يحدث المدّ المحاقيّ عندما يكون الشّمس والقمر متعامدين (وقت تربيع أول وثان).

وفي وسط المحيط، يكون الاختلاف في مستوى الماء – مدى المدّ والجزر – أقلّ من متر. أما على الشاطئ، فيختلف المدى، حيث يكون كبيرًا في خلجان ألاسكا الطويلة، ويلاحظ أيضا في حوض خليج فندي بين برنسويك ونوفاسكوتيا في شرق كندا حيث يكون الاختلاف في المدّ أحيانًا 15 م (الشكل 19.24).

الشّكل 19.24
المد والجزر في منطقة نوفا سكوتيا.

والسبب في ذلك هو أنّ شكل قاع المحيط يصبح قمعيًّا في اتجاه الشاطئ ؛ حرف V.
يكون المدّ أسرع من جريان الشخص غالبًا. لذا، لا تبحث عن المحار قرب الشاطئ في وقت الجزر في خليج فندي.

لمعلوماتك

■ هل تعلم لِمَ لا نرى إلا وجهًا واحدًا للقمر فقط؟ السبب هو المدّ والجزر. للقمر انبعاجا مدّ. وللسبب نفسه، هناك انبعاجان للمدّ على الأرض، قريبًا وبعيدًا عن جوانب كلّ جسم يتم سحبها بشكل مختلف. إلا أنّ انبعاجَيْ المد في القمر لا يرتفعان ولا ينخفضان لأنهما ثابتان، وهذا ما يجعل شكل القمر بيضويًّا. الشكل البيضوي للقمر يجعل مركز الجذب مزاحًا من مركز الكتلة. لذا، فعندما يكون المحور الطويل للقمر غير مواجه للأرض فإنّ الأرض تؤثر بقوة دوران صغيرة فيه. مما يجعل القمر ينحرف بحيث يتجه مع المجال الجاذبي للأرض كقوة الدوران التي توجه إبرة البوصلة مع المجال المغناطيسي. لذا، فيما أنّ القمر يأخذ 27.3 يومًا لإكمال دورة حول محوره (وكذلك حول محور الأرض – القمر) فإنّ وجه القمر نفسه يواجه الأرض في الأوقات جميعها. ولهذا نرى وجه القمر نفسه دائمًا.

■ **نقطة فحص**

نعلم أنّ الشمس والقمر يكوّنان مدّ المحيط. كما نعلم أنّ القمر يقوم بالدور الأكبر لأنه الأقرب. هل قرب القمر يعني أنه يجذب محيطات الأرض بقوى جذب أكثر من جذب الشّمس؟

هل كانت هذه إجابتك؟

لا؛ لأنّ قوة جذب الشّمس أقوى. إنّ الفرق في عامل المسافة هو السبب الرئيس في قوى المدّ: فإذا كان القمر أقرب إلى الأرض، فإنّ المدّ والجزر على الأرض والقمر سوف يزداد. أما إذا كان قريبًا جدًا، فإنّ ذلك يؤدي إلى تمزيق القمر إلى قطع. وهذا هو السبب المحتمل وراء وجود حلقات حزام كوكب زحل والكواكب الأخرى.

■ 4.24 مكونات الغلاف الجوي للأرض

لو لم تكن الجاذبية موجودة لأفلتت جزيئات غاز الغلاف الجوي إلى الفضاء الخارجي. إنّ الغازات قابلة للانضغاط، وهذا ما يسمح لقوة الجاذبية الخفيّة بضغط عدد كبير من جزيئات الغاز بالقرب من سطح الأرض وإمساكها (حيث الجاذبية أقوى). لذا فإنّ كثافة جزيئات الهواء عالية بالقرب من سطح الأرض، ولكنها تقلّ تدريجيًّا مع الارتفاع.

ولأنّ للهواء وزنًا، فإنه يكوّن ضغطًا على سطح الأرض، يسمى *الضغط الجوي* أو *ضغط الهواء*. كلما زاد الوزن زاد الضغط. ومثل كثافة الغلاف الجوي، فإنّ ضغط الهواء يقلّ بازدياد الارتفاع عن سطح الأرض. وكلما صعدت إلى الأعلى أكثر قلّ ضغط الهواء. إنّ وزن الهواء على سطح الماء يحفظ الماء من الإفلات بعيدًا بسبب الغليان. ولعلك تذكر من الفصل السابع أنّ الماء يغلي عند درجة صفر سيليزية عندما لا يوجد ضغط هواء عليه. ولهذا فإنّ كلًّا من السّمك والطّيور تقدّر وجود الغلاف الجوي.

* نقاشنا للمدّ والجزر مُبَسّط هنا؛ لأنه فعليًّا معقد. إنّ التفاعل مع اليابسة والاحتكاك مع قاع المحيط يجعل حركة المدّ معقدة، في عدة أماكن، يتكسر المدّ إلى أحواض دورانية صغيرة حيث يتحرّك الانبعاج كموجة دائرية. وتتحرك هذه الأمواج حول الأرض كما لو أنها في حوض مائي صغير ملتوٍ. لذا، فإنّ المدّ قد يكون على بعد ساعات من مواجهة القمر .

الجدول 2.24 مكوّنات الغلاف الجوّيّ

الغازات الدائمة			الغازات المتغيرة		
الغاز	الرمز	النسبة من الحجم	الغاز	الرمز	النسبة من الحجم
نيتروجين	N_2	78%	بخار الماء	H_2O	4 – 0
أكسجين	O_2	21%	ثاني أكسيد الكربون	CO_2	0.038**
أرجون	Ar	9.0%	أوزون	O_3	0.000004*
نيون	Ne	0.0018%	أول أكسيد الكربون	O	0.00002*
هليوم	He	0.0005%	ثاني أكسيد الكبريت	SO_2	0.000001*
ميثان	CH_4	0.0001%	ثاني أكسيد النيتروجين	NO_2	0.000001*
هيدروجين	H_2	0.00005%	دقائق (غبار، لقاح)		0.00001*

* معدل القيمة في الهواء الملوث.

** يزداد معدل ثاني أكسيد الكربون في الجوّ كما سنرى لاحقًا في هذا الفصل والفصل الخامس والعشرين.

لمعلوماتك

■ تنفث الثّورانات البركانيّة كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك فهي مكوّن ثانوي في الغلاف الجويّ؛ لأنّ معظم ثاني أكسيد الكربون يُمتصّ من المحيط حيث يذوب وينتهي على شكل كربونات كالسيوم.

يوضح الجدول 2.24 الغلاف الجوي للأرض بوصفه خليطًا من غازات منوعة. وخصوصًا النيتروجين والأكسجين. ونسبة قليلة من بخار الماء. والأرجون. وثاني أكسيد الكربون. وكميات نادرة من عناصر ومركبات أخرى.

التركيب العمودي للغلاف الجوّيّ

عندما تتسلق الجبال فإنك تلاحظ أنّ الهواء يصبح أبرد وأقلّ سمكًا مع زيادة الارتفاع. وعلى سطح البحر. يكون الهواء دافئًا عمومًا وذا كثافة عالية. إنّ الكثافة العالية بالقرب من سطح الأرض ناجمة عن الجاذبية. وكثافة الهواء ككثافة كومة ريش: عالية في القاع وقليلة في الأعلى. تقع أكثر من نصف كتلة الغلاف الجوي على ارتفاع أقلّ من 5.6 كم. أي ما يعادل 99% من كتلة الغلاف الجوي تحت ارتفاع 30 كم. ولكن بخلاف كومة الرّيش. فإنّ الغلاف الجويّ ليس له حدّ علويّ ميز. فهو يتلاشى تدريجيًّا نحو الفضاء الفارغ.

يقسم الغلاف الجوي إلى طبقات. لكلّ منها خصائص ميزة (الشكل 20.24) وهي: الطبقة الدنيا التي تعرف **بالتروبوسفير (*troposphere*)** أو **الغلاف المناخيّ**. حيث يوجد الطقس. يمتد التروبوسفير إلى ارتفاع 16 كم فوق خط الاستواء. و8 كم فوق القطبين. وعلى الرغم من أنّه الطّبقة الأقلّ سمكًا. إلا أنه يحوي 90% من كتلة الغلاف الجوي. وبخار الماء كلّه تقريبًا. والغيوم.

تصوّر العلوم الطّبيعيّة

■ **كثيف كالهواء**

إذا علمنا أنّ كثافة الهواء (1.25 كجم/ م^3). فيمكننا حساب كتلة الهواء مباشرة . لأيّ حجم . اضرب كثافة الهواء في الحجم فقط. إنّ حجم غرفة متوسطة يقدّر بـ 4 م × 4 م × 3 م = 48 م^3. إذن. كتلة الهواء في هذه الغرفة

1.25 كم/م^3 × 48 م^3 = 60 كغم.

إذا كنت فضوليًّا. وتريد معرفة الوزن بالباوند. فإنك تضرب في عامل التحويل 2.2 باوند/ كجم.

60.0 ~~كجم~~ × 2.2 باوند/ ~~كجم~~ = 132 باوند.

ولأننا نعرف كثافة الهواء (1.25 كجم/ م^3) فإنّ حساب كتلة هواء أمر مباشر لأي حجم.

مسألة:

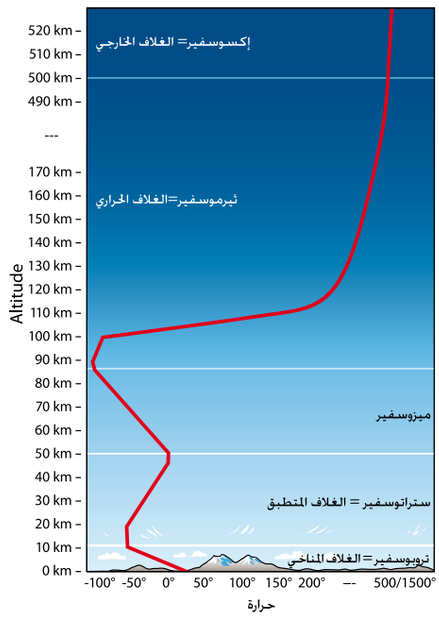
ما الكتلة بالكيلوجرام لهواء غرفة صفية حجمها 796 م^3؟

الحلّ:

لكلّ متر مكعب من الهواء كتلة 1.25 كجم لذا:

796 ~~م^3~~ × 1.25 كجم/~~م^3~~ = 995 كجم.

وهو وزن 17 طالبًا مجتمعين بوزن 60 كجم لكلّ منهم.



الشّكل 20.24
طبقات الغلاف الجوي. يختلف متوسط حرارة الغلاف الجوي بشكل متذبذب مع الارتفاع.

تقلّ الحرارة في الغلاف المناخيّ بشكل منتظم (تقريبًا 6.5°س/ كم) مع زيادة الارتفاع. ويكون متوسط الحرارة - 50°س على قمة التروبوسفير.

يقع **الغلاف المتطبق (*stratosphere*) (الستراتوسفير)** فوق الغلاف المناخيّ الذي يصل إلى ارتفاع 50 كم فوق سطح الأرض. تتكون جزيئات الأوزون في الغلاف المتطبق، وتُمتص الأشعة فوق البنفسجية من الشّمس. يسبب امتصاص الأشعة فوق البنفسجية من طبقة الأوزون ارتفاع درجة الحرارة من 50°س في أسفلها إلى صفر درجة سيليزية في قمتها.

أما طبقة **الميزوسفير (*mesosphere*)** فتوجد فوق الستراتوسفير، وهي تمتد حتى ارتفاع 80 كم تقريبًا. إنّ الغازات المكونة للميزوسفير تمتصّ كمية قليلة من أشعة الشّمس، ونتيجة لذلك، تقلّ الحرارة مرة أخرى من صفر °س في القاع إلى - 90°س في القمة.

إلا أنّ الوضع معكوس في الطبقة التي فوق الميزوسفير، أي **الغلاف الحراري (الثيرموسفير) (*thermosphere*)**. حيث تزداد الحرارة فيها عمومًا مع الارتفاع. وتحوي هذه الطبقة كمية قليلة من الهواء الذي يمتصّ أشعة الشّمس. ولهذا، فإنّ الحرارة مرتفعة، حيث تتراوح بين 500 – 1500°س اعتمادًا على النشاط الشّمسيّ. وبسبب انخفاض كثافة الهواء، فإنّ هذه الحرارة المرتفعة ذات أهمية قليلة. إذا زرت الغلاف الحراري، فستلاحظ أنّه حارّ جدًّا.

أما **الغلاف المتأين (الأيونوسفير) (*ionsphere*)** فهي منطقة غنية بالأيونات من الغلاف الحراري والجزء العلوي من غلاف الميزوسفير. يتم تكوين الأيونات عن طريق التفاعل بين الأشعة الشّمسيّة العالية التردد مع ذرات الغازات في الغلاف الجوي. تعمل الأشعة الشّمسيّة القادمة على تعرية الإلكترونات في ذرات النيتروجين والأكسجين مكوّنة تركيزًا عاليًا من إلكترونات حرّة، وأيونات موجبة في هذه الطبقة. تعتمد درجة التّأيّن في الغلاف المتأيّن على كثافة الهواء، وكمية الأشعة الشّمسيّة. ويكون التّأيّن أكبر ما يمكن في الجزء العلويّ من الغلاف المتأيّن حيث كثافة الهواء قليلة والأشعة الشّمسيّة عالية.

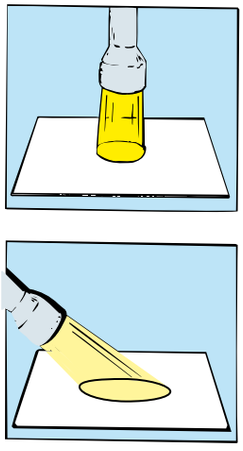
تلقي الأيونات في الغلاف المتأيّن بوهج باهت. لذا تكون الليالي التي لا يوجد فيها قمرٌ سوداء قاتمة. ولكن بالقرب من الأقطاب المغناطيسية للأرض، يوجد ضوء ناريّ يسمى *الشّفق القطبيّ*، ويحدث هذا الشفق عندما تضرب الرّياح الشّمسيّة (أنوية عالية الشحنة تطلق من الشّمس) جزيئات مثارة من غازات الغلاف المتأيّن (الشكل 21.24). تكون عروض الشّفق القطبي أخّاذة في فترات النشاط الشّمسيّ: عواصف وانبعاثات غازات حارة على سطح الشّمس.

وأخيرًا فوق ارتفاع 500 كم، في **الغلاف الخارجي (الإكسوسفير) (*Exosphere*)**، نجد أنّ الغلاف الجويّ الضعيف ينتهي تدريجيًّا إلى حزم أشعة ومجالات مغناطيسية في الفضاء بين الكواكب.

الشّكل 21.24
تحدث إضاءات الشفق القطبي فوق ألاسكا نتيجة ضرب أنوية شمسية مشحونة للجزء العلوي من الغلاف الجوي فتضاء السماء (تمامًا كما تعمل نوى مماثلة في مصباح على إضاءته)

5.24 الطّاقة الشّمسيّة

لماذا تعدّ مناطق الأرض الاستوائية أكثر دفئًا من المناطق القطبية؟ لأنّ درجات حرارة سطح الأرض تعتمد على كمية الطاقة التي يستقبلها كلّ جزء من الأرض من أشعة الشّمس يوميًّا. وتعتمد هذه الكمية على الزاوية التي تسقط فيها أشعة الشّمس على الأرض. ويمكن تمثيل الزوايا المختلفة التي تسقط فيها أشعة الشّمس على سطح الأرض عن طريق حمل مصباح عموديًّا فوق طاولة. وإضاءته مباشرة نحو الأسفل. وعموديًّا على السّطح (الشكل 22.24 أ). يولد الضّوء دائرة مضيئة. الآن. اجعل المصدر يضيء بزوايا مختلفة. ستلاحظ أنّ الدائرة تصبح بيضوية. لذا تتوزع كمية الطّاقة نفسها فوق مساحة أكبر. فتقلّ شدّة الإضاءة. وهذا ما يحدث بالنسبة إلى ضوء الشّمس على سطح الأرض: فوقت الظهر عند خط الاستواء هو كحمل المصباح عموديًّا على السطح. وقت الظهر من خطوط العرض العالية مثل حمل المصباح بزاوية.

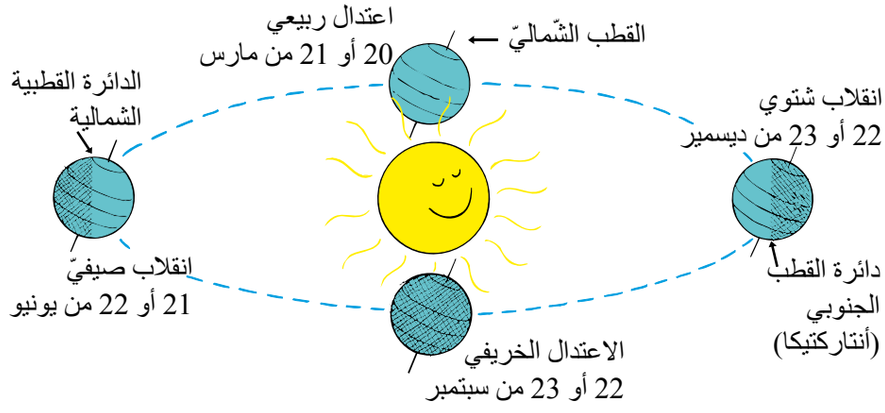


الشّكل 22.24
(أ) عندما يكون المصباح محمولاً فوق السطح مباشرة بزاوية عمودية، فإنّ شعاع الضّوء يكون على شكل دائرة مضيئة. (ب) عند سقوط الضّوء بزاوية فإنّ الشّعاع يتوزع على مساحة أكبر فتقلّ الشّدّة.

الفصول

إنّ فصلي الصّيف والشّتاء في الولايات المتحدة الأمريكية وكندا ميز أحدهما من الآخر. والسّبب في هذا هو أنّ زاوية سقوط أشعة الشّمس على هاتين المنطقتين تختلف خلال السّنة. يوضح الشكل 23.24 كيف أنّ ميلان الأرض (ميل محور الأرض) يسبب اختلافًا في زاوية سقوط الأشعة. هل ترى أنّ الأشعّة تكون عموديّة أكثر على سطح مناطق النّصف الشّماليّ من الأرض عندما يكون محور الأرض مائلاً *في اتجاه* الشّمس؟ عندما تكون أشعة الشمس قريبة من الاتجاه العمودي على أيّ بقعة من الأرض. يكون الفصل صيفًا. ولكن بعد ستة أشهر تسقط الأشعة على المنطقة بشكل مائل فيكون الفصل شتاءً. وبينهما فصلا الرّبيع والخريف.

ومن المثير معرفة أنه بسبب مدار الأرض الإهليلجي حول الشّمس. فإنّ الأرض تكون بعيدة عنها عندما يكون النّصف الشّماليّ صيفًا. إنّ الذي يحدّد درجات الحرارة السّطحية للأرض هو زاوية سقوط أشعة الشّمس وليس المسافة عنها. وهناك تأثير آخر للأشعة المائلة هو طول النهار يوميًّا. هل تستطيع أن ترى في الشكل 23.24 أنّ الموقع في الصّيف له طول نهار يوميّ أكبر من الموقع نفسه عندما تكون الأرض في الجهة المقابلة في الشّتاء. إذا كان عندك مشكلة في رؤية ذلك فانظر إلى خطوط العرض العالية بالقرب من القطبين. اعتمد على خط العرض الخاص الذي يستمرّ فيه النّهار 24 ساعة خلال الانقلاب الصّيفيّ (21 من يونيو) ويستمر الليل 24 ساعة في أثناء الانقلاب الشّتويّ (21 من ديسمبر). يسمّى خطّ العرض هذا الدائرةَ القطبيّة الشّماليّة في نصف الكرة الشّماليّ. في حين يسمّى الدائرةَ القطبيّة الجنوبيّة في نصف الكرة الجنوبيّ.



الشّكل 23.24
ميلان الأرض وما ينتج عنه من اختلاف توزع أشعة الشّمس، تولّد الدورة السّنويّة للفصول.

في أثناء الانقلاب الصّيفيّ، يميل القطب الشّماليّ نحو الشّمس، ويميل القطب الجنوبيّ بعيدًا عنها. (الصّيف والشّتاء متعاكسان في نصفي الكرة الأرضيّة). وفي منتصف الطّريق بين الانقلابين الصّيفي والشّتويّ في وسطي سبتمبر ومارس، تكون ساعات النّهار والليل متساوية، وعندئذ يسمى الاعتدالين. لا ينحصر تساوي ساعات النّهار والليل في الاعتدالين في خطوط العرض العالية، بل هو موجود في أنحاء العالم كلّه.

لمعلوماتك

■ مع الانتقال شمال دائرة القطب الشّماليّ أو جنوب دائرة القطب الجنوبيّ، توجد أيام صيف أكثر عندما تكون الشّمس فوق الأفق، وأيام شتاء أكثر عندما تكون الشّمس أسفل الأفق. أما عند القطبين، فيتكون الليل من ستة أشهر، يتبعه نهار من ستة أشهر أيضًا. ولا تكون الأيام التي نهارها 24 ساعة مضيئة جدًا؛ لأنّ الشّمس لا تذهب بعيدًا عن الأفق. كما أنّ الأيام التي يكون ليلها 24 ساعة، لا تكون مظلمة؛ لأنّ الشّمس لا تغوص بعيدة عن الأفق.

■ **نقطة فحص**

1. لماذا تكون ساعات النهار أقلّ في أشهر الشّتاء؟
2. قال صديق: ”ميلان محور دوران الأرض حول نفسها وليس البعد عن الشّمس هو السبب في تكوّن فصول الأرض“ هل هذا الادعاء صحيح؟ اشرح.

هل كانت هذه إجابتك؟

1. يميل محور دوران الأرض حول نفسه كقمة تميل في اتجاه واحد في الأوقات جميعها. ومع دوران الأرض حول الشّمس، فإنّ النّصف الشّماليّ يميل نحو الشّمس في الصّيف، وبعيدًا عنها في الشّتاء. ولكن عندما يميل نصف الكرة مبتعدًا فإنّ الشّمس تكون أقرب إلى الأفقي. وعليه، فإنّ الشّمس تشرق متأخرة وتغرب مبكرة، مما يؤدي إلى قصر طول النّهار.
2. أوافق؛ لأنّ ميل المحور يؤثر في الزاوية التي تسقط فيها أشعة الشّمس على موقع. عندما يكون الموقع في فصل الشّتاء، تكون زاوية سقوط الأشعة بعيدة عن العمودي. أمّا في الصّيف فتسقط الأشعة شبه عمودية على المكان.

الأشعة الأرضيّة

تغطي الأشعّة الشّمسيّة طيفًا واسعًا من الأطوال الموجيّة، معظمها في الطول الموجيّ القصير المرئيّ. تمتصّ الأرض بعض هذه الطّاقة، ثم تشع جزءًا منها إلى الفضاء. وكما تعلمنا في الفصل السابع، فإنّ هذه هي الأشعة الأرضيّة التي تنبعث من سطح الأرض (الشكل 24.24). تنبعث الأشعة الأرضيّة في جزء الأشعة الطويلة تحت الحمراء من الطيف.

تعمل الأشعة الأرضيّة على تدفئة الغلاف الجويّ السّفليّ (وليس الأشعة الشّمسيّة التي تفسر سبب ارتفاع حرارة الهواء القريب من الأرض مقارنة بالهواء على ارتفاعات عالية). تعتمد حرارة سطح الأرض على كمية الأشعة الشّمسيّة الواصلة مقارنة بالأشعة المنبعثة من الأرض. في حالة الأشعة الشّمسيّة المباشرة، فإنّ المحصّلة هي ارتفاع الحرارة؛ لأنّ سطح الأرض يمتصّ طاقة أكثر من الطّاقة التي يشعّها. وفي الليل، تكون المحصّلة انخفاضًا في حرارة سطح الأرض؛ لأنّ السّطح يشعّ طاقة أكثر مما يمتصّ. تعمل الغيوم على حجز الأشعة الصادرة والقادمة. لذا، فإنّ الأنهر الصّافية تكون أكثر دفئًا من الأنهر ذات الغيوم، كما أنّ الليالي ذات الغيوم تكون أكثر دفئًا من الليالي الصّافية.

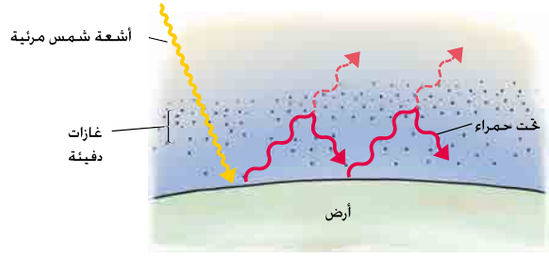
لمعلوماتك

■ الظروف التي تساعد على تكوّن الألوان الجميلة في الخريف هي أنّ النهار مشمس ودافئ، يليه ليل بارد بحرارة أقل من 7°س. تؤدي هذه الظروف إلى إيقاف إنتاج الكلوروفيل مما يسمح للألوان الأخرى للورقة بالظهور.

تأثير الدّفيئة والاحترار العالميّ

تخترق أشعة الشمس القصيرة الغلاف الجوي بسهولة، وتسقط على الأرض لترفع حرارته. يعمل السّطح المدفّأ على إشعاع طاقة ذات طول موجيّ كبير (أشعة أرضيّة). لا تخترق الأشعة الأرضية جميعها الغلاف الجوي، مثل البيت الزّجاجيّ حيث تعمل الغازات (غالبًا بخار الماء وثاني أكسيد الكربون) على حجز الأشعة الأرضية الطويلة فتسخن الغلاف الجويّ السّفليّ. تسمّى عملية تدفئة الغلاف الجويّ السّفليّ **ظاهرة الدّفيئة *(greenhouse effect)***. يعمل الغلاف الجوي كالغطاء العازل بحيث يبقى سطح الأرض دافئًا مقارنة بعدم وجود غلاف جويّ.

الشّكل 24.24
تبعث الشّمس الساخنة أمواجًا قصيرة مرئية، وتشع الأرض الباردة أمواجًا تحت حمراء طويلة. تسمى *الأشعة المنبعثة* من الأرض الأشعةَ الأرضية. لا تعود الأشعة الأرضية جميعها إلى الفضاء، بل إنّ بعضها يحجز بالغازات الدفيئة. فهي كالغطاء الذي يدفئ الغلاف الجوي السفليّ.



لا تعدّ ظاهرة الدفيئة مؤذية في نفسها. وفي الواقع، فإنها ضرورية للحياة على سطح الأرض. وإن لم توجد مثل هذه الظاهرة، فإنّ سطح الأرض سيتجمد عند متوسط حرارة -18°س. وكما في الغلاف الجويّ للأرض، فإنّ مصدر غازات الدفيئة هو ثوران البراكين. ومن غازات الدفيئة، أن الغاز الذي يقوم بدور أكبر في حجز طاقة الأرض هو بخار الماء. وكجزء من دورة الماء على الأرض، فإنّ مستويات بخار الماء بقيت ثابتة نسبيّا. ومتوافرة في الأوقات جميعها. كما أنّ تركيز غازات الدفيئة الأخرى بقيت ثابتة منذ 100000 سنة حتى ظهور الحضارة البشريّة قبل 10000 سنة.

لو لم توجد في كوكب الأرض ظاهرة الدفيئة لكان متوسط الحرارة -18° س.

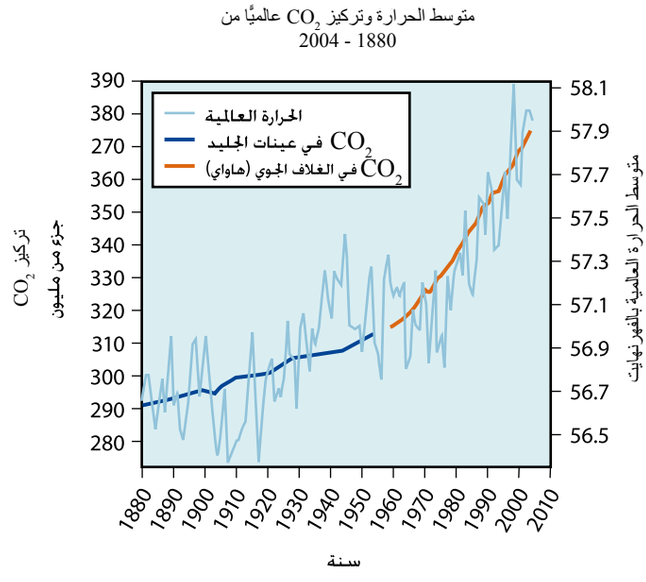
إنّ الذي يشغل بال العلماء هو زيادة تركيز غازات الدفيئة سوى بخار الماء. كما أنّ الغازات كثاني أكسيد الكربون (CO_2)، والميثان (CH_4)، وأكسيد النيتروجين (N_2O)، والأوزون (O_3) ومركبات كلوروفلوروكربون (CFC´s) في زيادة بسبب أنشطة الإنسان. تساعد هذه الغازات في تأثير ظاهرة الدفيئة. ومع زيادة تركيزها، تزداد قابلية الغلاف الجويّ على امتصاص الطّاقة الحراريّة الأرضيّة وحجزها.

حدثت التّغيرات المناخيّة خلال الزّمن الجيولوجيّ، ولكن الاهتمام الحالي هو أنّ زيادة تركيز CO_2 وغازات الدفيئة الأخرى يجعل الأرض حارّة، مما يؤدي إلى تغيّرات سريعة في أنظمة الأرض، حيث يكون أثرها سلبيًّا في الإنسان. فمنذ الثورة الصناعية في القرن التاسع عشر مثلاً، وتركيز CO_2 في تزايد (الشكل 25.24). إنّ زيادة تركيز CO_2 هي المسؤولة عن زيادة حرارة سطح الأرض 0.7° س منذ نهاية ذاك القرن. وقد انصهر العديد من جبال الجليد والجليديات، في حين اختفى بعضها. ويعتقد العلماء أنّ تسخينًا أكثر سيحدث إن لم يتم إيقاف انبعاث CO_2.

إن تأثيرات تسخين سطح الأرض غير معروفة كليًّا؛ أحد الأمور هو أنّ التّسخين سيؤدي بالجليديات في القطبين وجرينلاند إلى الانصهار. وسيؤدي ذلك إلى ارتفاع مستوى البحر، مما يعني فيضانات في المناطق المنخفضة نسبيًّا على الشواطئ. كما سيؤدي التّسخين إلى تغيّر أنماط الهطل، ومن ثم التأثير في الزراعة. وقد يحدث أنّ المناطق التي تنمو فيها الحبوب في أمريكا وآسيا تتحرك شمالاً؛ لأنّ المناخ تزداد حرارته والفصول يزداد طولها. وفي المقابل، فإنّ الصحاري في وسط القارات قد تمتد إلى مساحات أكبر؛ إننا لا نعرف. ولكننا نعرف أنّ الأرض تعرضت لفترات دافئة وباردة في الماضي، وأنّ المناخ العالميّ يتغيّر. وقد يسهم في العديد من الأمور التي تناولناها في الفصل الحادي والعشرين. والأبحاث الحالية تركز على فهم أثر الاحترار العالمي.

لمعلوماتك

■ يتم قياس درجات الحرارة القديمة عن طريق قياس النسبة بين الهيدروجين ونظيره الأثقل الديتيريوم في عينات جليد القطبين. عندما تكون درجات الحرارة العالمية عالية، فإنّ المحيط يكون أدفأ، وأنّ نسبة عالية من المياه التي تحتوي على الديتيريوم تتبخر من المحيط وتسقط على شكل ثلج. يتم حفظ نسبة ديتيريوم عالية مقارنة بالهيدروجين في عينات الجليد، لذا فإنّها تشير إلى مناخ دافئ.



الشكل 25.24
منذ الثورة الصناعية في 1880م، زادت نسبة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وزادت الحرارة. هل تظن وجود علاقة ما؟

■ **نقطة فحص**

1. ماذا يعني قولنا: ظاهرةُ الدّفيئة صمّامٌ ذو اتجاه واحد؟
2. أيّ غازات الغلاف الجوي يساهم أكثر في تأثير ظاهرة الدّفيئة؟
3. ما المساهم الرّئيس الطّبيعيّ في الغازات المسببة لظاهرة الدّفيئة في غلاف الأرض؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. تمرّر المادة الشّفافة – الغلاف الجويّ للأرض والزجاج للبيت الزجاجي – الأمواج القصيرة القادمة فقط. في حين تحجز الأمواج الطويلة الخارجة. وبعبارة أخرى، فإنّ الإشعاع ينتقل في اتجاه واحد.
2. بخار الماء.
3. الثورانات البركانية. في عام 1991م، قام بركان بيناتوبو بنفث كلور في الغلاف الجوي أكثر من التّسرّب لمركبات CFC´s خلال قرن.

■ 6.24 القوى المسبّبة لحركة الهواء

إنّ القوة المسببة لحركة الهواء هي التّسخين غير المتساوي لسطح الأرض عن طريق الشّمس. ويقال عادة: "الهواء الساخن يصعد". لماذا يحدث ذلك؟ الجواب على ذلك أنّ الهواء السّاخن أقل كثافة من الهواء البارد. وكما تعلمنا في الفصل الخامس، فإنّ السّائل الأقلّ كثافة يصعد إلى الأعلى عند إحاطته بسائل أعلى كثافة. وهو سبب ارتفاع البالونات المملوءة بالهواء السّاخن نحو الأعلى؛ يتم تسخين الهواء الداخليّ بحيث يصبح أقل كثافة من الهواء المحيط.

ولكن لماذا يكون الهواء السّاخن أقل كثافة من الهواءالبارد؟ جزيئات الهواء في عينة هواء* يصطدم بعضها ببعض بشكل ثابت ويرتد بعضها عن بعض. وعند نقصان درجة الحرارة فإنّ الجزيئات تتحرك ببطء، وتكون المسافة التي تحركها بعد كلّ ارتداد قليلة. ولكن عند تسخين عينة الهواء، فإنّ الجزيئات تتحرك أسرع، وترتد إلى مسافة أكبر بعد التصادم. وعليه، فإنّ الهواء السّاخن يحتاج إلى مساحة أكبر؛ حجم أكبر. وبسبب عدم تغيّر كتلة عينة الهواء، فإنّ الكثافة تقلّ عندما يزداد الحجم. ولتصور ذلك؛ تخيّل أنّ عينة الهواء محاطة بوعاء رقيق قابل للتمدد. تحتاج جزيئات الهواء إلى عمل جهد لإرغام العينة على التّمدد؛ أي لأخذ طاقة حرارية (الفصل 6). ولأنّ عينة الهواء تفقد الطاقة الحرارية، فإنها تبرد عند تمددها. وبحسب قانون بويل (الفصل 5)، يمكن لعينة الهواء أن تتمدد إذا قلّ الضغط حولها. يقل الضغط مع الارتفاع. لذا، فإنّ الهواء المرتفع يتمدد ويبرد. تستمر عينة الهواء في الارتفاع حتى تصبح بحرارة الهواء المحيط نفسه وكثافته. وبالعكس، فإنّ الهواء النازل يسخن؛ لأنّ البيئة تؤثر بجهد في عينة هذا الهواء (الفصل 6). يتمّ تحويل الطّاقة المتصة من البيئة إلى عينة الهواء. وتزداد حرارة عينة الهواء بسبب ارتفاع الطاقة الحرارية الداخلية لها. وللسبب نفسه، يسخن منفاخ الدراجات عند استخدامه لنفخ العجلات؛ لأنّ هناك جهدًا على الهواء داخله.

علاقة الضّغط والحرارة

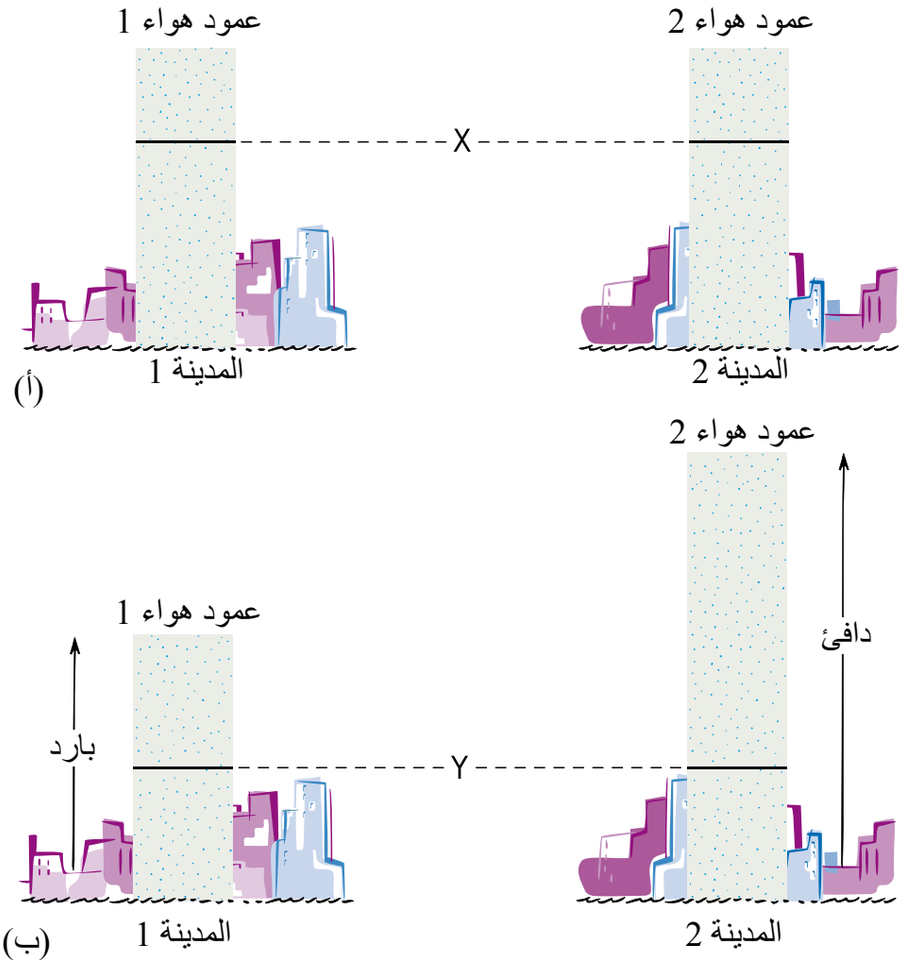
عند تسخين عينة هواء ترتفع نحو الأعلى. فينزل هواء بارد أعلى كثافة من ارتفاعات عالية ليحلّ مكان الهواء السّاخن. ولأنّ عينة الهواء السّاخنة المرتفعة تبرد، فإنها تنزل نحو الأسفل أخيرا لتحلّ مكان هواء ساخن صاعد إلى الأعلى. تكوّن هذه الحركة تيارات الحمل، والدوران الحراريّ للهواء؛ وبعبارة أخرى *تيارات حمل*. ومع خلط تيارات الحمل للغلاف الجوي، تتكون *رياح* تعرف بأنها هواء بحركة أفقية. تتولد الرياح استجابة لاختلاف الضغط في الغلاف الجوي الناتج عن اختلاف الحرارة. يسمى اختلاف الضّغط بين منطقتين **تحدّر الضّغط** (*pressure-gradient force*). أمّا القوة التي تسبب حركة الهواء فتسمّى **قوّة تحدّر الضّغط**. تعمل قوة تحدّر الضّغط على تحريك الهواء من مناطق الضغط المرتفع إلى مناطق الضّغط المنخفض.

* افترض أنّ عينة الهواء وعاء من الهواء يستطيع التّمدد والتّقلص، ولكنه لا يختلط بالهواء المحيط.

ولمعرفة كيفية تأثير الحرارة في الضّغط: افترض وجود عمودَيْ هواء متساويين في الشكل 26.24 أ. عمودا الهواء متساويان لأنهما يحويان العدد نفسه من جزيئات الهواء، والتي تتوزع بدورها بالتساوي. ولتصور ذلك: فإننا سنفترض ما يلي للتسهيل: 1- لا يوجد اختلاف في كثافة الهواء مع الارتفاع في العمود (قد تتغير كثافة الهواء داخله). 2- لا يستطيع الهواء أن يدخل أو يترك أيًّا من الأعمدة (بما أنّ الكتلة ثابتة، فإنّ الضغط الجوي على السطح لا يتغير). 3- عرض كلّ عمود يبقى ثابتًا. لذا، فإنّ كلّ عمود يحوي كمية ثابتة من الهواء بكثافة متساوية والذي يمكن أن يتحرك إلى الأعلى وإلى الأسفل فقط.

عندما تكون درجة حرارة المدن هي نفسها، يكون ارتفاع الأعمدة هو نفسه، كما في الشكل 26.24 أ. على أيّ ارتفاع – مثلًا الارتفاع ذو العلامة × في الرسم – يكون الضغط الجويّ في كلّ عمود هو نفسه؛ لأنّ عدد الجزيئات من الهواء فوق × هو نفسه في العمودين. وهذا صحيح لكلّ ارتفاع. ولهذا، لا يوجد اختلاف في الضغط بين المدينتين على أيّ ارتفاع بسبب عدم وجود اختلاف في درجة الحرارة.

الآن، افترض أنّ الحرارة في المدينة 1 انخفضت، في حين ارتفعت في المدينة 2. في هذه الحالة نحصل على الوضع الموضّح في الشكل 26.24 ب. ينكمش الهواء البارد فوق المدينة 1 ويصبح أكثر كثافة، أما الهواء الدافئ فوق المدينة 2 فيتمدد نحو الأعلى (تذكر أنّ عرض العمود متساوٍ). ويصبح أقلّ كثافة. لازلنا بعدد جزيئات الهواء نفسه فوق كلّ مدينة. ولكن هناك عمودًا باردًا قصيرًا فوق المدينة 1، وعمودًا دافئًا طويلًا فوق المدينة 2. يبقى ضغط الهواء على مستوى الأرض نفسه في المدينتين؛ لأنّ العدد نفسه من جزيئات الهواء يضغط نحو الأسفل عليهما.



الشّكل 26.24
(أ) أعمدة الهواء بالحرارة نفسها فوق المدينتين. لاحظ أنّ ضغط الهواء على أيّ ارتفاع مثل × هو نفسه لكلتا المدينتين.
(ب) عندما تكون المدينة 1 باردة والمدينة 2 دافئة، يكون عمود الهواء في المدينة 2 أطول بسبب التمدد الذي يعني أنه على أيّ ارتفاع فوق المدينة فإنّ الضغط أكبر في العمود الأطول. وهذا يولد تحدّر ضغط، فيتحرك الهواء من المدينة 2 إلى المدينة 1.

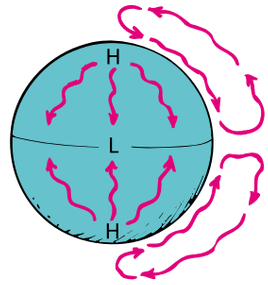
لمعلوماتك

■ بالطبع، كثافة الهواء غير ثابتة في عمود طويل من الغلاف الجوي. ولكن هذا التبسيط يساعد على فهم الترابط بين الحرارة والضغط وأثره في الهواء.

لكن التسخين والتبريد لأعمدة الهواء المعينة يسبب تغيرات في ضغط الهواء العالي*.

الآن، افترض ارتفاع نقطة *y* على منتصف المسافة في العمود 1. ولأنّ *y* تقع في منتصف العمود 1، فإنّ النصف العلويّ من عمود الهواء 1 يحوي نصف عدد جزيئات الهواء (على افتراض تساوي الكثافة مع الارتفاع). إنّ الارتفاع *y* هو أقلّ من نصف المسافة في العمود 2؛ لأنّ العمود 2 أطول. لذا، فإنّ الجزء من العمود 2 فوق ارتفاع *y* يحوي أكثر من نصف جزيئات الهواء في العمود 2. ولأنّ عدد جزيئات أكبر تضغط نحو الأسفل على ارتفاع *y* في العمود 2 مقارنة بالعمود 1 ، فإنّ ضغط الهواء على ارتفاع *y* في العمود 2 أكبر من العمود 1. وبعبارة أخرى، فإنّ اختلاف الحرارة أدى إلى اختلاف ضغط الهواء العالي. لذلك، فإنّ عدد جزيئات الهواء فوق ارتفاع محدد (كتلة الهواء فوقه) يمثل الضغط الجوي على ذلك الارتفاع. وسنتناول الآن حقيقة مهمة، وهي أنّ الهواء الدافئ العالي يكون مصاحبًا لضغط جوي مرتفع، في حين يكون الهواء البارد العالي مصاحبًا لضغط جوي منخفض.

ما علاقة فرق الضغط على ارتفاع كيلومتر أو أكثر بالرياح على سطح الأرض؟ يؤدي فرق الضغط إلى تحرك الهواء، ومن ثم هبوب الرياح. لنسمح الآن للهواء بين مدينتي 1 و 2 بالاختلاط. ولأنّ الهواء يهب من مناطق الضغط المرتفع إلى مناطق الضغط المنخفض، فإنّ الرياح العالية ستهب من المدينة 2 إلى المدينة 1. ومع حركة الهواء العالي من المدينة 2، فإنّ كثافة الهواء في المدينة 2 تقل، ويقل الضغط السطحي. في هذه الأثناء، ومع تراكم الهواء في العمود البارد 1، سيزداد الضغط السطحي في المدينة 1. ولهذا، نجد أنّ الأيام الباردة تكون مصاحبة لضغط سطحي مرتفع، في حين تكون الأيام الدافئة مصاحبة لضغط سطحي منخفض. والآن، ولأنّ الضغط السطحي أكبر في المدينة 1، فإنّ الرياح ستهب من المدينة 1 إلى المدينة 2. مما يغير توزع الضغط مرة أخرى بسبب حركة الهواء من المدينة 1؛ إنه نظام حركيّ فعلا.



الشكل 27.24
إذا كانت الأرض كرة غير دوارة، فإنّ دوران الهواء سيكون في خلية واحدة شمال الاستواء وأخرى جنوبه. وفي كلّ خلية، فإنّ الهواء المسخن عند الاستواء يرتفع ويتجه نحو القطبين، ثم يبرد وينزل متجهًا إلى خطّ الاستواء.

حركة الهواء على نطاق كبير

عالميًّا، تستقبل المناطق الاستوائية أعظم كمية طاقة إشعاعية من الشّمس. ولهذا فإنها ذات أعلى متوسط درجة حرارة في العالم. ومع تسخين الهواء من الأرض الساخنة (أو المحيط) في المناطق الاستوائية، فإنه يرتفع ويتجه نحو القطبين، ويبرد تدريجيًّا في الغلاف الجوي العلويّ. يهبط هذا الهواء البارد نحو الأسفل، ويعود إلى المناطق الدافئة قرب الاستواء. فإذا كانت الأرض غير دوارة، فإنّ هذا التأثير سيكوّن خلية واحدة دوارة في النصف الشّماليّ من الأرض، وخلية دوارة أخرى في النصف الجنوبي، كما هو موضح في الشكل 27.24.

تدور الأرض حول نفسها، مما يؤثر في مسار الهواء المتحرك. تصوّر الأرض كاللعبة الدوارة الكبيرة في مدينة الملاهي التي تدور في عكس اتجاه عقارب الساعة (اتجاه دوران الأرض حول نفسها هو نفسه عند النظر إليها من القطب الشّماليّ). تخيّل أنك تلعب مع صديقك لعبة التقاط الكرة وإمساكها على هذه الدوارة. عند رميك الكرة إلى صديقك، فإنّ الحركة الدوارة للعبة تؤثر في اتجاه رؤية صديقك لحركة الكرة. ومع أنّ الكرة تنتقل بخطّ مستقيم، فإنها تظهر بشكل منحن إلى اليمين، كما في الشكل 28.24.

الشكل 28.24
(أ) في لعبة الدوران الثابتة، تنتقل الكرة التي يتم قذفها بخط مستقيم. (ب) في لعبة دوران تتحرك عكس اتجاه عقارب الساعة تتحرك الكرة في خط مستقيم. ولكن في أثناء الدوران تظهر الكرة أنها تنحرف إلى يمين مسارها.

* الهواء العالي هو تعريف أكثر 1 كم من الهواء العالي فوق سطح الأرض.

(تتحرك الكرة بشكل مستقيم، لكن صديقك لن يمسك بها؛ لأنّ حركة اللعبة الدوارة تؤدي إلى تغيير موقعها). هذا الانحناء الظاهري شبيه لما يحدث في الأرض. ففي أثناء دوران الأرض حول نفسها، فإن الأجسام المتحركة بحرية جميعها؛ الهواء، والماء، وسفن الفضاء والقاذفات، وحتى كرات الثلج المتساقطة – تظهر كأنها تنحرف عن مسارها المستقيم. يسمى هذا الانحراف الناجم عن دوران الأرض حول نفسها **بتأثير كوريولوس*** (*Coriolis effect*).

ومن النتائج المهمة لهذه القوى انحراف الرّياح نحو اليمين في نصف الكرة الشماليّ، ونحو اليسار في نصف الكرة الجنوبيّ (الشكل 29.24). يختلف تأثير قوى كوريولوس تبعًا لسرعة الرياح. فكلما زادت سرعة الرياح يزيد الانحراف. كما يؤثر خط العرض في مقدار هذا الانحراف. يكون الانحراف أكبر ما يمكن على القطبين، في حين يكون صفرًا عند الاستواء. وكما يوضح الشكل 30.24، فإنّ قوى كوريولوس لها أثر مهم في حركة الغلاف الجوي – والطائرات – في الارتفاعات المتوسطة.

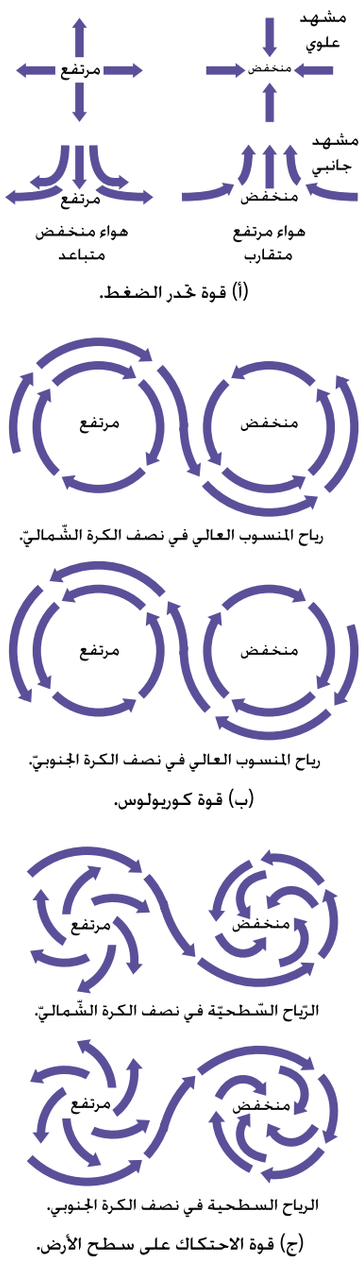
يتعرض الهواء المتحرك بالقرب من سطح الأرض إلى الاحتكاك، وكلما زادت خشونة السّطح زاد الاحتكاك، لذا زاد الانحراف في الرّياح. ولأنّ الاحتكاك السّطحي يقلل من سرعة الرّياح، فإنه يقلل أيضًا من تأثير قوى كوريولوس، مما يؤدي إلى دوران الرياح في نصف الكرة الشماليّ في اتجاه عقارب الساعة من مناطق الضغط المرتفع، ودوران الرياح عكس اتجاه عقارب الساعة إلى مناطق الضغط المنخفض (الجزء العلوي من الشكل 29.24 ج). وفي النصف الجنوبي للكرة الأرضية، ينعكس نسق الدوران (الجزء السفلي من الشكل 29.24 ج).

7.24 أنماط الدوران العالميّ

إنّ أنماط الدوران شبه الخلويّ هي المسؤولة عن إعادة توزيع الحرارة على سطح الأرض، وعن الرياح العالية (الشكل 31.24). يتحرك الهواء المسخن عند خطّ الاستواء نحو الأعلى مع حركة أفقية صغيرة جدًّا مما يسبب تكوُّن منطقة ضغط منخفض على السّطح. تؤدي حركة الارتفاع نحو الأعلى إلى خلق منطقة ضيقة من الهواء ليس فيها رياح، حيث يكون الهواء فيها ساكنًا وساخنًا وراكدًا. كان البحّارة يكرهون بحار الاستواء قديمًا؛ لأنّ سفنهم تطفو دون حركة بسبب عدم وجود الرياح، وسموا هذه المناطق *مناطق الرّكود*. عندما يرتفع الهواء الرطب في هذه المناطق نحو الأعلى، فإنه يبرد ويؤدي إلى زخات مطر تؤدي إلى تكوين الغابات الاستوائية على اليابسة؛ وهذا ما يميز المناطق الاستوائية.

يرتفع الهواء في مناطق الرّكود الحارة إلى الحدّ بين الغلافين المناخي والمتطبق، حيث تنقسم وتنتشر نحو الشمال والجنوب. (نسبيًّا، قليل من الرياح يعبر الاستواء إلى نصف الكرة الآخر). وبسبب قوى كوريولوس، فإنّ الرّياح تنحرف وتنتقل على امتداد مسارات طويلة نحو القطب مقارنة بما لو تحركت بمسارات مستقيمة. وعندما تصل الرّياح خط عرض 30° شمالاً وجنوبًا، فإنها تبرد لدرجة تهبط فيها إلى السطح. ينضغط الهواء النازل بسبب زيادة الضغط عليه مع نقصان الارتفاع. يعمل الضغط على تسخين الهواء وتقليل رطوبته النسبية **. وينتج عن ذلك منطقة ذات ضغط مرتفع مما يولد حزامًا من الهواء الجاف الساخن على السّطح مع قليل من المطر.

على الأرض، تمثل هذه الأنطقة من الضغط المرتفع صحاري العالم الكبيرة – الصحراء الكبرى في إفريقيا، وصحراء الجزيرة العربية في الشرق الأوسط، وصحراء الموجيف في الولايات المتحدة، وصحراء فكتوريا الكبيرة في أستراليا. وفي البحر، يولّد الهواء الحارّ النازل رياحًا ضعيفة جدًّا. وتبعًا للأسطورة فإن

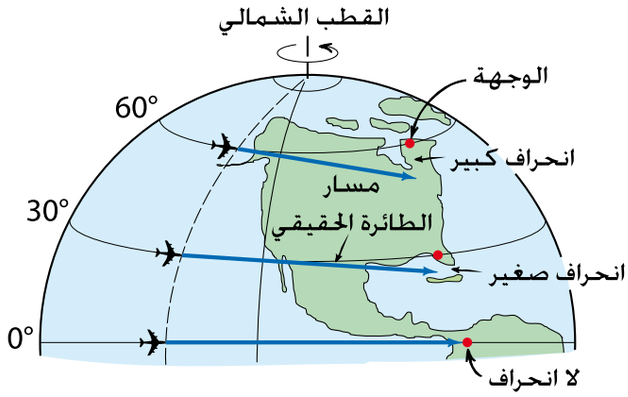


الشّكل 29.24

قوة كوريولوس – الانحراف الظاهري للرياح من خط مستقيم على سطح الأرض هي قوى أساسية لتحريك الرياح. وهي ليست القوة الوحيدة. (أ) يتحرك الهواء بسبب فرق الضغط - قوة تحدر الضغط (ب) عندما يتحرك الهواء يتأثر بدوران الأرض – قوة كوريولوس. (ج) في أثناء حركة الهواء قرب سطح الأرض فإنه يبطؤ بسبب قوة الاحتكاك.

* قوة كوريولوس ليست قوة حقيقية بالمعنى الحرفي، وتسمى أحيانًا *تأثير كوريولوس*. في مثال لعبة الدوران، فإنّ المسار المنحني يُرى فقط من قبل واحد على اللعبة. ولكن إذا كان هناك شخص على شجرة فوق اللعبة، فإنه يرى المسار خطًّا مستقيمًا. ولكن لأننا جميعًا على الأرض، فإنّ تأثير كوريولوس يؤدي إلى تغير اتجاه الرياح. وبسبب انحراف الرياح فعليًّا، يسمى هذا السبب قوى كوريولوس.

** سيتم تناول التكاثف، والهطل، والرطوبة النسبية في الفصل الخامس والعشرين.



الشّكل 30.24
خطوط العرض تؤثر في الانحراف الظاهري الناتج عن قوى كوريولوس. ينحرف جسم متحرك بحرية متجه نحو الغرب أو الشرق عن مساره المستقيم بسبب دوران الأرض أسفلها. والانحراف يكون كبيرًا عند الاستواء. قوى كوريولوس مشاهدة فقط للحركات ذات المقياس الكبير مثل رياح الغلاف الجوي، أو تيارات المحيط، التي لأحد أجزائها سرعة انحراف أكبر من الآخر حول محور الأرض.

السفن التي كانت تبحر قديمًا يتم حجزها على خطوط العرض هذه شمالاً وجنوبًا. وعند نفاد الغذاء والماء على السفينة، يلجأ البحارة إلى أكل الخيول أو رميها للحفاظ على الماء النقي وتقليل حمولة السفينة. لذا، تسمّى هذه المنطقة خطوط *عرض الخيول*.

تكتمل دائرة الحمل الحرارية التي تبدأ من خط الاستواء عندما ينحرف الهواء المتحرك جنوبًا من خطوط عرض الخيول في النصف الشمالي وشمالاً في نصف الكرة الجنوبي، وغربًا عن طريق قوة كوريولوس لتكوين *الرّياح التّجاريّة*. ينحرف الهواء المتحرك شمالاً في خطوط الخيول في نصف الكرة الشمالي، وجنوبًا في النصف الجنوبي شرقًا ليكون الرياح الغربية.

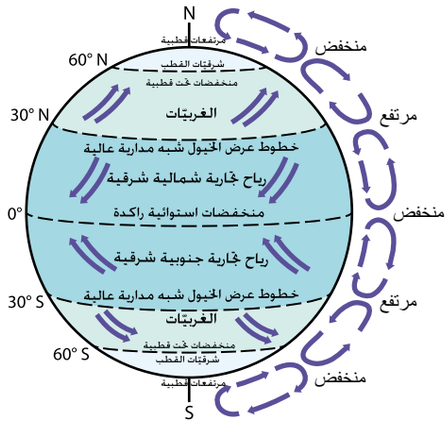
وبالقرب من القطبين، تنزل الرياح الباردة باستمرار، فتدفع الهواء السطحي نحو الخارج. وتلاحظ قوة كوريولوس بوضوح في المناطق القطبية حيث تنحرف الرياح نحو الغرب لإنشاء *شرقيّات الأقطاب* (الشكل 31.24). يلتقي الهواء البارد الجاف مع الهواء الدافئ الرطب للغربيات على خطوط عرض 60° شمال خط الاستواء وجنوبه. تسمى هذه الحدود *الجبهة القطبية*. وهو نطاق ضغط منخفض حيث تتقارب كتل الهواء مكونة العواصف عادة.

تتميز خطوط العرض المتوسطة بطقس غير قابل للتنبؤ. ومع أنّ الرياح تظهر أنها آتية من الغرب إلا أنها متغيرة؛ لأنّ فروق الحرارة والضغط بين الكتل الهوائية في المناطق تحت المدارية من جهة، والكتل الهوائية على الجبهة القطبية من جهة أخرى تولّد رياحًا قوية. ومع حركة الهواء من مناطق ضغط مرتفع حيث الهواء أعلى كثافة إلى مناطق ضغط منخفض، ينشأ تأثير الرّياح الدوّامة (كما ستتم دراسته في الفصل الخامس والعشرين، *أعاصير خطوط العرض المتوسطة*).

يؤثر عدم انتظام سطح الأرض في حركة الرياح إن الجبال والوديان والصحارى والغابات والأجسام المائية الكبيرة تقوم جميعها بدور في تحديد اتجاه هبوب الرياح.

لمعلوماتك

- تسمى تيارات الهواء اعتمادًا على الاتجاه الذي تأتي منه الرياح. لذا فإنّ الغربيات تهبّ من الغرب، ولكن الهواء يتحرك نحو الشرق.



الشّكل 31.24
ينتج الدوران العالمي للغلاف الجوي عن عاملين هما: (أ) التسخين غير المتساوي لسطح الأرض (الذي يولد تيارات الحمل). (ب) دوران الأرض حول نفسها. في الغلاف الجوي ست خلايا دورانية تؤدي إلى حركة الرياح في اتجاه الأسهم. الرياح الرئيسة هي *الغربيّات، والشّرقيّات، والرياح التجارية*.

الدوران في الغلاف الجوي العلوي

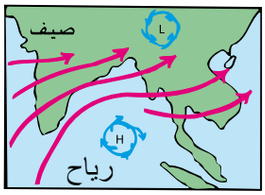
في الغلاف الجوي العلويّ "أنهار" هواء تتحرك بسرعة، وتتعرج حول الأرض على ارتفاع 14-9 كم. هذه الرياح العالية السّرعة هي *التيارات النّفّاثة*. ومتوسط سرعتها بين 95 و 190 كم / ساعة . ومن ثم تقوم هذه التيارات النفاثة بدور حاسم في نقل حرارة العالم من خط الاستواء إلى القطبين.

ومن أهم التيارات النفاثة *التّيار القطبيّ النّفّاث*، *والتّيار النّفّاث تحت المداريّ*، واللذان يتشكلان في شمال الكرة الأرضية وجنوبها على حدّ سواء. وتشكل التيارات القطبية النفاثة المال الحراري (التحدّر الحراري) على الجبهة القطبية – على خط عرض 60° شمالا و 60 درجة جنوبًا تقريبًا - حيث يلتقي الهواء القطبي البارد بالهواء المداري الحارّ. ويؤدي هذا التحدّر الحراري إلى تحدّر شديد في الضغط الذي يزيد من سرعة الرياح. وخلال فصل الشتاء . يكون التيار القطبي النفاث قويًّا، وينتقل إلى خطوط العرض المنخفضة . وبذلك يجلب عواصف الشتاء، والعواصف الثلجية القوية للولايات المتحدة. وفي الصيف يكون التيار القطبي النفاث هو الأضعف، وينتقل إلى مناطق خطوط العرض العليا.

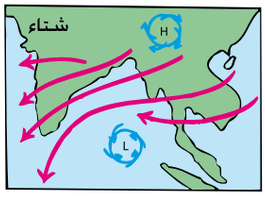
ينجم التيار النفاث تحت المداري عن طريق الجو الحارّ المحمول نحو القطب من خط الاستواء الذي ينتج تحدّرًا حراريًّا حادًّا على طول المواجهة شبه الاستوائية - خط العرض 30° شمالًا و 30° جنوبًا. ومرة أخرى، يولّد تحدّر (مال) الضّغط الناجم عن التّحدّر الحراريّ (أو التّحدّر في درجة الحرارة) رياحًا قوية.

يستحق التيار النفاث تحت المداري فوق جنوب شرق آسيا والهند وإفريقيا اهتمامًا خاصًّا (الشكل 32.24). إنّ تشكيل هذا التيار النفاث مرتبط بارتفاع درجة حرارة الهواء فوق مرتفعات التبت. وخلال فصل الصّيف، يكون الهواء فوق المرتفعات القارية أكثر دفئًا من الهواء فوق المحيط إلى الجنوب. يرفع الهواء الدافئ جالبًا هواءً باردًا رطبًا من فوق المحيط. وهكذا تُولّد تحدرات درجة الحرارة والضغط رياحًا قوية على اليابسة المحاذية للبحار التي تسهم في المناخ *الموسميّ* في المنطقة *. وخلال فصل الشتاء، تغير الرّياح اتجاهها لإنتاج فصل جفاف.

هذه الدورة من الرياح تميز مناخات كثيرة من جنوب شرق آسيا. هذه الرياح الحاملة للمطر في الصّيف قابلة للتنبؤ وتتحرك فوق الأرض الساخنة. وتسمى *الرّياح الموسمية الصّيفيّة*. أما الرّياح السّائدة الجافة القادمة من الأرض إلى البحر في فصل الشتاء فتسمّى *الرّياح الموسميّة الشّتويّة*.



(أ)



(ب)

الشّكل 32.24
الرياح فوق جنوب شرق آسيا. (أ) خلال أشهر فصل الصيف ، يكون الهواء فوق المحيطات أبرد من الهوء على الأرض. الرياح الموسمية الصيفية تجلب الأمطار الغزيرة ، في حين تهبّ الرياح من البحر إلى الأرض. (ب) وخلال أشهر الشتاء، يكون الهواء فوق القارات أكثر برودة من الهواء فوق المحيطات. الرياح الموسمية في فصل الشتاء عموما تؤدي إلى سماء صافية، والرياح تهب من الأرض إلى البحر.

■ نقطة فحص

1. ما الأسباب الكامنة وراء كلّ من الرياح التجارية ، والتيارات النفاثة، والرياح الموسمية؟
2. في خطوط العرض المتوسطة ، تجدول شركات الطيران أوقاتًا أقصر لرحلة الطائرات المسافرة من الغرب إلى الشرق، وأوقاتًا أطول لرحلة الطائرات المسافرة من الشرق إلى الغرب. لِمَ تكون الطائرات المتجهة شرقًا أسرع؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. التسخين غير المتساوي لسطح الأرض إلى جانب دوران الأرض حول محورها.
2. الرياح الغربية العلوية من التيارات النفاثة تفسر السّبب في تحرك الطائرات المتجهة شرقًا على نحو أسرع. وعندما يتحرك التيار النفاث من الغرب إلى الشرق ، فإنه يحمل كلّ شيء في طريقه. ولتوفير الوقت والوقود ، يلتمس الطيارون التيار النفاث عند سفرهم من الغرب إلى الشرق ، ويتجنبون ذلك عند سفرهم من الشرق إلى الغرب.

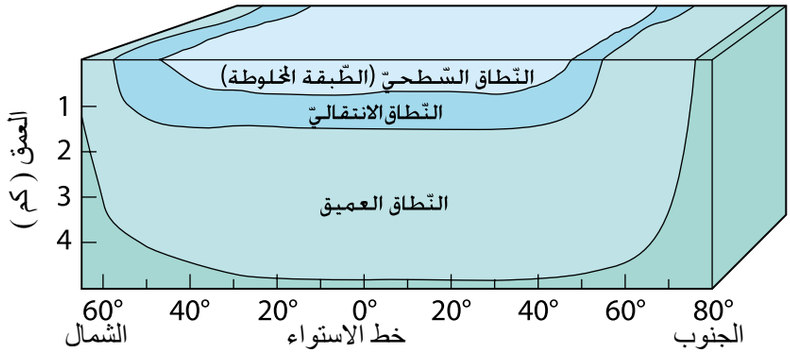
الدّوران المحيطيّ

إنّ القوى التي تدفع الرّياح تؤثر أيضًا في حركة مياه البحر. في المحيطات المفتوحة، تنجم حركة مياه البحر عن نوعين من التيارات هما: 1- تيارات الرّياح السّطحيّة. 2- تيارات الكثافة في المياه العميقة.

لمعلوماتك

■ يؤثر دوران الهواء في تداول تيارات سطح المحيط . وخير شاهد على هذا ما تمّ العثور عليه في أثناء عاصفة شديدة عام 1990م . حيث تم تنظيف خمس حاويات شحن من الأحذية الرياضية من خارج السفينة في أثناء طريقها للشحن من كوريا الجنوبية إلى شمال غرب المحيط الهادئ. لقد تم التقاط آلاف الأحذية الرياضية والأحذية الأخرى على طول الشواطئ من كولومبيا البريطانية إلى ولاية أوريجون، وحتى منتصف المحيط الهادئ وهاواي. وعلى الرّغم من أنّ عددًا كبيرًا من هذه الأحذية غير متطابقة ، فإنّ معظمها ما زال صالحًا للاستعمال . وقد شكل ذلك عمليات مبادلة للبحث عن الأحذية الملائمة.

*اشتقت كلمة monsoon من العربية "موسم" معناها "رياح فصلية".



الشّكل 33.24
البنية العمودية للمحيط. تكون المياه في النطاق السّطحيّ مختلطة في أثناء تحركها عموديًّا استجابة لتغيرات الحرارة والكثافة ، وتتحرك أفقيًّا استجابة لطاقة الرّياح. تتحرك المياه في النطاق الانتقالي على طول سطوح الكثافة. إنّ المياه العميقة تكون مدفوعة بالكثافة، لأنها تدور من المناطق القطبية الباردة إلى المناطق الاستوائية الدافئة.

يتم التحكم في كثافة مياه البحر من قبل عاملين، هما درجة الحرارة والملوحة. بالقرب من السواحل ، تتأثر حركة المياه بتيارات المد والجزر ووجود الحدود الساحلية، وليس فقط من خلال تيارات المياه السطحية والمياه العميقة.

وكما هو الحال في الغلاف الجويّ، فإنه يمكن تقسيم المحيط إلى عدة طبقات رأسيّة هي: *النّطاق السّطحيّ*، *والنّطاق الانتقاليّ* ، *و النّطاق العميق*. يلاحظ الغواصون وجود زيادة في ضغط الماء عند السباحة في الأعماق السفلى. وكلما ازداد عمق الهبوط زاد ضغط المياه. ويشير الضّغط ببساطة إلى وزن الماء فوقك، وهو الذي يدفعك إلى أسفل (الفصل 5). وثمة عامل آخر يتغير عند نزولك هو درجة الحرارة، حيث تكون المياه الأعمق أكثر برودة. بالإضافة إلى التغيّرات في الملوحة.. كما تختلف مياه البحر أيضًا في درجة الحرارة والضغط؛ لأنّ الماء البارد أكثر كثافة من الماء الدافئ، وذلك للأسباب نفسها التي للهواء. ويكون الهواء البارد أكثر كثافة من الهواء الدافئ؛ لأنّ المياه الباردة تهبط تحت مياه البحر الدافئة. كما تؤثر ملوحة المياه أيضًا في الكثافة؛ فكلما زادت الملوحة زادت الكثافة. وأفضل طريقة لتوضيح هذه الاختلافات عندما ننظر إلى البنية العمودية للمحيط (الشكل 33.24).

لمعلوماتك

■ هناك بعض الجدل حول تيارات الكثافة في أعماق المحيطات. قد لا تكون الطاقة الكامنة كافية في النظام لدفع مثل هذه التيارات. الخلط بفعل الرّياح والمدّ والجزر في أعماق المحيطات يسهم أيضًا في دفع التدفق العميق. وبعبارة أخرى، قد تكون التيارات البحرية كلّها في نهاية المطاف مدفوعة بالرّياح!

لمعلوماتك

■ أين تنشأ أملاح المحيطات؟ أحد المصادر هو التجوية الكيميائية من الصخور القارية. مع تجوية الصخور، تذوب عناصر مثل الصوديوم والكالسيوم والبوتاسيوم في الماء. يحمل الماء هذه المواد الكيميائية إلى المصبّ ثم إلى المحيط. وهناك مصدر آخر هو باطن الأرض. منذ أزمان سحيقة زوّدت الانفجارات البركانية مياه المحيط بكميات كبيرة من الكلور، وبخار الماء، والغازات الأخرى فأصبحت مالحة بسبب وجود كلوريد الصوديوم، أي ملح الطّعام .

■ **نقطة فحص**

هل تتوقع أن يكون ضغط 100 متر في عمق المياه المالحة هو نفسه كما في 100 متر في عمق مياه منخفضة الملوحة؟

هل كانت هذه إجابتك؟

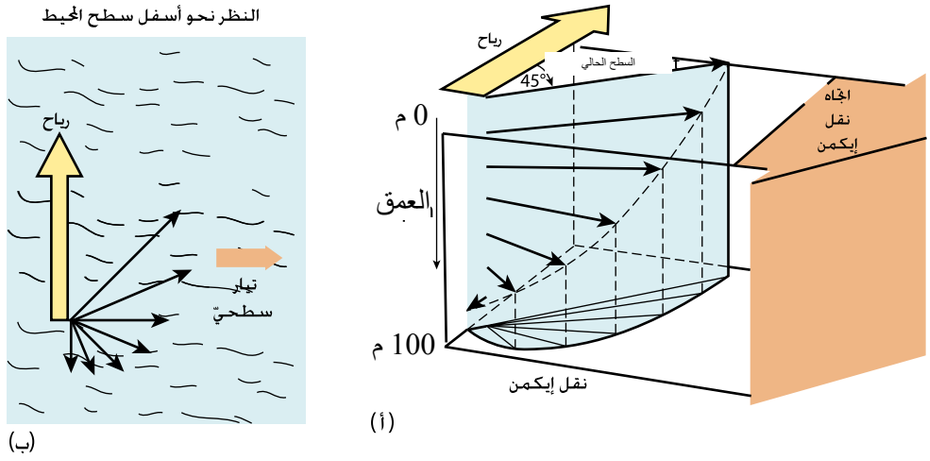
لا؛ لأنّ الملوحة العالية تعني ارتفاع الكثافة. وحجم مياه ذات كثافة عالية يزن أكثر من حجم مساو له من الماء الأقل كثافة. وبسبب أنّ الضّغط هو الوزن في وحدة المساحة، فإنّ الضغط على عمق 100 متر أكبر إذا كان الماء أكثر ملوحة.

التّيارات السّطحيّة

عندما تهب الرّياح عبر المحيط، تقوم قوى الاحتكاك بدفع المياه السّطحيّة للتّحرّك. فإذا كانت المسافات قصيرة فإنّ المياه السّطحيّة تتحرّك في اتجاه الرّياح نفسها. أمّا إذا كانت المسافات طويلة فإنّ عوامل أخرى تدخل في الحسبان.

من هذه العوامل قوة كوريوليس التي تسبب انحراف التيارات المائية السّطحيّة إلى اليمين (في نصف الكرة الشّماليّ) . حتى يتسنى لها التحرك في اتجاه مختلف من اتجاه الريح. إنّ هذه الظاهرة المعروفة باسم *نقل إيكمن* (الشكل 34.24) تؤدي بالتيارات السّطحيّة إلى انحراف يصل إلى 45 درجة عن اتجاه الرياح! ومن نتائج نقل إيكمن ما يُسمّى بدوامة إيكمن، وهي الظّاهرة التي تتسبب في الانحراف الناتج عن قوة كوريوليس، وزيادة مستمرة مع العمق، بحيث يصل الاتجاه الصافي لنقل المياه على عمق يزيد على 100 متر إلى 90 درجة من اتجاه الرياح (الشكل 34.24).

يوضح الشكل 35.24 أنماط الدوران الجوي العالمي بين 40 درجة شمالًا و 40 درجة جنوبًا.



الشّكل 34.24

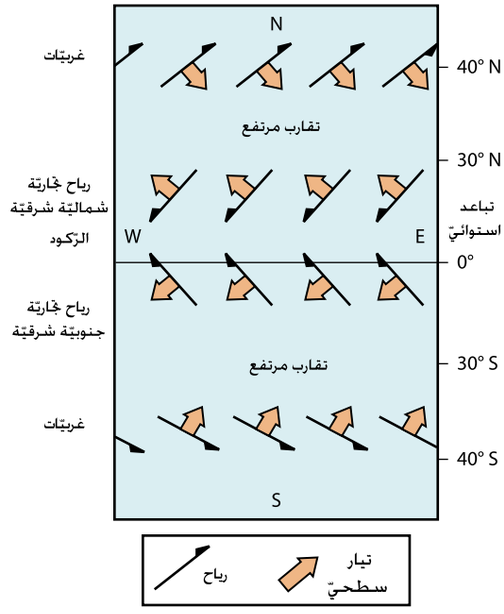
وجهتا نظر لنقل إيكمن: يبين الجزء (أ) انخفاض السرعة مع العمق، في حين يبين الجزء (ب) وجهة نظر عين الطيور في اتجاه سطح المياه ، والاتجاه العام للحركة النهائية للمياه. ومع عدم وجود قوة خارجية ، يتحرك الماء في اتجاه الريح نفسه. ولكن قوة كوريوليس تحرف المياه السّطحية 45 درجة إلى اليمين من اتجاه الريح (في نصف الكرة الشمالي). ومع ازدياد العمق ، يزداد الانحراف إلى اليمين، ولكن الماء يتحرك في سرعة أبطأ، مما يسبب أن تكون محصلة اتجاه نقل المياه بين 70 درجة و 90 درجة من اتجاه الرياح.

ومع التركيز في الوقت الراهن على نصف الكرة الأرضية الشمالي ، لاحظ أنه في جنوب خط 30، تهب الرّياح التّجاريّة من الشّمال الغربيّ إلى الجنوب الشّرقيّ. في حين تهب الرّياح الغربية من الغرب إلى الشّرق إلى الشّمال من خط 30. وبسبب نقل إيكمن، فإنّ تيارات سطح المحيط جنوب خط 30 شمالًا تتدفق إلى الشّمال الغربيّ، وشمال خط 30 إلى الجنوب الشرقي (الشكل 35.24). وترى في الشّكل 35.24 أثر إيكمن في تدفق التيارات بعضها نحو بعض، أو تلاقيها في خط 30 شمالا. ويؤدي مثل هذا التقارب إلى رفع الماء (الشكل 36.24) أو تكوّمه في سطح المحيط مشكّلًا مرتفعات ومنخفضات، كما هو موجود على سطح الأرض. إلا أنّ تضاريس سطح المحيط أهدأ كثيرًا من تضاريس سطح الأرض.

تمامًا كما على الأرض، تسعى المياه في هذه الأكوام إلى التدفّق "نحو الأسفل" بسبب تحدّر قوة تحدّر الضغط. ولكن مرة أخرى يأتي دور قوة كوريوليس التي تؤدّي إلى انحراف التدفق نحو اليمين (في نصف الكرة الشمالي). ومع الاتجاه إلى اليمين ، تعمل قوة كوريوليس مرة أخرى على صرف المياه إلى أقصى اليمين نحو ذروة الكومة. لذلك، تعمل قوتان على المياه محاولة دفعها في اتجاهين متعاكسين. إنّ التّوازن بين قوة تحدّر الضّغط وقوة كوريوليس يؤدي إلى تدفق المياه حول وسط الكومة في نمط دوامة دائرية كبيرة تسمى **جَيَر** (*Gyre*) (37.24) .

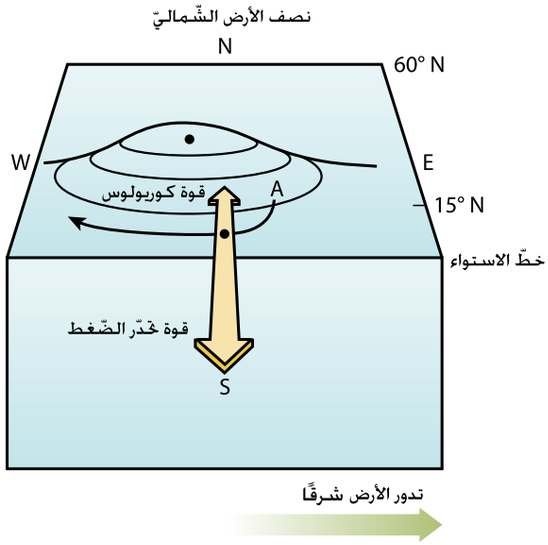
لمعلوماتك

■ **لا تصدق قصص تأثر دوامات المياه في حوض الغسل الخاص بك بقوة كوريوليس. إنّ أيّ تأثير ناتج عن الاختلاف في سرعات من جزء واحد من الحوض مقارنة بالأجزاء الأخرى، تعدّ ضئيلة جدًّا، وتخفيها الحركات الحرارية في الماء.**

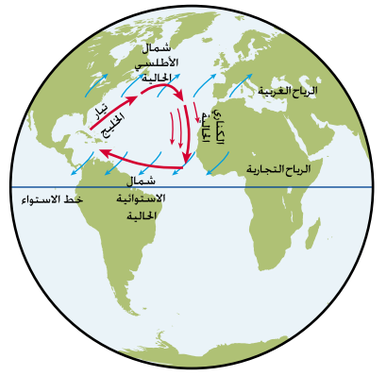


الشّكل 35.24

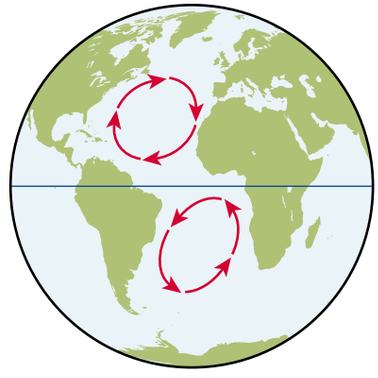
تيارات الكمان المدفوعة بواسطة الرياح السائدة تجعل اليتارات تتجمع حول خطوط العرض 30(رمز الدرجة) شمالًا و30(رمز الدرجة)جنوبًا. ويتسبب هذا التجمع في ارتفاع سطح الماء في هذه المنطقة (انظر الشكل 36.24)



الشّكل 36.24
المياه المتكومة في نصف الكرة الأرضية الشمالي بسبب نقل إيكمن. تتدفق المياه في البداية "نحو الأسفل" لكنها تهرب إلى اليمين ، كما هو موضح بواسطة الأسهم القادمة من نقطة أ. تتدفق الآن حول الكومة ، يتكون تدفق بسبب قوة الدوران وقوة كوريوليس، وتوازن قوة تحدر الضغط، وتوازن بعضها مع بعض.



الشّكل 37.24
تتألف الجَيَر في شمال المحيط الأطلسي من: تيار الخليج، وتيار شمال الأطلسي، وتيار الكناري ، وتيار شمال الاستواء.



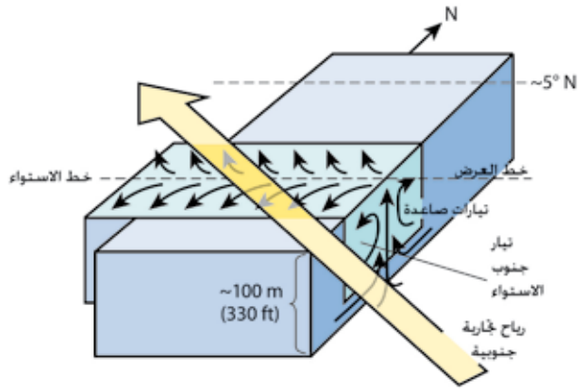
الشّكل 38.24
جَيَر مستقلة في شمال خط الاستواء وجنوبه. التدفق في نصف الكرة الشمالي في اتجاه عقارب الساعة، أما في نصف الكرة الجنوبي فهو عكس اتجاه عقارب الساعة.

تكون الحركة الدّائريّة في اتجاه عقارب السّاعة في نصف الكرة الشّماليّ. وعكس اتجاه عقارب السّاعة في نصف الكرة الجنوبيّ. وعندما تصبح قوة حَدّر الضّغط وقوة كوريوليس في التّوازن مثاليّة. فإنّ هذا التّدفق يسمّى تدفّقًا متعلّقًا *بقوة الدوران*؛ يستمر تدفق المياه حول الكومة بدلًا من أسفلها. وتهيمن الدّوامات على التّدفق العام للتيارات السّطحيّة في كلّ حوض من أحواض المحيطات. وكما يوضح الشكل 38.24. فإنّ الدّوامات لا تعبر خطّ الاستواء. وهناك دوامات منفصلة شمال خط الاستواء وجنوبه في كلّ حوض من أحواض المحيطات.

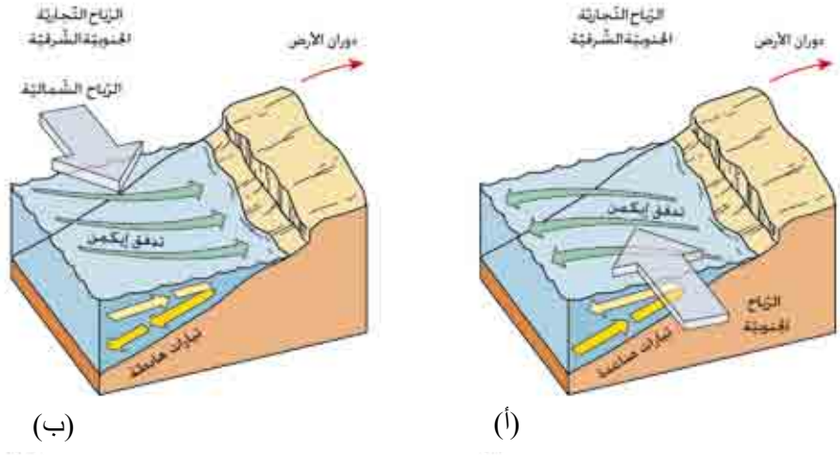
يتسبّب التّدفّق المتقارب المكون للدّوامات عند 30 درجة شمالًا و 30 درجة جنوبًا. في تكوين تيارات *هابطة* تدفع بعض المياه السّطحيّة إلى أسفل. ويحدث أثر عكسيّ عند خطّ الاستواء. حيث تعبر الرّياح التّجاريّة الجنوبيّة الشّرقيّة قليلًا خطّ العرض 0^{o}. وهنا يسبب نقل إيكمن تباعد المياه عند خط الاستواء مسبّبًا تيارات *صاعدة* إلى السّطح من المياه العميقة. شديدة البرودة. والغنية بالمغذّيات (الشكل 39.24). إنّ مثل هذه المناطق من التّيارات الصّاعدة مليئة بالحياة. يسبب نقل إيكمن تيارات صاعدة وأخرى هابطة على طول السواحل اعتمادًا على الاتجاه الذي تهب فيه الرّياح السائدة. ومن هذه المناطق سواحل بيرو. وكاليفورنيا (الشّكل 40.24).

ومن النتائج المهمة لهذه الدوامات الكبيرة. نقل الحرارة من المناطق الاستوائية إلى مناطق خطوط العرض العليا. في شمال المحيط الأطلسي على سبيل المثال. تتدفق المياه الدافئة الاستوائية غربا وحول خليج المكسيك. ثم شمالًا على طول السّاحل الشّرقيّ للولايات المتحدة. ويسمى تيار المياه الدافئة هذا *تيار الخليج*. ومع تدفق تيار الخليج شمالًا على طول ساحل أمريكا الشّماليّة. فإنّ التّدفق في هذه الدوامات الكبيرة يدفع التيارات الحارة شرقًا نحو أوربا (الشكل 41.24). تنقل المياه الحارة الحرارة إلى الهواء المتحرك غربًا. مما يؤثر في طقس أوربا ومناخها. لذا تستفيد بريطانيا العظمى والنرويج من هذه الحرارة؛ لأنّ الأراضي في خطوط العرض الشمالية هذه قد تكون باردة ما لم تتقدم الحرارة شمالًا من المناطق الاستوائية وخليج المكسيك. وعندما تواجه التيارات الحارة أوربا تتحول في اتجاه الجنوب نحو خط الاستواء. حيث لا تزال تتدفق في دوامات شمال الأطلسي. وفي نهاية المطاف. يتحرك هذا الماء غربًا نحو خليج المكسيك. ليصبح مرة أخرى جزءًا من تيّار الخليج.

إنّ كلّ حوض من أحواض المحيطات له تدفّق سطحيّ مشابه؛ وهو نمط تدفق تيار دافئ على جَيَر وعلى الحدود الغربية. نظير تيار الخليج الدافئ في المحيط الهادئ هو التيار الدافئ المتدفق شمالًا المعروف باسم *كوروشيو*. ويتشابه الأمر في نصف الكرة الجنوبي. إلا أنّ الدوران يكون عكس اتجاه عقارب الساعة (ما عدا التيار القطبي للقارة المتجمدة الجنوبية). وتحدث التّيارات الدّافئة على الحدود الغربيّة في كلّ أحواض المحيطات الثلاثة في نصف الكرة الجنوبي.



الشّكل 39.24
يسبب نقل إيكمن تباعدًا في المياه السّطحية عند خط الاستواء، والذي يسبب دفع مياه القاع الباردة الغنية بالعناصر المغذية إلى السّطح، مما يسمح بازدهار الحياة هناك. تهبّ الرياح التجارية الجنوبية الشرقية من نصف الكرة الجنوبي، وفي الواقع تعبر خطّ الاستواء قليلًا. وإلى الجنوب من خطّ الاستواء، يؤدي نقل إيكمن إلى توجيه المياه السطحية لكي تنحرف إلى اليسار أو الجنوب الغربي. أما في شمال خط الاستواء، فإنّ نقل إيكمن يؤدي إلى انحراف المياه السطحية إلى اليمين، أو الشمال الغربي. تتباعد المياه السّطحية، مما يسبب تكوّن التّيارات الصّاعدة.



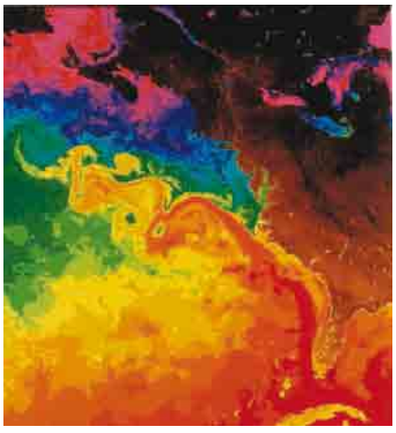
الشّكل 40.24
يتسبب نقل إيكمن في حدوث تيارات (أ) صاعدة في المناطق الساحلية. أو (ب) هابطة اعتمادا على اتجاه الرياح السائدة.

تيّارات المياه العميقة

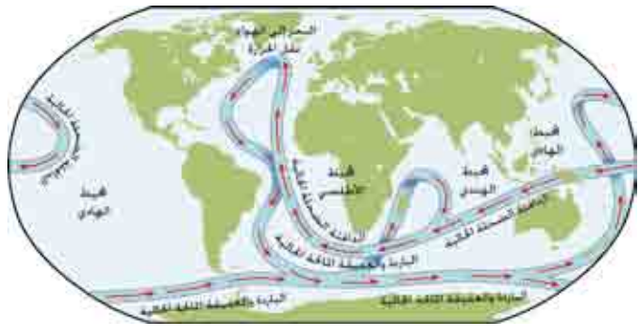
تتحرّك المياه السّطحيّة بفعل الرّياح. أمّا المياه العميقة فتتحرك بواسطة الجاذبية؛ تحدث تدفقات المياه العميقة بسبب غوص المياه ذات الكثافة العالية. وتنساب المياه العميقة ببطء أكثر من المياه السّطحيّة. ولكن يتم نقل كميات من المياه العميقة بالتيارات أكثر كثيرًا من تيارات المياه السّطحيّة. يشبه تدفّق المياه العميقة حزامًا ناقلًا عالميًا ضخمًا. وينقل المياه والحرارة في أنحاء الكرة الأرضية جميعها (الشكل 42.24).

إنّ أكثر أشكال المياه العميقة كثافة هي الموجودة في بحار ويديل وروس المتاخمة لمنطقة القطب الجنوبي. ولفهم كيفية تشكّل هذه المياه؛ نحتاج إلى نظرة إلى ما يحدث عندما تبدأ مياه البحر في التجمد. لا تتجمد مياه البحر بسهولة. وعندما يحدث ذلك يتجمد الماء فقط. ويترك الملح وراءه. وهكذا فإنّ مياه البحر التي لا تتجمد تزيد ملوحتها. مما يسبب زيادة كثافتها.

تتشكّل المياه العميقة ذات الكثافة العالية أيضًا في المحيط المتجمد الشّماليّ. ولكن تضاريس قعر البحر تمنع معظمها من الذهاب جنوبًا. إلا أنّ بعض المياه العميقة تستطيع المغادرة الى شمال الأطلسي. وهكذا يتمّ تشكيل المياه عالية الكثافة عميقة في خطوط العرض المرتفعة. وتهبط إلى قعر المحيط؛ لأن الماء ذا الكثافة المرتفعة يستمر في التشكّل على السّطح. في حين تهبط المياه الباردة والمالحة إلى قعر المحيط. تدفع المياه الهابطة مياهًا أعمق إلى الخروج من الطريق. وهذا يؤدي إلى تدفق مياه القعر إلى الخارج على طول قعر المحيط؛ وهذه هي بداية الحزام الناقل الكبير.

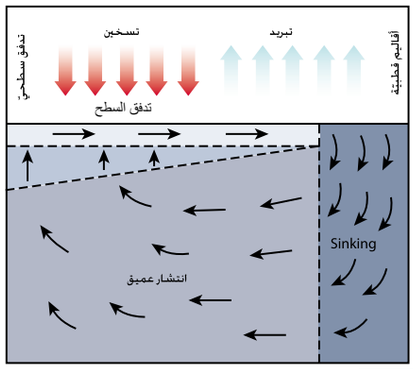


الشّكل 41.24
تشير المنطقة الضاربة إلى الحمرة في صورة الأقمار الصناعية هذه الزائفة الألوان إلى المياه الدافئة. ينقل تيار الخليج كميات كبيرة من الحرارة شمالًا ثم شرقًا نحو أوربا.



الشكل 42.24

تسلك التيارات في أعماق المحيطات سلوك حزام ناقل، تنقل الماء البارد من شمال المحيط الأطلسي مرورًا بخط الاستواء إلى القطب الجنوبي، ومن ثَمَّ تتدفق المياه شرقًا، ثم شمالًا في المحيطين الهادئ والهندي.



الشكل 43.24

تهبط المياه الباردة ذات الكثافة العالية في المناطق القطبية، ومن ثَمَّ تتدفق نحو خط الاستواء. وفي نهاية المطاف، يتم دفعها إلى الأعلى، حيث تسخن، وتصبح جزءًا من تدفق السطح، وتعود إلى المناطق القطبية. الألوان الأغمق تشير إلى المياه الأبرد.

اربط مع الطّقس

ظروف النينو

عندما يتم قياس الطّقس على مرّ الزمن، يمكن ملاحظة متوسط نمط الطقس. *المُناخ* هو سلوك الطقس المتسق على مرّ الزمن. وخلال بعض الفترات ، من المتوقع أن يتغير متوسط نمط الطقس عن النمط الطبيعي. وهذه التغيرات تم توقعها وتعرفها على المدى القصير في الطقس. والمثال الرئيس لهذا التغير هو ظروف النينو.

في الظروف العادية، تتحكم النظم الحارة العالية الضغط الموجودة في نصفي الكرة بالقرب من خط الاستواء في أنماط الطّقس في منطقة المحيط الهادئ. وتسبب هذه الأنظمة ذات الضغط العالي هبوب الرياح التجارية غربًا على طول خطّ الاستواء، وسحب المياه السطحية الدافئة الاستوائية معها. ومع حركة المياه السطحية الدافئة غربًا ترتفع المياه العميقة الباردة في الشرق نحو الأعلى لتحتل المساحة الشاغرة من المياه السطحية الدافئة. إنّ المياه الباردة الصاعدة غنية بالمغذيات. لذا، فإنها تجذب مجموعة متنوعة من الحياة البحرية. إنّ صعود المياه الباردة مهم لصيد الأسماك على طول ساحل أمريكا الجنوبية، حيث كان الناس يكسبون عيشهم من صيد الأنشوجة التي تأتي للتغذي في المياه الغنية بالمغذيات.

صيد الأسماك ليس دائمًا جيدًا، ولكن كل سنة في أكتوبر تتراخى الرياح التجارية ، وتعكس اتجاه التدفق الطبيعي الغربي من المياه السّطحية الدافئة الاستوائية. وبما أنّ المياه السطحية الدافئة تنجرف شرقًا، فإنّ التيارات الصاعدة تقل. وكذلك الحال بالنسبة إلى الصيد. يشير الناس على طول ساحل أمريكا الجنوبية إلى حدوث هذا بالنينو؛ لأنها تبدأ كلّ عام في الأنحاء جميعها في ديسمبر عند الاحتفال التقليدي بميلاد المسيح (المسيح هو النينو، "الطفل" بالإسبانية). وفي ظل الظروف العادية، فإنّ الرياح التجارية تعود مرة أخرى في أوائل الربيع، والمياه السطحية تهب مرة أخرى في اتجاه الغرب عبر المحيط، ثمّ يعود كل شيء إلى وضعه الطبيعي.

في بعض السنوات، تفشل الرياح التجارية في أن تتقوى، والمياه السطحية الدافئة لا تزال قبالة سواحل أمريكا الجنوبية لمدة سنة أو أكثر. وخلال هذه الظروف غير العادية، فإنّ صعود المياه الباردة إلى السطح يتوقف، والصيد في أمريكا الجنوبية يفشل. وعلى الرّغم من حدوث نينو صغير كلّ عام فإنّ امتداده يسمى ظروف النينو.

تؤثر ظروف النينو في المناخ على جانبي المحيط الهادئ الاستوائية في ظل ظروف طبيعية، والمياه الباردة الصاعدة على الجانب الشرقي من المحيط الهادئ؛ حيث تتزامنان مع الهواء البارد الجاف، والضغوط العالية والسماء الصافية. على الجانب الغربي من المحيط الهادئ، نجد أنّ المياه السطحية الساخنة والمندفعة خلال رحلتها الطويلة عبر المحيط تسخّن الهواء من حولها. ومع ارتفاع الهواء الرطب الحار، تتولّدُ ضغوط منخفضة وعواصف في الجانب الغربي الدافي في المحيط الهادئ. وخلال استمرار ظروف النينو، يتم عكس هذا النمط. تم العثور على المياه الدافئة ، وارتفاع الهواء الرطب الساخن ، والضغوط المنخفضة ، والعواصف على الجانب الشرقي من المحيط الهادئ بدلًا من الجانب الغربي. يسمى هذا التبادل لأنظمة الضغط وأنماط الطقس بين الشرق والغرب خلال ظروف النينو *التذبذب الجنوبيّ*.

يستمر الحزام الناقل في حركته، كما هو مبين في الشّكل 42.24. ولكن لاحظ أيضًا أنّ بعض المياه العميقة تصعد إلى سطح المحيط. إنّ المزيج من خليط المياه العميقة عن طريق المدّ والجزر، والتيارات الصاعدة بسبب الرياح المواتية يجلب المياه العميقة ببطء مرة أخرى إلى السطح. ويبين الشّكل 43.24 دورة من المياه الهابطة الباردة إلى المياه السطحية الأكثر دفئًا. وفي نهاية المطاف، فإنّ المياه العميقة كلّها تتدفق إلى سطح المحيط. وبالعكس، على الرغم من أنّ العملية قد تستغرق مئات أو آلاف السنين.

ملخّص المصطلحات

الحافة القارية Continental margin: الحدود بين القارات والمحيطات ، وتتكون من *الرصيف القاري* ، *والمنحدر القاري* ، *والمرتفع القاري*.

الملوحة Salinity: كتلة الأملاح الذائبة في 1000 جرام من مياه البحر.

مدّ وجزر الربيع Spring tide: مدّ أو جزر مرتفعان أو منخفضان. ويحدث عندما تكون الشمس والأرض والقمر على خط واحد؛ بحيث يتزامن المد والجزر بسبب الشمس والقمر معًا ، مما يجعل المد والجزر أعلى من المتوسط أو أدنى منه. ويحدث في أثناء البدر أو القمر الجديد.

المد والجزر المحاقي Neap tide: يحدث عندما يكون القمر في منتصف الطريق بين القمر الجديد والبدر في كلا الاتجاهين. يكون جذب القمر والشمس متعامدين، لذلك لا يتداخل المد والجزر الشمسي والقمري. وهذا لا يجعل المد مرتفعًا ولا الجزر منخفضًا.

التروبوسفير Troposphere: طبقة الغلاف الجوي الأقرب إلى سطح الأرض ، ترتفع 16 كم فوق خط الاستواء ، و8 كم فوق القطبين. تحتوي على 90% من كتلة الغلاف الجوي ، وكلّ من بخار الماء والسحب.

الستراتوسفير Stratosphere: الطبقة الثانية في الغلاف الجوي فوق الأرض التي تمتد من قمة التربوسفير إلى 50 كيلومترًا. وفيها يتشكل الأوزون.

الميزوسفير Mesosphere: الطبقة الثالثة في الغلاف الجوي للأرض فوق السطح، وهي فوق قمة الستراتوسفير حتى ارتفاع 80 كم.

الطبقة الحرارية Thermosphere: الطبقة الرابعة في الغلاف الجوي فوق سطح الأرض، وتمتد من قمة الميزوسفير إلى 500 كم.

الأيونوسفير Ionosphere: منطقة مكهربة داخل الطبقة الحرارية والجزء العلوي من الميزوسفير حيث تتركز كميات كبيرة من الأيونات والإلكترونات الحرة.

الإكسوسفير Exosphere: طبقة الغلاف الجوي الخامسة فوق سطح الأرض، وتمتد من الطبقة الحرارية إلى أعلى نحو الفضاء بين الكواكب.

ظاهرة الدّفيئة Greenhouse effect: تنشأ ظاهرة الاحتباس الحراري عن طريق الطاقة المشعة ذات الطول الموجي القصير من الشمس التي تدخل الغلاف الجوي بسهولة وتمتص من قبل الأرض. ثم تشع هذه الطاقة ثانية على شكل موجات طويلة لا يمكن أن تهرب بسهولة من الغلاف الجوي للأرض.

قوة تحدر الضغط Pressure-gradient force: القوة التي تنقل الهواء من منطقة ذات ضغط مرتفع إلى منطقة متاخمة ذات ضغط منخفض.

قوة كوريولوس Coriolis force: انحراف ظاهري عن مسار خط مستقيم لوحظ في أيّ جسم يتحرك بالقرب من سطح الأرض ، بسبب دوران الأرض.

جَيَر Gyre: نمط من الدوامة لها شكل دائريّ أو حلزونيّ يصير عادة إلى أنظمة التيارات الكبيرة جدًّا في المحيطات المفتوحة.

أسئلة مراجعة

1.24 الغلاف الجوي للأرض والمحيطات

1. لماذا تكون درجات الحرارة معتدلة في الأراضي المتاخمة للمحيطات؟
2. ما المكونات الرئيسة للغلاف الجوي الأولي للأرض؟ ماذا حدث لهذا الغلاف الجوي؟
3. تطور الغلاف الجوي للأرض على الأرجح عن الغازات التي انبعثت من باطنها خلال الانفجارات البركانية. ما غازات الغلاف الجوي الثلاثة الرئيسة الناتجة عن هذه الانفجارات؟
4. اشرح أهمية التمثيل الضوئي في تطور الغلاف الجوي.

2.24 مكونات محيطات الأرض

5. اذكر أربع مظاهر قد تجدها بين حافتين قاريتين (قعر المحيط)؟
6. تختلف ملوحة المحيط من مكان إلى آخر. ما العاملان اللذان يؤديان إلى زيادة نسبة الملوحة؟ ما العاملان اللذان يؤديان إلى نقص نسبة الملوحة؟

3.24 أمواج المحيط ، وخطوط الشواطئ، والمد والجزر

7. لماذا تصبح الموجات أعلى عند دخولها المياه الضحلة؟
8. ما انكسار الموجة؟ ولماذا يحدث في أمواج المحيط؟
9. لماذا تكون بحيرة الجزيرة الحاجزة عادة بيئة هادئة؟
10. لماذا يكون المد والجزر أكبر في وقت البدر أو القمر الجديد؟

11. متى يحدث أعلى مد: خلال مدّ الربيع أم خلال المدّ المحاقي؟

4.24 مكونات الغلاف الجوي للأرض

12. ما العناصر التي تشكل الغلاف الجوي الحالي؟
13. لماذا لا تقوم الجاذبية على تسطيح الغلاف الجوي على سطح الأرض؟
14. في أي طبقات الغلاف الجوي تحدث الأحوال الجوية جميعها ؟
15. هل تزيد درجة الحرارة عند تحركنا صعودًا في كلّ من التروبوسفير و الستراتوسفير، أم تنقص؟

5.24 الطاقة الشّمسية

16. ما علاقة زاوية سقوط الشّمس بالمناطق المعتدلة والقطبية؟
17. ما علاقة إمالة (ميل محور الأرض) الأرض مع تغير الفصول؟
18. لماذا تتساوى ساعات النهار في أنحاء العالم كلّه في الاعتداليين؟
19. كيف تختلف الإشعاعات المنبعثة من الأرض عن تلك المنبعثة من الشّمس؟
20. كيف يتم تسخين الجو بالقرب من سطح الأرض من أسفل؟

6.24 القوى الدافعة للحركة الجوية

21. ما سبب حركة الهواء؟
22. ما أسباب اختلاف الضغط، ومن ثم هبوب الرياح؟
23. في أيّ اتجاه تدور الأرض: من الغرب إلى الشرق أم من الشرق إلى الغرب؟
24. ما الذي تفعله قوة كوريولوس في الرياح، وفي تيارات المحيطات؟
25. كيف يمكن لقوة كوريولوس تحديد المسار العام لتدوير الهواء؟

7.24 أنماط التداول العالمي

26. لماذا توجد معظم صحارى العالم في المنطقة التي تعرف باسم خطوط عرض الخيول؟
27. ما الرياح التجارية؟
28. لماذا تكون رحلات الطائرات شرقًا عادة أسرع من تلك التي صوب الغرب؟
29. ما العوامل المحددة لحركة التيارات البحرية السطحية؟
30. اشرح نمط الدوران لتيار الخليج.

تمارين

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

تنويه: عدد التمارين كثير، ولكن معلمك سيعين لك عددًا قليلًا من التمارين و/أو المسائل

1. ■ إذا كان الغاز يملأ الفراغ المتاح له كله، فلم لا ينطلق الغلاف الجوي إلى الفضاء؟
2. ■ إذا لم يكن هناك ماء على سطح الأرض، هل سيحدث الطقس؟ دافع عن إجابتك.
3. ■ فيم تختلف الموجات من الطاقة الإشعاعية باختلاف درجة حرارة المصدر؟ كيف يؤثر هذا في الأشعة الشمسية والأرضية؟
4. ● كيف يتأثر الاحترار العالمي بالشفافية النسبية للغلاف الجوي للإشعاع الكهرومغناطيسي ذي الموجة الطويلة والقصيرة؟
5. ■ اشرح لماذا تفتح أذنيك عند الصعود إلى ارتفاعات عالية.
6. ♦ كيف تختلف كثافة الهواء في منجم عميق مقارنة بكثافة الهواء عند مستوى سطح البحر؟ دافع عن إجابتك.
7. ● على الرغم من أنّ الأرض أقرب إلى الشمس في يناير إلا أنّه بارد في نصف الكرة الشمالي. لماذا؟
8. ■ فيم يختلف إجمالي عدد الساعات لضوء الشمس في السنة في المناطق الاستوائية مقارنة بالمناطق القطبية؟ ما سبب أن المناطق القطبية أشد برودة كثيرًا؟
9. ● إذا تغير تكوين الغلاف الجوي العلوي؛ بحيث يسمح لأكبر قدر من الإشعاع الأرضي بالانبعاث، ما تأثير ذلك في متوسط درجة حرارة الأرض؟ ماذا لو خفض الجو كمية الإشعاع الأرضية التي تتمكن من الانبعاث؟
10. ■ مع استهلاك البشر للمزيد من الطاقة ، يرتفع متوسط درجة حرارة سطح الأرض. ومع ذلك وبغض النظر عن مقدار استهلاك الطاقة، لا ترتفع درجة الحرارة بلا حدود. ما العملية التي تمنع الارتفاع اللانهائي؟ اشرح.
11. ● مع تزايد عدد سكان العالم فإنّ كمية انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون من احتراق الوقود الأحفوري تزيد أيضًا. ومع ذلك ، فإنّ كمية ثاني أكسيد الكربون المنبعث أكبر من الكمية الموجودة في الغلاف الجوي. أين هو المستودع المحتمل لزيادة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي؟
12. ■ لماذا يستعمل متسلقو الجبال النظارات الشمسية واستخدام واقي الشمس حتى عندما تكون درجة الحرارة دون الصفر؟
13. ■ إذا كانت الأرض لا تدور، ففي أيّ اتجاه سوف تهب الرياح السطحية في المنطقة التي تعيش فيها؟ في أي اتجاه تهب على الأرض عند خط عرض 15 درجة جنوبًا؟ ولماذا؟
14. ♦ ما العلاقة بين دوران الغلاف الجوي العالمي والتيارات البحرية؟ اربط الدوامات الكبيرة (الجَيَر) في المحيطات مع أنماط الضغط العالي تحت المداري.
15. ● اربط التيار النفاث مع الدوران في الهواء العلوي. كيف يرتبط هذا النمط من الدوران مع جداول شركات الطيران من نيويورك إلى سان فرانسيسكو، ورحلة العودة إلى نيويورك؟
16. ■ ما التيارات النفاثة؟ وكيف تتشكل؟
17. ■ لماذا تكون التقلبات في درجات الحرارة على اليابسة أكبر من الماء؟ اشرح.
18. ♦ لأنّ مياه البحر لا تتجمد بسهولة، فإنّ الجليد البحري لا يصبح سميكًا جدًّا. إذن من أين تأتي الجبال الجليدية الكبيرة؟
19. ● مياه البحر الأبيض المتوسط مالحة جدًّا. ما الذي يمكن أن تقوله عن المعدلات النسبية للتبخر وهطل الأمطار فوق البحر الأبيض المتوسط؟
20. ● ما الدور الذي تلعبه الشمس في دورة تيارات المحيط؟
21. ● كيف يمكن أن يؤثر المحيط في الطقس على اليابسة؟
22. ■ ما الذي سيحدث لملوحة مياه المحيطات إذا زادت سرعة التبخر عن سطح مياه المحيطات عن سرعة هطول الأمطار؟ أو عندما تزيد سرعة الهطول عن سرعة التبخر؟ عرف إجابتك.
23. ♦ لماذا هنالك اهتمامًا وقلقًا حول ذوبان الثلج القطبي أكثر منه حول ذوبان الجليديات - الجبال الثلجية-؟
24. ■ عادة تغطس المياه الأكثر كثافة إلى الأسفل. بالنظر لكثافة مياه الأعماق، إلى أي مدى سيستمر غطس المياه الكثيفة إلى أسفل؟
25. ■ عندما تتجمد كمية من مياه البحار، تزداد ملوحة المياه المحيطة بها أو المجاورة بها؟ علل ذلك.

26. ● لماذا تعدّ مناطقُ القمم المناطقَ الرئيسةَ للتعرية؟
27. ♦ لنفترض أنه تم تكون أمواج متكسرة بشكل عمودي على الشاطئ. كيف تؤثر هذه البنية في التيارات الموازية للشاطئ ونقلها للرمل؟ دافع عن إجابتك.
28. ● تتشكل صخور الكربونات في البيئات البحرية. لماذا نجد رواسب كربونات وفيرة على اليابسة؟
29. ● لماذا يكون رمل بعض الشواطئ مكوّنا من قطع صغيرة من الصّدف؟
30. ♦ تتكون المحيطات من المياه المالحة. وبعد التبخر من سطح المحيط. تنتج الغيوم التي تسقط منها المياه العذبة. لِمَ لا تكون المياه مالحة؟
31. ■ مع اقتراب الأمواج من المياه الضحلة .نلاحظ أنّ الأمواج الأطول تبطئ بعكس الأمواج الأقصر. لماذا؟
32. ■ ما تأثير تشكيل الجليد في المناطق القطبية في كثافة مياه البحر؟ اشرح.
33. ● ما المناطق التي تتلقى المزيد من الطاقة الشمسية على مدار العام: الاستوائية أم المعتدلة؟ كيف يؤثر هذا في درجة ملوحة مياه المحيطات؟
34. ● في المناطق المدارية. تكون الطاقة الشمسية أعلى من إشعاع الأرض. ما تأثير ذلك في ملوحة المحيطات في تلك المناطق ؟
35. ♦ لماذا لا يمكن التنبؤ بالطقس في المناطق المعتدلة؟
36. ♦ ماذا يحدث لمستوى الماء في كوب من الماء عندما يذوب مكعب الجليد العائم فيه؟ وبالمثل. ماذا يحدث لمستوى المياه في منطقة البحيرات الكبرى عند ذوبان قطع الجليد العائمة؟
37. ♦ يعرف معظم الناس اليوم بأنّ سبب المد والجزر في المحيطات ناتج عن تأثير جاذبية القمر. كما أنّ معظمهم يعتقد أنّ جاذبية القمر على الأرض أكبر من جذب الشمس للأرض. ما رأيك؟
38. ● هل يوجد مدّ في المحيطات إذا كانت جاذبية القمر (والشمس) هي نفسها في أنحاء العالم كله؟ اشرح.
39. ■ لماذا لا يتشكّل المدّ في المحيطات كلّ 12 ساعة تمامًا؟
40. ● فيما يتعلق بمدّ الربيع والمدّ المحاقي. متى يحدث أدنى جزر؟ أي. ما الوقت الأفضل للبحث عن المحار؟
41. ♦ عندما يكون المدّ في المحيطات مرتفعًا بشكل غير عادي. فهل سيكون الجزر التالي منخفضًا بشكل غير عادي؟ دافع عن الإجابة من حيث "الحفاظ على المياه". (إذا سكبت ماء في حوض عميق في نهاية واحدة. فهل يكون الطرف الآخر ضحلًا؟)
42. ♦ كيف يمكن لقوة كوريولوس التأثير في حركة المياه السطحية؟
43. ■ ما المناخ المميز لمناطق الركود؟ ولماذا يحدث ذلك؟
44. ● لأنّ الغلاف الجوي تطور نتيجة لثوران البراكين . لماذا لا توجد آثار لارتفاع نسبة ثاني أكسيد الكربون (واحد من الغازات البركانية الرئيسة) في الغلاف الجوي ؟
45. ● لماذا تكون الطبقة الحرارية أكثر سخونة من الغلاف الأوسط؟
46. ● ما مصدر الأيونات التي تعطي الأيونوسفير اسمه؟
47. ● إذا كان الفصل شتاء والشهر يناير في شيكاجو. فما الفصل والشهر المقابلان في سيدني بأستراليا؟
48. ● ما أسباب العرض الناري للضوء المسمى الشفق القطبي؟
49. ♦ اشرح السبب في أنّ معظم مياه قيعان المحيطات تتشكل في شمال المحيط الأطلسي وبالقرب من القارة القطبية الجنوبية.
50. ● كيف تختلف كثافة مياه البحر مع التغيرات في درجات الحرارة؟ كيف تتغير الكثافة مع الملوحة؟

مسائل

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

ارجع إلى مربع تصور العلوم الفيزيائية في الصفحة 643 للإجابة عن كل من المسائل التالية:

1. ● ما الكتلة بالكيلوجرام من الهواء في غواصة سكوبا "فارغة" غير مضغوطة تحت الماء ذات حجم داخلي 0.0100م^3؟
2. ● ما الكتلة بالكيلوجرام من الهواء في غواصة سكوبا "فارغة" تحت الماء ذات حجم داخلي 0.0100م^3 وتحت الضغط بحيث إن كثافة الهواء في الخزان 240 كيلو جرام / م^3؟

اختبار الاستعداد للقراءة

إذا استوعبت هذا الفصل جيدًا. فعليك الإجابة عن 7 أسئلة من 10 على الأقل. وإن لم تستطع. فعليك المزيد من الدراسة.

اختر أفضل إجابة لكلّ سؤالٍ مما يلي:

1. يبقى الغلاف الجوي السفلي للأرض دافئًا بسبب:
(أ) الإشعاع الشمسي.
(ب) الإشعاع الأرضي.
(ج) الإشعاع قصير الموجة.
(د) طبقة الأوزون.
2. عند مقارنة الأراضي البعيدة عن المحيطات بالأراضي المجاورة لها. تميل الأراضي المجاورة لأن يكون بها:
(أ) تغيرات فصلية شديدة جدًّا (قصوى).
(ب) تغيرات فصلية صغيرة.
(ج) شتاء بارد ومماطر.
(د) صيف حار وجاف.
3. الذي يمارس أكبر سحب على محيطات الكرة الأرضية هو:
(أ) الشمس.
(ب) القمر.
(ج) كلّ من الشمس والقمر. وبقوة متساوية.
(د) لا توجد قوة.

4. عند الانتقال من اليابسة إلى حوض المحيط العميق، فإنّ الحافة القارية تتألف من:
(أ) المنحدر، والرصيف، والمرتفع.
(ب) المرتفع، والمنحدر، والرصيف.
(ج) الرصيف، والمنحدر، والمرتفع.
(د) الرصيف، والسهول السحيقة، وظهور وسط المحيط.
5. تنكسر أمواج المحيط بسبب:
(أ) تداخل الموجة.
(ب) انتفاخ المحيط.
(ج) المياه الضحلة.
(د) التيار الموازي للشاطئ.
6. العامل الذي يزيد ملوحة المحيطات هو:
(أ) الجريان السطحي من الجداول والأنهار.
(ب) تشكل الجليد البحري.
(ج) هطل الأمطار.
(د) ذوبان الجليد.
7. تهب الرياح استجابة لـ:
(أ) احتكاك السحب.
(ب) دوران الأرض حول محورها.
(ج) الاختلافات في الضغط.
(د) الاختلافات في الرطوبة.
8. تشهد الأرض تغيرات فصلية بسبب:
(أ) الاشعاع الشمسي الوارد إليها.
(ب) دوران الأرض حول الشمس.
(ج) قوة كوريولوس.
(د) ميل محور الأرض.
9. النتيجة الأكثر أهمية لقوة كوريولوس هي:
(أ) انحراف الهواء والتيارات المائية.
(ب) تشكل نقل إيكمن.
(ج) انعكاس تيارات الهواء ودوران الهواء عالميًّا.
(د) تشكل التيارات النفاثة.
10. السبب النهائي لتيارات سطح المحيطات هو:
(أ) التباعد في المناطق الاستوائية.
(ب) التدرج بين الركود وخطوط عرض الخيول.
(ج) اختلافات الكثافة.
(د) احتكاك السحب بواسطة الرياح السائدة.

إجابات اختبار الاستعداد للقراءة

1ج، 2ج، 3أ، 4ب، 5ج، 6أ، 7ج، 8د، 9أ، 10ب

اكتشف المزيد

http://www.noaa.gov
تعتبر الصفحة الرئيسية لإدارة المحيطات والغلاف الجوي الوطنية المكان المناسب للعثور على احدث المعلومات حتى اللحظة حول المناخ والطقس .

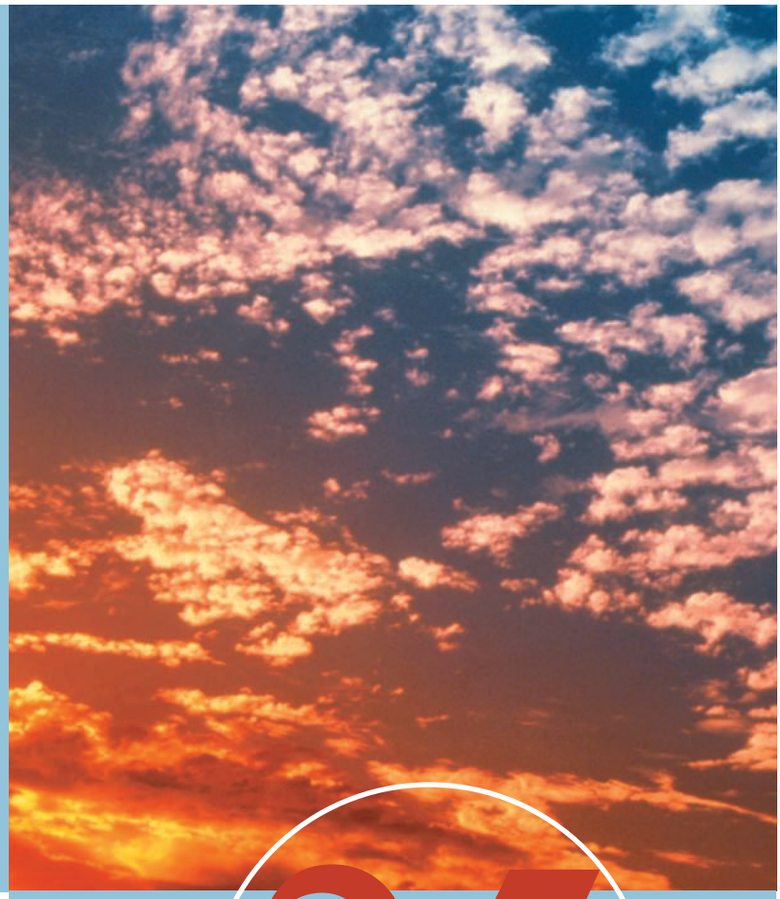
http://www.ncar.edu/ncar
هذا الموقع هو الصفحة الرئيسة للمركز الوطني لابحاث الغلاف الجوي، ويعتبر مصدر ممتاز للحصول على معلومات تفصيلية حول المناخ والطقس. بما في ذلك نمذجة المناخ والتنبؤ بالطقس.

الفصل 24 مصادر على الشبكة

أشكال تفاعلية
- 24.8, 24.9

دروس تعليمية
- الهيكلة الرأسية للغلاف الجوي
- تأثير كوريليوس

اختبار قصير
بطاقات تعليمية
روابط



القوى المحرّكة للطّقس

25

1.25 رطوبة الغلاف الجوّيّ

2.25 متغيّرات الطّقس

3.25 تطوّر الغيوم

4.25 الكتل الهوائيّة والجبهات والعواصف

5.25 الطّقس العنيف

6.25 العنوان الرّئيس للنقاش

■ يحيط بأرضنا غلاف واهب للحياة من الهواء هو الغلاف الجوّيّ. وهو خليط من الغازات التي توفر لنا الهواء الذي نتنفسه، ويحمينا من الأشعّة فوق البنفسجية الضارة. في الفصل 24 ، تعلمنا بنية الغلاف الجوّيّ الرّأسيّ، وكيف أنّ معظم كتلة الغلاف الجوّيّ موجودة في الغلاف المُناخيّ (التروبوسفير)، وهي أدنى طبقات الغلاف الجوّيّ. هذا هو المكان الذي يحدث فيه طقس الأرض؛ محور موضوعنا. إنّ العوامل التي تؤثّر في الطّقس هي الرّطوبة في الغلاف الجوّيّ، ودرجة الحرارة، والضّغط الجوّيّ ، والترتيب الجغرافي للأراضي والمياه. نبدأ مناقشتنا للطّقس من خلال النظر أولًا في رطوبة الغلاف الجوّيّ، وكيف أنّ كمية الرّطوبة في الهواء تؤثّر في استقرار الغلاف الجوّيّ. ثم نناقش تطوير الكتل الهوائيّة المختلفة، وبعض أنماط الطّقس الناتجة. لنلقي بعد كلّ ذلك نظرة على القوى الجوّيّة العنيفة التي تؤثّر بشكل كبير في سطح كوكبنا.

1.25 رطوبة الغلاف الجوّيّ

من المؤكد أنّ المياه ضرورية للحياة على الأرض. ولكن فكر للحظة واحدة في دور الماء الهائل في العمليات الفيزيائية على الأرض: تشكّل المياه سطح الأرض، وتتحكم في الطّقس. وبغض النظر عن كيفية الإحساس بالهواءِ "الجافّ" الذي قد نشعر به في بعض الأحيان، إلّا أنّه ليس جافًّا كليًّا؛ حيث يوجد بعض تركيز لبخار الماء دائمًا.

ولكن بدلا من القولِ "تركيز بخار الماء"، نستخدم مصطلحًا أقصر كثيرًا هو **الرّطوبة *(Humidity)***. على وجه التحديد الرّطوبة هي كتلة بخار الماء في وحدة الحجم من الهواء . تمامًا كما أنّ التركيز عبارة عن كتلة المذاب في وحدة الحجم من المحلول. ومن المهم ملاحظة أنه عندما تسمع خبير الأرصاد الجوّيّة يصف الرّطوبة في التلفزيون، فإنه يتحدث بالفعل عن **الرّطوبة النّسبيّة *(Relative humidity)***. تعتمد الرّطوبة النّسبيّة على درجة الحرارة؛ فهي تصف كمية بخار الماء في الهواء في الوقت الراهن مقارنة مع أكبر قدر ممكن من بخار الماء التي يمكن أن تكون في الهواء في درجة الحرارة نفسها. إنّ الحدّ الأقصى للبخار يختلف تبعًا لدرجة الحرارة.

$$\text{الرّطوبة النّسبيّة} = \frac{\text{كمية بخار الماء}}{\text{سعة بخار الماء}} \times 100\%$$

وعلى سبيل المثال ، فإنّ رطوبة نسبية تساوي 50% تعني أنّ محتوى بخار الماء في الهواء هو نصف قدرة الهواء الاستيعابية عند تلك الحرارة (أي نصف سعته).

فكر في قدرة استيعاب (سعة) بخار الماء بالطريقة نفسها التي تفكر بها في ذائبية المعادن- كذوبانية الملح في الماء. إنّ تركيز الأملاح الذائبة في الماء له حدّ أعلى – ذائبية الملح (الفصلان 16 و 20) عند درجة حرارة معينة. ولا يمكن تخطّي تركيز الذوبانية. وإنْ أضفت المزيد من الملح فلن يذوب.

وينطبق الشيء نفسه على تركيز بخار الماء في الهواء. عند درجة حرارة معينة، للرطوبة حدّ أعلى لا يمكن تجاوزه ، كما أنّ لكل المعادن حدًّا لذوبانها. يسمّى حد الرّطوبة **ضغط بخار التّشبّع *(saturation vapor pressure)***.* عندما يصل الهواء إلى ضغط بخار التّشبّع هذا، لا يمكن للرطوبة (أو ضغط البخار) الزيادة، وتكون الرّطوبة النّسبيّة 100%. ويقال عندها إنّ الهواء *مشبع*.

إنّ للهواء الساخن ضغط بخار تشبع أعلى من الهواء البارد (الجدول 25-1). وهكذا عندما يكون الهواء مشبعًا عند درجة حرارة 10 درجات سيليزية، ثم تغيرت الحرارة إلى 20 درجة سيليزية ، ولم تتم إضافة أي بخار ماء الى الهواء، فلن يكون مشبعًا، وستنقص رطوبته النّسبيّة من 100% إلى نحو 52% في هذه الحالة. وعلى الرّغم من أنّ الرّطوبة النّسبيّة انخفضت، فإن الرّطوبة الفعلية -تركيز بخار الماء في الهواء- تظلّ كما هي، وسيظلّ للهواء الدافئ ضغط بخار تشبع أعلى، ويمكنه حمل بخار ماء أكثر.

يختلف ضغط بخار التّشبّع مع درجة الحرارة بسبب وجود عمليتين متنافستين: معدّل التّبخّر ومعدّل التكثيف (الفصل 7). يعتمد معدّل التّبخّر على درجة الحرارة . ولكن معدّل التكثيف لا يعتمد عليها، بل يعتمد على الرّطوبة فقط (الشّكل 1.25). وعندما يساوي معدّل التّبخّر معدّل التكثف- في أيّ درجة حرارة- يكون الهواء مشبعًا، والرّطوبة النّسبيّة 100%.

لمعلوماتك

■ معظم قطرات المطر كرات مكتملة، وليست كشكل دمعة العين التي يصورها الفنانون. يدعى جذب الجزيئات في السّائل التّوتّر السّطحيّ، وهو يعمل على سحب القطرات إلى الشّكل الأصغر مساحة، وهو سطح الكرة. تستثنى من ذلك قطرات المطر الكبيرة جدًّا (وقطرها أكثر من 1 ملم) ، التي تسطّحها مقاومة الهواء لإنتاج شكل قرص أسفله منبسط ومنحنٍ قليلًا من الأعلى.

لمعلوماتك

■ الرّطوبة النّسبيّة مؤشر جيد على الراحة. فبالنسبة لمعظم الناس، تكون الظروف مثالية عندما تكون درجة الحرارة نحو 20 درجة سيليزية والرّطوبة النّسبيّة بين 50% و 60%. عندما تكون الرّطوبة النّسبيّة مرتفعة للغاية ، نشعر بالهواءِ "رطبًا وحارًّا"، لأنّ التكثف يمنع تبخر العرق. إنّ الهواء البارد الذي يحتوي على رطوبة عالية نسبيًّا أبرد من الهواء الجاف في درجة الحرارة نفسها بسبب زيادة التوصيل للحرارة من الجسم. عندما تكون الرّطوبة النّسبيّة عالية، يكون الطّقس الحار أكثر سخونة، والطّقس أبرد.

*ضغط البخار يقيس الشيء نفسه مثل الرّطوبة؛ أي كمية بخار الماء في الهواء. إنّ الرّطوبة وضغط البخار يصفان الشيء نفسه، ولكن لديهما وحدات مختلفة: فوحدة الرطوبة هي الجرام لكلّ متر مكعب. أمّا ضغط البخار فوحدته المليبار (أو ملليمتر من الزئبق).

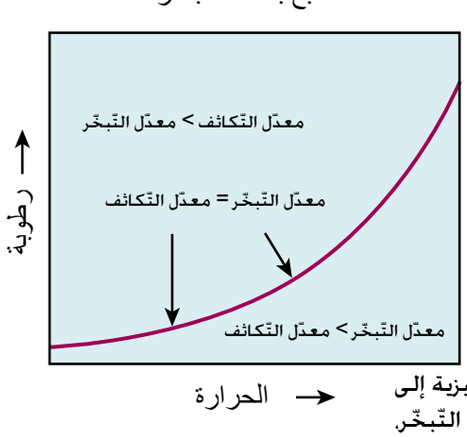
الجدول 1.25 ضغط بخار الإشباع والحرارة

درجة الحرارة	درجة الحرارة (فهرنهايت)	ضغط بخار
0	32	6.1
5	41	8.7
10	50	12.3
15	59	17.0
20	68	23.4
25	77	31.7
30	86	42.5
35	95	56.3

ومن المثير للاهتمام أنّ التّبخّر والتّكاثف يحدثان دائمًا دون توقف. وعندما يكون معدّل التّبخّر أكبر من معدّل التّكاثف، تكون الرّطوبة النّسبيّة أقل من 100%. وكلما زاد الفرق بين معدّلي التّبخّر والتّكاثف، انخفضت الرّطوبة النّسبيّة، وأصبح الهوء جافًّا.

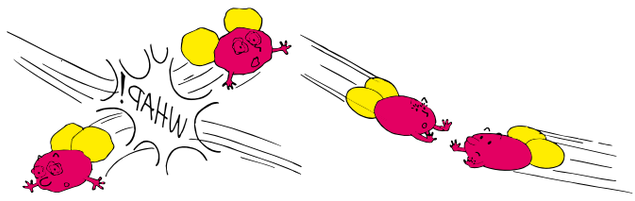
ومن ناحية أخرى، إذا كان معدّل التّكاثف أكبر من معدّل التّبخّر، فإنّ الهواء يصبح مشبعًا. وسيكون هناك فائض من بخار الماء. في مثل هذه الحالة، يتكاثف بخار الماء الزائد لتكوين الماء السائل؛ لأنّ معدّل التّبخّر ليس سريعًا بما يكفي لتحويل المياه السائلة التي أدخلت حديثًا إلى بخار قبل أن يتكاثف المزيد من المياه. ولأنّ الجزيئات التي تتحرك ببطء تميز درجات الحرارة الجوّيّة المنخفضة، فإنّ التشبع والتّكاثف، على الأرجح، يحدثان في الهواء البارد وليس الهواء الحار. الشّكل (2.25).

في المثال الوارد في الصفحة 664 عند درجة حرارة 10 سيليزية، كان معدّل التّبخّر يساوي معدّل التّكاثف، ولذلك كانت الرّطوبة النّسبيّة 100% وعندما ارتفعت درجة الحرارة من 10 درجات سيليزية إلى 20 درجة سيليزية، لم يتغير معدّل التكاثف، ولكن زاد معدّل التّبخّر. وعند زيادة درجة الحرارة، ومعدّل التّبخّر، وضغط بخار الإشباع، أمكن للهواء أن يستوعب المزيد من بخار الماء.

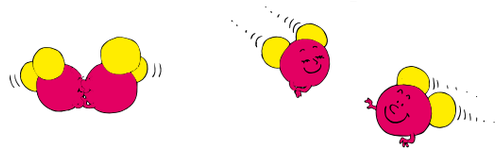


الشّكل 1.25

يمثل المنحنى في هذا الشّكل ضغط بخار التّشبّع مع درجة الحرارة والرّطوبة (ليست الرّطوبة النّسبيّة). على المنحنى ،الرّطوبة النّسبيّة 100% ومعدّل التّبخّر يساوي معدّل التّكاثف. أمّا تحت المنحنى، فالرّطوبة النّسبيّة أقلّ من 100% ومعدّل التّبخّر أكبر من معدّل التّكاثف. في حين يكون معدّل التّكاثف أكبر من معدّل التّبخّر فوق المنحنى ويحدث الهطل. يساعد هذا المنحنى على تفسير سبب شعورنا بأنّ أيام الصّيف الحارة رطبة وحارة جدًّا. لا يمكن لجلدك أن يبخّر المياه بسهولة. من المنحنى، هل يمكن رؤية أنّ الجو الحار له ضغط بخار تشبع أعلى من البارد؟



جزيئات H_2O سريعة الحركة ترتد عند التصادم



جزيئات H_2O بطيئة الحركة تتكاثف عند التصادم

الشّكل 2.25

تكاثف جزيئات الماء

كما انخفضت الرّطوبة النّسبيّة أيضًا، بسبب عدم إضافة أي بخار ماء؛ أي لم يعد الهواء مشبعًا عند درجة الحرارة الأعلى.

ماذا يحدث لو بدأنا بهواء درجة حرارته 20 سيليزية والرّطوبة النّسبيّة 60% ، ثم خفضنا درجة الحرارة إلى 10 درجات سيليزية؟ كلما انخفضت درجة الحرارة، قلّ معدّل التّبخّر. ولكنّ بخار الماء سيواصل التّكاثف بالمعدّل نفسه كما كان عندما كان الهواء عند 20°س. وسينخفض ضغط بخار التّشبّع ومعدّل التّبخّر. ولذلك، فإنّ الرّطوبة النّسبيّة سترتفع. في واقع الأمر، عندما تصل درجة حرارة الهواء إلى 12°س، فإنّ معدّلي التّبخّر والتّكاثف سيكونان على قدم المساواة، وستكون الرّطوبة النّسبيّة 100% ؛ أي أنّ الهواء يكون مشبعًا. ولكن عندما تنخفض درجة الحرارة دون 12°س، يحدث التّكاثف، وتتكون قطرات الماء السائل؛ المطر.

إنّ عمليتي التّبخّر والتّكاثف متعاكستان. إنّهما عمليتان لتغيير الماء بين الحالة السائلة والغازية. وكما نعلم، يتحوّل الماء السّائل إلى صلب- يتجمد- عند درجة 0°س. ويمكن أيضًا تغيير الماء من الحالة الصلبة إلى الغازية وبالعكس دون مروره بالحالة السّائلة. عندما يتغير الجليد مباشرة إلى بخار ماء، تسمّى العملية عندئذٍ *التسامي* (الفصل 7). أمّا *التّرسيب* فهي العملية المعاكسة؛ أي تغيّر بخار الماء مباشرة الى الجليد* .

لمعلوماتك

■ في طقس ممطر، عندما يتكون الضباب على زجاج سيارتك، تأكد من أنّ أجهزة تكييف الهواء تعمل على تبخيره، حتى عندما يهب الهواء السّاخن. إنّ الذي يسبب الضباب على النافذة هو الرّطوبة في السيارة بسبب المطر، والملابس، ونَفَس الرّكاب. ولأنّ الهواء الخارج من المكيّف جاف للغاية، فإنه يمسح الزجاج الأماميّ بشكل تامّ في وقت قصير جدًّا.

تغيّرات درجات الحرارة والتّكاثف

عندما ترتفع كتلة هواء تتمدد. يحدث التّمدد لأنّ الهواء يتحرك نحو منطقة ذات ضغط منخفض. وكما تعلمنا في الفصل 7، فإنّ الهواء يبرد عندما يتمدد. وقد يبدو هذا متناقضًا؛ لأنّ الهواء السّاخن يرتفع. ولكن الهواء المرتفع يجب أن يقوم بعمل على البيئة المحيطة من أجل التمدد. وفعل هذا العمل يستخدم طاقة، وهي التي تفقد على شكل حرارة. عندما يبرد الهواء، تتحرك جزيئات الماء ببطء، كما أنّ التّكاثف يفوق التّبخّر. يتشكّل الماء السّائل على جزيئات مجهرية من الغبار، والدخان ، والملح- *سحابة نوى التّكاثف*- لتكوين سحابة. ومع نمو قطرات السّحابة، فإنها تهبط على الأرض ويتكون المطر. ويعدّ المطر أحد أشكال الهطْل، إضافة إلى الأشكال الأخرى المألوفة كالضباب، والبرد، والثّلج، والمطر المتجمد.

لا يحتاج بخار الماء إلى أن يكون عاليًا في سحابة ليشكّل الهطْل- يمكن أن يحدث التّكاثف في الهواء قريبًا من الأرض. عندما يحدث التّكاثف في/أو بالقرب من سطح الأرض، نسميه *الندى* أو *الضباب* أو *الصّقيع*. ففي الليالي الصافية ، تبرد الأجسام القريبة من الأرض بسرعة أكبر من الهواء المحيط. كما يبرد الهواء. ومع انخفاض حرارة الهواء ينخفض ضغط بخار التّشبّع، ولا يمكن للهواء أن يستوعب بخار الماء، كما لو كان أكثر حرارة. وعندما تنخفض درجة الحرارة إلى ما دون عتبة معينة تسمّى *درجة حرارة نقطة الندى*، يصبح الهواء مشبعًا؛ أي أنّ الرّطوبة النّسبيّة 100%. ويحدث التّكاثف. في هذه الحالة ، ليست هناك حاجة إلى نوى التّكاثف. يتكاثف الماء من الهواء المشبع على أيّ سطح؛ غصن، أو ورقة عشب، أو زجاج أمامي لسيارة ، وهلمّ جرّا. ونحن ندعو هذا النوع من التّكاثف في كثير من الأحيان *ندى الصباح الباكر*؛ لأنه يحدث عندما تكون درجات الحرارة اليومية أبرد ما يمكن ، وذلك قبيل شروق الشمس. عندما تكون نقطة الندى عند/ أو أقلّ من درجة تجمد الماء، يحدث الصقيع ** . وعندما تبرد كتلة كبيرة من الهواء، وتصل إلى نقطة الندى، نحصل على سحابة قرب سطح الأرض تدعى الضّباب.

الشّكل 3.25
تعرف مدينة سان فرانسيسكو بالضباب الصّيفي

■ **اختبر معلوماتك**

ما الفرق الرّئيس بين الضّباب والسّحابة؟

هل كانت هذه إجابتك؟

الارتفاع.

* يشير مصطلح *التّرسيب* في مجال الأرصاد الجوّيّة إلى تحويل بخار الماء إلى مادة صلبة. وهو يختلف عن الطريقة التي تستخدم هذا المصطلح في الفصلين 20 و 23 ، حيث يشير التّرسيب فيهما إلى توضّع الرّواسب.

** من المثير للاهتمام أنّ الصقيع ليس الندى المتجمد. بل إنّ الصقيع تشكّل مباشرة من بخار الماء نتيجة للترسيب.

حساب العلوم الطبيعية

الرّطوبة

تعرف الرّطوبة بأنّها كتلة بخار الماء في وحدة الحجم من الهواء. والرّطوبة النّسبيّة هي نسبة بخار الماء في الهواء مقارنة بسعته من بخار الماء على درجة حرارة معينة.

افترض كتلة هواء مخبرية صغيرة عند درجة 30 مئوية ووزن 90 نيوتن (N) في المسائل الثلاث الآتية:

المسألة 1

إذا كانت كثافة *m* الهواء 1.25كج/م^3. فما حجم كتلة الهواء؟

الحل:

يخبرنا قانون نيوتن الثاني بأنّ

$$a = \frac{F}{m}$$

أعد ترتيب المعادلة

$$\text{الكتلة} = \frac{\text{القوة}}{\text{التسارع الجاذبي}} = \frac{90\ \text{N}}{10\text{m/s}^2} = 9\ kg$$

يمكن إيجاد حجم 9 كجم بالطريقة التالية

9كجم × 1م^3/1.25كجم= 7.2م^3

المسألة 2

إذا وجد 0.13 كجم من بخار الماء في كتلة الهواء فما رطوبة الكتلة الهوائيّة؟

الحل

الرّطوبة = كتلة الماء/حجم الهواء = 0.13/7.2

= 0.018 كجم/م^3

المسألة 3

على درجة حرارة 30° س. أقصى كمية بخار في الهواء 30 جم/م^3. ما الرّطوبة النّسبيّة لكتلة الهواء؟

الحل

أولا. نحول الوحدات

30جم/م^3×1كجم/1000جم= 0.03 كجم/م^3

الرّطوبة النّسبيّة = كمية بخار الماء/الحد الأقصى عند 30° س

0.018 كجم/م^3 / 0.03 كجم/م^3 × 100% =

60%

2.25 متغيّرات الطّقس

إنّ الضّغط الجوّيّ، ودرجة الحرارة، والكثافة، هي المتغيّرات الرئيسة الثلاثة التي تتحكم في كيفية سلوك الهواء. ولهذا، فإنها تتحكّم في الطّقس. ولفهم الطّقس والتنبؤ به، يجب علينا أن نفهم هذه المتغيّرات الثلاثة: أولاها الضّغط الجوّيّ: الهواء مزيج من الجزيئات التي تتحرك بشكل عشوائي ويتصادم بعضها مع بعض مثل كرات البلياردو على الطاولة. عندما يصطدم جزيء مع شيء ما، فإنه يمارس دفعة صغيرة على ما يضرب. هذا الدفع من قبل عدد لا يحصى من الجزيئات ينتج *الضّغط الجوّيّ*.

وكلما زادت سرعة تحرك جزيئات الهواء، زادت الطاقة الحركية لها. وكلما زادت الطاقة الحركية، زاد تأثير اصطدام الجزيئات، وزاد ضغط الهواء أيضا. وإذا تساوت العوامل الأخرى، فإنّ الهواء الذي يتكوّن من جزيئات سريعة الحركة -الهواء الدافئ، يمارس المزيد من الضّغط الجوّيّ على المناطق المحيطة بها مقارنة بالهواء الأبرد.

وهناك متغير ثان آخر يؤثر في ضغط الهواء هو الكثافة. كلما زادت كثافة الهواء، زاد عدد الجزيئات، وبالتالي زيادة عدد التصادمات الجزيئية. ويعني المزيد من الاصطدامات ضغطا أعلى للهواء. ويصبح الهواء أكثر كثافة عندما يكون مضغوطا، وأقلّ كثافة عندما يتوسع. وتحدث التغيرات في الكثافة لأنّ حجم كتلة معينة من الهواء يصغر بالانضغاط ويكبر بالتوسع.

العمليات الأديباتية في الهواء

يبيّن لنا مفهوم *التبادل الحراري* ترابطَ الضّغط الجوّيّ ودرجة الحرارة والكثافة. وعند إضافة الحرارة إلى كتلة الهواء، تزداد درجة حرارة الهواء أو الضّغط أو كلاهما.

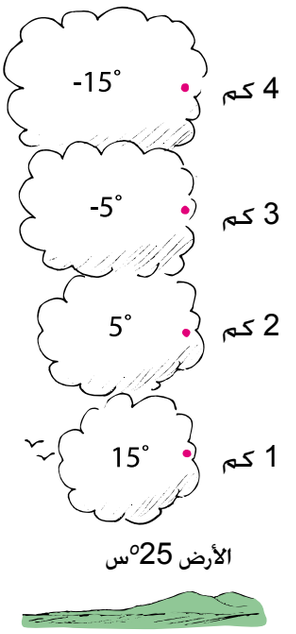
يمكن أن تضاف حرارة إلى الهواء من الأشعّة الشمسية، أو تكثيف الرّطوبة، أو الاتصال مع الأرض الدافئة. وعندما يتم طرح الحرارة من كتلة الهواء، تقلّ درجة حرارته أو ضغطه. ويمكن فقدان الحرارة من الهواء عن طريق الإشعاع إلى الفضاء، أو تبخر المطر الساقط من خلال الهواء الجاف، أو عن طريق الاتصال * مع السّطوح الباردة. ولكن يمكن تغيير درجة حرارة الهواء من دون خسارة أو كسب للحرارة. وعندما يكون انتقال الحرارة مساويا الصفر أو يكاد، تكون لدينا عملية **أديباتية** ***(Adiabatic process)*** (ثابتة الحرارة). تحدث العمليات الأديباتية عندما يتم توسيع الهواء أو انضغاطه. ولحدوث تغيرات أديباتية في درجات الحرارة، يجب أن يحدث توسيع أو انضغاط سريعان بما يكفي لعدم حدوث تبادل حراري في الوقت الذي يتغير فيه الحجم. ولمعرفة كيف تتصرف كتل الهواء؛ تصوّر جسما من الهواء محاطا بطبقة بلاستيكية رقيقة جدا، كحقيبة مثلا. ومثل بالون حرّ، يمكن أن تتوسّع الحقيبة أو تنكمش بحرية دون نقل الحرارة إلى الهواء الخارجي.

تذكر من الفصل 24 أنّ الضّغط الجوّيّ يتناقص مع الارتفاع. على سبيل المثال، مع تدفق الهواء على جانب أحد الجبال، تتناقص الضغوط التي تمارس عليه، سامحة لحقيبة الهواء بالتوسيع والتبرد دون أيّ تبادل حرارة. هذه التغيرات في درجات الحرارة ، الناجمة عن التغيرات في الضّغط تسمّى *قانون الغاز المثالي***

الضغط ~ الكثافة × الحرارة

على افتراض وجود تغييرات طفيفة نسبيا في كثافة الهواء، والتي تحدث عموما في الغلاف الجوّيّ السفلي، ينصّ قانون الغاز المثالي على أنّ درجة الحرارة تنخفض عندما ينخفض الضّغط. ونحن نعرف أنّ ضغط الهواء ينخفض عندما يتمدد الهواء. وفي المقابل ، ترتفع درجة الحرارة عندما يرتفع الضّغط - يرتفع ضغط الهواء عندما ينضغط الهواء. هل يمكنك الآن أن ترى بوضوح أكبر أنّ كتلة من الهواء تقل درجة حرارتها عندما ترتفع، وأنّ درجة حرارة الهواء تزداد عندما يهبط. وفقا لقانون الغاز المثالي، لا تتطلب تغيرات درجة الحرارة هذه خسارة أو كسبا في الحرارة- فهي أديباتية.

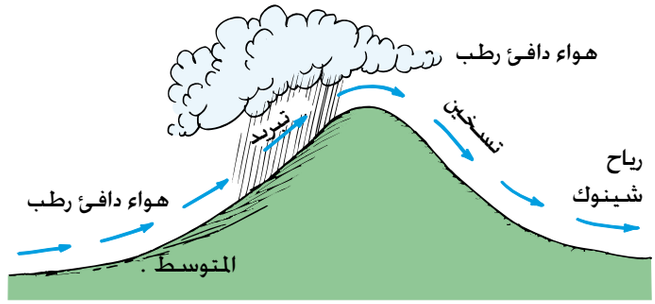
تقلّ درجة حرارة الهواء الجاف‡ 10 درجة مئوية لكلّ كيلومتر ارتفاع (الشّكل 4.25) مع التمدد الأديباتي. يدعى هذا المعدّل لتبريد الهواء الجاف **معدّل التّبريد الذّاتيّ للهواء الجاف *(dry adiabatic lapse rate)***. إنّ تدفّق الهواء فوق الجبال أو ارتفاعه في العواصف الرّعديّة، قد يغيرا لارتفاع عدة كيلومترات. وهكذا، فعندما ترتفع كتلة هواء جاف درجة حرارتها 25 درجة مئوية عند مستوى سطح الأرض 6 كيلومترات، تنخفض درجة حرارتها إلى التجمد 35- درجة مئوية! ومن ناحية أخرى، إذا كان الهواء على الارتفاع 6 كم، عند درجة حرارة غطية مقدارها 20- درجة مئوية، ونزل إلى سطح الأرض ، ترتفع درجة حرارته إلى 40°!



الشّكل 4.25

حرارة عينة هواء جاف متمددة مع ثبات الحرارة 10 °س لكلّ كيلومتر ارتفاع

إنّ العمليات الأديباتية لا تقتصر على الهواء الجاف. فعندما يبرد الهواء مع الارتفاع، تقلّ قدرته على استيعاب بخار الماء، وتزيد الرّطوبة النّسبيّة. وإذا برد الهواء إلى نقطة الندى، فسترتفع الرّطوبة النّسبيّة إلى 100% . ويتكاثف بخار الماء، وتتشكل الغيوم؛ ولأن التكثف ينتج حرارة (الفصل 7) ، فإنّ الكتلة الهوائيّة تسخن. إنّ الحرارة تتعارض إلى حد ما مع التّبريد نظرا للتمدد، وهذا يجعل تبريد الهواء في معدّل أقل - *معدّل التّبريد الذّاتيّ للهواء الرطب*. وعلى الرغم من أن معدّل التّبريد للهواء الرطب يختلف وفقا لدرجة الحرارة ومحتوى الرّطوبة في الهواء ، فإن الهواء المشبع يبرد نحو 6 درجات مئوية لكل كيلومتر ارتفاع تقريبا في



ومن الأمثلة المثيرة للتسخين الأديباتي رياح *شينوك*، وهي رياح جافة تهب باستمرار من جبال روكي عبر السهول الكبرى . (الشكل 5.25).

الشّكل 5.25

شينوك- رياح جافة دافئة- تحدث عندما يهبط هواء مرتفع ويسخن أديباتيا.

---

*كما تعلمنا في الفصل 7، يزيل التّبخّرُ الحرارةَ من البيئة المحيطة.

** يرتبط قانون الغاز المثالي بقانون بويل الذي نوقش في الفصل 5.

‡ طرد الهواء الجاف هو طرد للهواء غير المشبع . الرّطوبة النّسبيّة أقل من 100%.

ينضغط الهواء البارد المتحرك نحو أسفل المنحدر في أثناء تحركه إلى الارتفاعات الدنيا (حيث ضغط الهواء أكبر مما كان عليه في المرتفعات) .ويصبح أكثر حرارة. يبدو تأثير تمدد أو انضغاط الغازات مثيرا للغاية* .

استقرار الغلاف الجوّيّ

لنفرض عينة من الهواء المتحدر من مرتفع. إن الضّغط الجوّيّ في الارتفاعات المنخفضة أكبر من ضغط الهواء عاليًا. لذا، يتم انضغاط الهواء عندما ينزل مسببا ارتفاع حرارته. إذا ارتفعت درجة حرارة الهواء النازل ليصبح أكثر حرارة، وبالتالي أقلّ كثافة من الهواء على ارتفاع منخفض، فإنه سيرتفع مرة أخرى إلى الارتفاع الذي جاء منه. وبالقياس ، فكر في ما يحدث عندما تحاول إغراق أداة عائمة، أقلّ كثافة من الماء، في بركة سباحة. تكون الأداة العائمة والهواء النازل في هذا المثال على حدّ سواء، مستقرة بالنسبة لبيئاتها. إنها "تسخنّ" لتعود إلى مواقعها الأصلية.

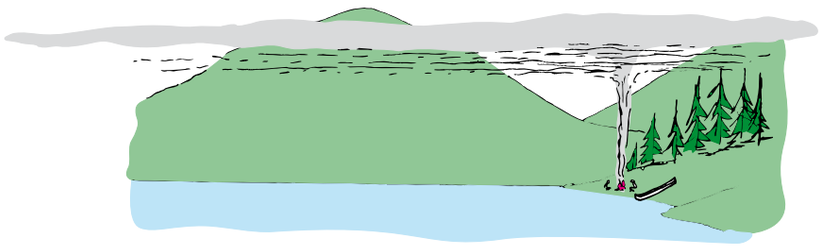
افرض أنّ كتلة الهواء اضطرت إلى الارتفاع. مثل هذا الهواء يتمدد كلما ارتفع ويصبح أكثر برودة. إذا كانت درجة حرارة الهواء المرتفع أكثر برودة من الهواء المحيط، فإنه يصبح أكثر كثافة، ويعود إلى الهبوط نحو المكان الذي جاء منه. هذا أيضا هواء مستقر.

ومن ناحية أخرى، إذا كان الهواء المرتفع أكثر حرارة من الهواء المحيط ، فإنه يستمر في الارتفاع بدلا من العودة إلى نقطة الانطلاق. هذا *الهواء غير مستقر*. في نهاية المطاف ، يتمدد الهواء ويبرد بما فيه الكفاية لمطابقة الهواء المحيط. عندما تتساوى درجات الحرارة، لا يرتفع الهواء أبعد من ذلك، ولا ينزل مرة أخرى إلى نقطة الانطلاق. ومن ثم، يرتفع الهواء غير المستقر، ولكن الهواء المستقر يتوقف. تستخدم بالونات الهواء الساخن هذه الاستراتيجية في الصعود أو النزول إلى المستوى المطلوب. تضاف حرارة إلى الهواء في البالون لجعله يرتفع، ويُسمح للهواء داخل البالون بأن يبرد كي ينزل.

إنّ الهواء المحيط ذو دور مهم في تحديد ما إذا كان الهواء مستقرا أو غير مستقر. في ظل الظروف العادية، تتناقص درجة حرارة الهواء مع الارتفاع. ويصف معدّل التّبريد الذّاتيّ البيئيّ الطريقة التي تحدث فيها التغييرات مع الارتفاع. يشير *معدّل التّبريد الذّاتيّ البيئيّ المنخفض* إلى أنّ درجات الحرارة تنخفض لكلّ متر من الارتفاع بمقدار أقل مما لو كان المعدّل مرتفعا. يختلف معدّل التّبريد الذّاتيّ من مكان إلى آخر ومن يوم إلى يوم ، حتى أنه قد يختلف في مدى اليوم الواحد! متوسط معدّل التّبريد الذّاتيّ هو انخفاض قدره 6.5 درجة مئوية لكل كيلومتر في الارتفاع.

يستمر الهواء المرتفع في الارتفاع طالما أنه أكثر حرارة وأقلّ كثافة من الهواء المحيط. ولكن الهواء الأبرد والأكثر كثافة من المناطق المحيطة يفعل العكس: إنّه ينزل. بوجود بعض الشروط ، كتل هواء بارد كبيرة تبقى على ارتفاعات منخفضة. وهذا ناجم عن أنّ الهواء فوقه أكثر حرارة. وعندما تكون المناطق العليا من الغلاف الجوّيّ أكثر حرارة من المناطق السفلى، وهو عكس ما يحدث عادة ، يحدث **انعكاس درجة الحرارة *(temperature inversion)***. في مثل هذه الحالات، لا يمرّ الهواء المرتفع إلى الأعلى من خلال الطبقة العليا من الجو الأكثر حرارة؛ لأنّ الهواء المرتفع أبرد وأكثر كثافة.

وعلى نطاق ضيّق، يمكن رؤية دليل وجود انعكاس لدرجة الحرارة بسهولة فوق بحيرة باردة عندما تنتشر الغازات المرئية والجسيمات الصغيرة كالدخان في طبقة مسطحة فوق البحيرة بدلا من الارتفاع والتشتت أعلى في الغلاف الجوّيّ (الشّكل 6.25).



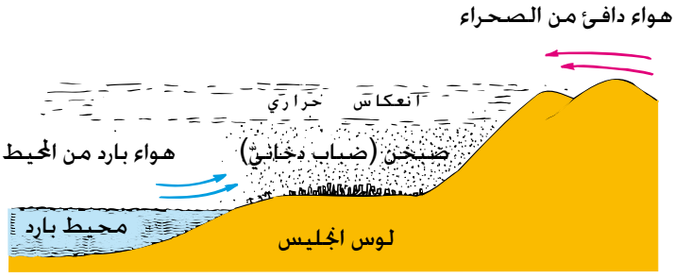
الشّكل 6.25

طبقة دخان مخيم فوق البحيرة يدل على انعكاس حراري. الهواء الأعلى من الدخان أكثر حرارة من الدخان أمّا الهواء الأسفل منه فأبرد.

لمعلوماتك

■ حتى ترى أن تمدد الهواء يبرده، انفخ على يدك مع فتح فمك. لاحظ دفء الهواء. كرر هذا، ولكن مع ضمّ شفتيك بحيث تصبح فتحة فمك صغيرة جدّا. في هذه المرة ، يتمدد النفس عندما يترك فمك؛ إنّها باردة!

* عندما كنت تطير على ارتفاعات عالية حيث درجة حرارة الهواء الخارجي عادة 35- درجة مئوية، كنت تشعر بالراحة كثيرا في المقصورة الدافئة؛ ولكن ليس بسبب التدفئة. عملية ضغط الهواء الخارجي للحفاظ على الضّغط في قمرة القيادة الى ما يقرب من الضّغط الجوّيّ عند مستوى سطح البحر يسخن الهواء الى 55 درجة مئوية (131 درجة فهرنهايت). لذا، يجب أن تستخدم مكيفات الهواء لاستخلاص الحرارة من الهواء المضغوط.



الشّكل 7.25
ضباب دخاني (ضبخن) في لوس أنجلوس محاصر بالجبال. وانعكاس الحرارة الناجم عن الهواء الدافئ من صحراء موجافي يعلو الهواء البارد من المحيط الهادئ.

ضبخن (ضباب دخاني) لوس انجليس محاصر بمثل هذا الانعكاس الناجم عن هواء بارد من المحيط. تعلوه طبقة من هواء ساخن يتحرك غربا فوق الجبال من صحراء موهافي الساخنة. يساعد الجانب الغربي من الجبال على حصر الهواء المحبوس (الشّكل 7.25). تقوم جبال روكي في الحافة الغربية لدنفر بدور مماثل في محاصرة الضبخن تحت الانعكاس الحراري.

لمعلوماتك

■ الهواء المستقر الذي أجبر على الارتفاع ينتشر أفقيّا. عندما تتكون الغيوم في هواء مستقر، فإنها تنتشر على شكل طبقات رقيقة أفقية ذات قمم وقيعان مسطحة. يفضل الهواء غير المستقر الحركة التصاعدية.
عندما يصبح الهواء غير المستقر رطبا، تتكون سحب متموجة وشاهقة.

■ **نقطة فحص**

1. إذا تمددت كتلة من الهواء الجاف عند 0 درجة مئوية في أثناء تدفقها الصاعد إلى جانب الجبل، فما هي درجة الحرارة عندما ارتفاع 2 كم وعند ارتفاع 5 كم أيضا؟
2. ماذا يحدث لدرجة حرارة الهواء في واد عندما ينزل هواء بارد جاف إلى الوادي؟
3. عندما يكون الهواء مستقرا، فإنه يقاوم الحركة العمودية. ولكن عندما يكون الهواء غير مستقر، فإنه يريد الارتفاع إلى مستوى مستقر بحيث تساوي درجة الحرارة الجوّيّة درجة الحرارة في المناطق المحيطة بها. وفي مثال الانعكاس الحراري هل الهواء مستقر؟

هل كانت هذه إجابتك؟

1. الهواء يبرد في معدّل تبريد للهواء الجاف مقداره 10 درجات مئوية لكلّ كيلومتر ارتفاع. عندما يرتفع الهواء إلى علوّ 2 كم ، تكون درجة الحرارة 20- درجة مئوية. ولكن درجة الحرارة على ارتفاع 5 كم تكون 50- درجة مئوية.
2. يتم ضغط الهواء أديابانيًّا. لذا، ترتفع درجة حرارته. يستفيد سكان بعض المدن من الضغط الأديباتي، في وادي جبال روكي، مثل ساليدا، وكولورادو، ويستمتعون بهذا الطقس" حزام الموز" في منتصف الشّتاء.
3. يحدث انعكاس في درجة حرارة الجو عندما يعتلي هواءٌ دافئٌ هواءً باردًا. الهواء في هذا الوضع مستقر جدا- الهواء الأكثر كثافة وبرودة لا يمكن أن يرتفع فوق الهواء الأقلّ كثافة، والأكثر حرارة. وهكذا، فإنه يقاوم الحركة العمودية.

■ 3.25 تطوّر الغيوم

تزداد الرّطوبة النّسبيّة عندما يرتفع هواء غير مستقر لأنّ الهواء يبرد تبعا لمعدّل التّبريد الذّاتيّ للهواء الجاف. وعلى ارتفاع معين، تصل الرّطوبة النّسبيّة إلى 100%، ويصبح الهواء مشبعا. إنّ هذا الارتفاع هو **مستوى تكاثف الرّفع** (***lifting condensation level***).

ومع استمرار ارتفاع الهواء، يبرد تبعا لمعدّل تبريد الهواء الرطب. ولكن الأهم من ذلك أنّ معدّل التّكاثف يتجاوز معدّل التّبخّر فوق مستوى تكاثف الرّفع: تبدأ قطرات السّحابة بالتّشكّل. يعدّ مستوى تكاثف الرّفع الأساسَ في تكوين السّحب. تستمر الكتلة الهوائية في الارتفاع حتى تبرد بما يكفي لمباراة درجة حرارة الهواء المحيط. على هذا الارتفاع، تتوقف كتلة الهواء عن الارتفاع. ويكون معدّل التّكاثف مساويا لمعدّل التّبخّر. وهذا هو مستوى التوازن: الهواء الآن مستقر. يَسِمُ مستوى التوازن الحدّ الأعلى لتكون السّحب.

الجدول 2.25 مجموعات الغيوم الأربع الرئيسة

1.الغيوم العالية (أعلى من 6000م)	3 .الغيوم المنخفضة (أقل من 2000م)
سيروس: سمحاق	ستراتوس : طبقيّ
سيروستراتوس : طبقيّ سمحاقيّ	ستراتوكوميولاس: ركاميّ طبقي
سيروكوميولاس: ركام سمحاقيّ	نمبوستراتوس: طبقي مزني
2 .الغيوم المتوسطة (6000-2000م)	4 .الغيوم المتطوّرة عموديًا
ألتوستراتوس : طبقيّ متوسط الارتفاع	كوميولاس: ركاميّ
ألتوكوميولاس: ركاميّ متوسط الارتفاع	كوميولونمبوس: ركاميّ مزنيّ

تختلف نُطُقُ ارتفاع الغيوم في المجموعات الرئيسة مع الفصل وخطّ العرض. أيضا، تمتد بعض الغيوم عموديا في أكثر من مدى ارتفاع.

الغيوم لا تطفو فهي مدعومة حتى من قبل حزام هواء ناقل غير مرئي. الغيوم تتحرك دائمًا.

يعتمد ارتفاع مستوى التوازن على معدّل التّبريد الذّاتيّ البيئيّ. ولأنّ معدّل التّبريد الذّاتيّ يصف التّغيّرات في درجات الحرارة للهواء المحيط، فإنّ الارتفاع الذي تصبح فيه كتلة الهواء مستقرة يمكن أن يكون متغيرا.

ملخّص: يبرد الهواء المرتفع تبعا لمعدّل التّبريد الذّاتيّ للهواء الجاف حتى يصل درجة التّشبّع. بعد التّشبّع، يتحكم معدّل تبريد الهواء الرّطب في سمك السّحابة. لذا، فإنّ ارتفاع قاعدة سحابة وسمكها يعتمد على ثلاثة متغيّرات هي: معدّل التّبريد الذاتي البيئيّ، ومعدّل التّبريد الذّاتيّ للهواء الجاف، ومعدّل التّبريد الذّاتيّ للهواء الرطب.

تصنّف الغيوم تبعا لارتفاعها وشكلها. وهناك عشرة أشكال للغيوم، ينتمي كلّ منها إلى واحدة من أربع مجموعات رئيسة (الجدول 2.25)

■ **نقطة فحص**

إلامَ يشير معدّل التّبريد الذّاتيّ البيئيّ؟

هل كانت هذه إجابتك؟

يشير معدّل التّبريد الذّاتيّ البيئيّ إلى تغير درجة حرارة الهواء مع الارتفاع. فهو يصف التغيرات في درجات حرارة الهواء الذي تمر خلاله كتلة هوائية. يختلف معدّل التّبريد الذّاتيّ البيئيّ مع الظروف المحلية. وفي المتوسط ، يبلغ المعدّل نحو 6.5 درجة مئوية لكلّ كيلومتر ارتفاع.

الغيوم المرتفعة

السّحب العالية هي التي تتشكّل على ارتفاع أكبر من 6000 متر. السّحب العالية (سوى سحب سِرّس) يوضع لها بادئة *سرّو cirro-* . يكون الجو في هذا الارتفاع باردا وجافا، ولهذا تتكون الغيوم على هذا الارتفاع كلّها تقريبا من بلورات الجليد.

الغيوم العالية الأكثر شيوعا رقيقة ومتقطعة، وهي غيوم سِرّس. تهب غيوم *سِرّس* عن طريق الرياح العالية في شكلها الناعم المعروف، مثل"ذيل الفرس" أو" فرشاة الفنان". تشير غيوم سِرّس عادة الى طقس معتدل، ولكنها قد تشير أيضا إلى اقتراب المطر.

غيوم *سيروكوميولاس* هي نفثات بيضاء مألوفة مدورة. توجد في بقع، ونادرا ما كانت تغطي أكثر من جزء صغير من السّماء. إنّ موجات صغيرة تجعل هذه الغيوم تبدو مثل العلامات على جسم سمكة الماكريل. ولهذا، فإنّ غيوم سيروكوميولاس تكوّن سماء مبقعة مثل سمكة الماكريل.

لمعلوماتك

■ تسمّى مونتانا"بلد السّماء الكبيرة" بسبب ارتفاع مستوى تكاثف الرّفع. المناخ الجاف يعني أن قواعد السّحاب عادة ما تكون في السّماء ، وبالتالي تبدو السّماء"أكبر.

(أ)

(ب)

(ج)

(د)

الشّكل 8.25
مجموعات الغيوم الأربع
(أ) الغيوم المرتفعة: سِرّس، سِرّس المتطبقة، وسِرّس التراكمية
(ب) الغيوم المتوسطة: المرتفعة المتطبقة، والمرتفعة التراكمية
(ج) الغيوم المنخفضة: المتطبقة، والمتطبقة التراكمية، ونمبو المتطبقة
(د) الغيوم العمودية: التراكمية، وكميولونيمبوس

أمّا غيوم *سيروستراتوسُ* فهي رقيقة وذات شكل صفائحيّ. وكثيرا ما تغطي السّماء كلّها. بلورات الثلج في هذه الغيوم تكسر الضوء. وتنتج هالة حول الشّمس أو القمر. عندما تزداد سماكة غيوم سيروستراتوس فإنها تعطي السّماء لونا أبيض ساطعا. مؤشرا على مطر أو ثلج مقبل.

الغيوم المتوسطة

تتشكّل الغيوم المتوسطة بين 2000م و 6000 م. ويرمز إليها بالبادئة ألتو -*alto*. تتألف هذه السّحب من قطرات الماء. وعند درجة حرارة مناسبة. فإنّها تتألف من بلورات ثلج.

لون غيوم *التوستراتس* رمادية إلى رمادية زرقاء. وهي كثيرا ما تغطي السّماء لمئات من الكيلومترات المربعة. وهذه الغيوم غالبا ما تكون سميكة بحيث تشتّت ضوء الشّمس القادم إلى الحدّ الذي لا يوجد للأجسام على الأرض ظلّ. كما أنّها تتشكّل غالبا قبل العاصفة. انظر صوب الأرض وأنت تسير في نزهة. فإنْ لم تستطع رؤية ظلك. فتجاوز عما كنت مخططا له!

أمّا *التوكوميولاس* فهي غيوم رمادية. كما أنّها كتل منتفخة في تموجات أو حُزُم متوازية. النفثة الواحدة هي أكبر بكثير من تلك الموجودة في سحب سيروكوميولاس. ولونها أغمق. إنّ ظهور سحب التوكوميولاس في الأيام الحارة الرطبة من الصّيف غالبا ما يشير إلى عواصف رعدية بعد الظهر.

الغيوم المنخفضة

تبدأ الغيوم المنخفضة من السطح حتى ارتفاع 2000 م وتسمّى غيوم *ستراتوس*. وهي تتكون من قطرات الماء على الأغلب. ولكنها قد تحتوي أيضا على بلورات الجليد والثلج في الطّقس البارد. هذه الغيوم تكون رمادية. وعادة تغطي كامل السّماء.

وهي شائعة جدًّا في فصل الشّتاء. كما أنها تسبب" سماء ضبابية في فصل الشّتاء". إنها تشبه الضباب العالي الذي لا يلامس الأرض. وعلى الرّغم من أنّ غيوم ستراتوس ليست على صلة مباشرة مع الهطل، إلا أنّها تولّد أحيانًا رذاذًا أو ضبابًا خفيفًا.

تتشكّل سحب *ستراتوكوميولاس* إما منخفضة، بشكل طبقة عقدية تنمو في صفوف أفقيًّا، أو بقع، أو مع حركة ارتفاع ضعيفة، تبدو وكأنها كتل مدورة. لونها رمادي غامق على الأغلب. ولمعرفة الفرق بين غيوم التوكوميولاس وغيوم ستراتوكوميولاس: مدّ يدك على طول ذراعك وأشر نحو السّحابة في السّؤال. سحابة التوكوميولاس تبدو عادة في حجم إبهامك؛ أمّا سحابة الستراتوكوميولاس فتبدو بحجم قبضة اليد. إنّ هطل المطر أو الثلج لا ينتج عادة عن غيوم الستراتوكوميولاس.

لاحقة (نمبوس nimbus) تعني "إنتاج الأمطار".

غيوم *نيمبوستراتوس* مظلمة وتوحي بالتشاؤم. فهي سحب تبدو رطبة مرتبطة بالمطر أو الثلج المعتدل.

الغيوم المتطوّرة رأسيًّا

إنّ السّحب الرّكاميّة أكثر شيوعًا من أنواع السّحب الكثيرة. فهي تشبه قطعة من القطن عائمة، مع حواف حادة وقواعد منبسطة. لونها أبيض إلى رمادي فاتح، وتتكوّن بشكل عام على 1000 متر فوق سطح الأرض. إنّ قمم السّحب الرّكاميّة غالبًا ما تكون على شكل أبراج مرتفعة، مما يدل على أعلى حدّ لارتفاع الهواء. هذه هي غيوم أحلام اليقظة في فترة الطفولة! هل رأيت في أيّ وقت مضى القلاع أو الأشكال من الحيوانات في السّحب؟

عندما تتحول السّحب الرّكاميّة الى معتمة ويرافقها تساقط الأمطار، يشار إليها بالسّحب المكفهرة (كوميولونيمبوس). في هذه الحالة، فإنها تشير إلى وجود عاصة مقبلة. وكما سنرى، فإنّ السّحب المكفهرة غالبًا ما تصبح قمم العواصف الرّعديّة.

الهطل

يجب أن تحدث العديد من الأشياء قبل حدوث الهطل.. كل خطوة تجري نحو الهطل هي جزء من عملية *اصطدام – التحام collision-coalescence*. أول متطلب لذلك هو وجود غبار؛ نوى التّكاثف. وقد نوقش سابقًا في هذا الفصل.

إنّ بخار الماء أقلّ كثافة من الهواء. ولكن عند تشكّل رذاذ السّحابة، فإنّ القطرات تكون أكثر كثافة من الهواء كثيرًا. تسحب قوة الجاذبية القطرات نحو الأسفل بما يكفي لجعلها تسقط. فلماذا لا تسقط قطرات الماء كلّها في سحابة على الأرض؟ الجواب ينطوي على الانحراف نحو الأعلى: الحركة التصاعدية للهواء. تحتوي السّحابة الرّكاميّة على تيار صاعد بسرعة لا تقلّ عن 1 م / ث ، وهي أسرع من وقوع الرذاذ. لذا تطفو القطرات بسبب الهواء المتصاعد. ومن دون التيارات الهوائيّة، تهبط القطرات ببطء نحو الأسفل، وتتبخر بسرعة بحيث لا تكون لديها فرصة للوصول إلى الأرض. وتحلّ مكانها قطرات تشكّلت حديثًا.

وفي عملية الاصطدام - الالتحام، تتجمع قطرات صغيرة لتشكّل مجموعة من القطيرات بمختلف الأحجام. وفي وقت مبكر، تكون التيارات الصاعدة أقوى من حركة الهبوط في القطيرات، وتهب القطيرات جميعها مرارًا وتكرارًا إلى أعلى، ولا يسقط مطر. ومع نمو القطيرات، فإنها تسقط أخيرًا بالمعدّل نفسه للتيار الصاعد ليصبح ثابتًا تقريبًا. لكن القطيرات تخضع لقصف مستمر من قطيرات أصغر مرتفعة مع التيار الصاعد. يشبه هذا النوع من القصف، رشق حبيبات الرمل الصغيرة الشّخص الواقف على الشاطئ عندما تهب رياح قوية ومستمرة. يحدث هذا نموًّا كبيرًا في القطيرات. وأخيرًا، تنمو قطرات الماء الثابتة أكثر، وتصبح ضخمة مقارنة بقطيرات السّحب؛ تصبح قطرات مطر. ولأنّ سقوط قطرات المطر يكون أسرع من التيار الصاعد، يحدث الهطل. تتطلب هذه العمليـــة تطوّرًا عمـــوديًّا في السّحابة، وإلا فإنه لا يوجد اصطدام بين القطـــيرات بما يكـــفي لنمـــو القطيرات الفردية لتصبح كبيرة وتبلغ نقطة الثبات. لذا فإن وجود غيوم

لمعلوماتك

■ السّحب الرّكاميّة أكثر كثافة من الهواء المحيط. فلماذا لا تهبط؟ والجواب هو أنها تسقط! إنها تسقط بالسرعة نفسها لارتفاع الهواء. فهي لا تزال ثابتة في الارتفاع. ودون التيارات الصاعدة لن تكون هناك أيّ غيوم ركامية.

الجدول 3.25 تصنيف كتل الهواء وخصائصها

منطقة المصدر	التّصنيف	الرّمز	الخصائص
القطب الشّماليّ	قطب متجمد مائيّ	mA	بارد، رطب، غير مستقر
جرينلاند	قطب متجمد قاريّ	cA	بارد، جاف، مستقر
شمال الأطلسي والمحيط الهادئ	قطب مائيّ	mP	بارد، رطب، غير مستقر
كندا وسيبيريا	قطب قاريّ	cP	بارد، جاف، مستقر
البحر الكاريبي وخليج المكسيك	مداريّ مائيّ	mT	دافئ، رطب، عادة غير مستقر
المكسيك وجنوب غرب الولايات المتحدة	مداريّ قاريّ	cT	حار، جاف، علوي مستقر، غير مستقر عند السطح

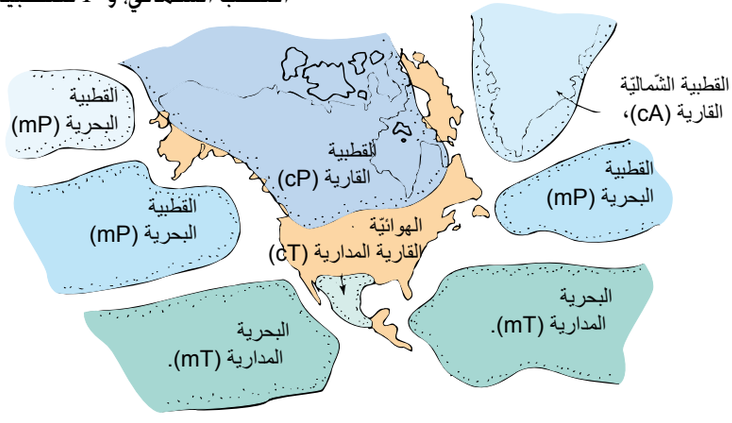
أكثر سمكًا يعني فرصة أعلى للمطر- وفرصة أعلى لمطر غزير. تعطي الغيوم الأسمك القطيرات مزيدًا من الوقت والفضاء حتى تندمج في قطرات ثقيلة بما يكفي للتساقط.

تتشكّل قطرات المطر؛ لأنّ معدّل التّكاثف يتجاوز معدّل التّبخّر. لكن قطرات المطر تتقلص عندما تسقط لأنها عندما تغادر السّحابة يصبح معدّل التّبخّر أعلى من معدّل التّكاثف. ولكن التّبخّر يكون عاليًا في بعض الأحيان، بحيث تختفي قطرات المطر قبل أن تصل الأرض. وعندئذٍ تسمّى هذه الأمطار *فيرجا virga*.

4.25 الكتل الهوائيّة والجبهات والعواصف

الكتلة الهوائيّة هي حجم من الهواء أكبر كثيرًا من الطرد (جمع طرود *parcel*) الهوائي الذي ناقشناه حتى الآن. تغطي كتل هوائية متميزة أجزاء كبيرة من سطح الأرض. ولكلّ خصائصها. تختلف كتلة الهواء التي تشكّلت على المياه الاستوائية عن تلك التي تتشكّل على الأرض في المناطق القطبية. تنقسم الكتل الهوائيّة إلى ست فئات عامة وفقًا لنوع الأراضي، أو المياه، أو خطوط العرض التي تشكّلت عليها (الجدول 3.25 والشّكل9.25). يشار إلى نوع السّطح الذي تتشكّل كتلة الهواء عليه بحرف صغير (m للبحري، وc للقاري). في حين يشار إلى منطقة المصدر التي تتشكّل الكتلة الهوائيّة فيها بحرف كبير (A لمنطقة القطب الشّماليّ، و P للقطبية، وT للمدارية.)

الشّكل 9.25
المناطق المصدرة للكتل الهوائيّة في أمريكا الشّماليّة



وعمومًا تنتج الكتل الهوائيّة القطبية القارية (cP) والقطبية الشّماليّة القارية (cA)، طقسًا باردًا جافًّا في فصل الشّتاء، وباردًا لطيفًا في الصّيف. تلتقط الكتلُ الهوائيّة القطبية البحرية (mP) و القطبيةُ الشّماليّة البحرية الرّطوبةَ في أثناء تنقلها عبر المحيطات، فتجلب طقسًا باردًا رطبًا إلى المنطقة. أمّا الكتل الهوائيّة القارية المدارية (cT) فهي المسؤولة عمومًا عن الطّقس الحار الجاف في الصّيف. في حين تنشأ الظروف الدافئة الرطبة عن الكتل الهوائيّة البحرية المدارية (mT). لذلك فإنّنا نرى أنّ مختلف أنواع الكتل الهوائيّة ذات سمات خاصة لكلّ منها. وعندما تلتقي كتلتان هوائيتان مختلفتان تتطور ظروف طقس متنوعة.

رفع الغلاف الجوّيّ

تعدّ الغيوم مؤشرات جيدة على الطّقس. للحصول على السّحب، لا بدّ من رفع الهواء. إنّ آليات الرّفع الرئيسة الثلاث في الغلاف الجوّيّ هي: رفع تيارات الحمل (أو الرّفع الحملي)، والرّفع الجبليّ، ورفع الجبهات.

رفع تيارات الحمل

يتم تسخين سطح الأرض بشكل غير متساو؛ حيث تمتصُّ بعضُ المناطق الطاقةَ الشمسية على نحو أفضل من غيرها. ولذلك تسخن بسرعة أكبر. إنّ الهواء الذي يمسّ هذهِ "النقاط الساخنة" يصبح أكثر حرارة من الهواء المحيط، ويرتفع ويتمدد ويبرد. ويرافق ارتفاع الهواء هواء بارد هابط من أعلى. إنّ الحركة الدورانية تنتج تيارات الحمل(*Convential lifting*).

وإذا حدث التّبريد بالقرب من درجة حرارة التّشبّع في الهواء، فإنّ الرّطوبة المتكاثفة تنتج سحابة ركامية. يتحرك الهواء داخل سحابة الرّكام في دورة هي ارتفاع الهواء الحار وهبوط الهواء البارد. ولأنّ الهواء البارد النازل يحول دون تمدد الهواء الحار تحتها، فإنّ السّحب الرّكاميّة الصغيرة عادة ما تحوي مناطق متسعة من السّماء الزرقاء بينها (الشّكل 10.25).

تبقى الغيوم الرّكاميّة غالبًا في الأماكن التي تشكّلت فيها، وتتشتّت وتتكوّن مرات كثيرة. وعندما تكبر فإنها تظلل الأرض تحتها من الشمس، وهذا يؤدي إلى إبطاء تسخين السّطح، ويحول دون انتقال الهواء الحار إلى أعلى. ومن دون إمدادات مستمرة من ارتفاع الهواء فإنّ سحابة الرّكام تبدأ في التلاشي. وإذا اختفت السّحابة فسيعاد تسخين الأرض، والسماح للهواء فوقه بالتسخين والصعود. وهكذا يبدأ من جديد رفع تيارات الحمل، ويبدأ تكوّن الغيوم الرّكاميّة في المكان نفسه.

الرفع الجبلي

تخضع كتلة الهواء التي يتم دفعها تصاعديًّا فوق عقبة، مثل سلسلة جبال. **للرفع الجبلي (*orgraphic lifting*)**: الهواء المرتفع يبرد. وإذا كان الهواء رطبًا فإنّ السّحب تتشكّل. وتعتمد أنواع الغيوم التي تتشكّل على استقرار الجو ومحتوى الرّطوبة؛ فإذا كان الهواء مستقرًّا، فإنّ طبقة من غيوم ستراتوس تتكون. أمّا إذا كان الهواء غير مستقر، فإنّ السّحب الرّكاميّة هي التي تتشكّل. وعندما يتحرك الهواء أسفل الجانب الآخر من الجبال (المنحدر المعاكس) ، فإنه يسخن دون تغير في الطاقة. هذا الهواء النازل جاف ودافئ؛ لأنّ معظم رطوبته تمت إزالتها على شكل سحب وتساقط للأمطار في جانب مهب الريح من الجبل (المرتفع). كما أنّ الهواء النازل حارّ؛ لأنّ التّكاثف يحرر طاقة. ولأنّ الجوانب الجافة المحمية في الجانب المعاكس من الجبل محمية من الأمطار والرّطوبة، فإنّها تسمّى *ظلّ المطر* (الشّكل11.25).

الشّكل 10.25

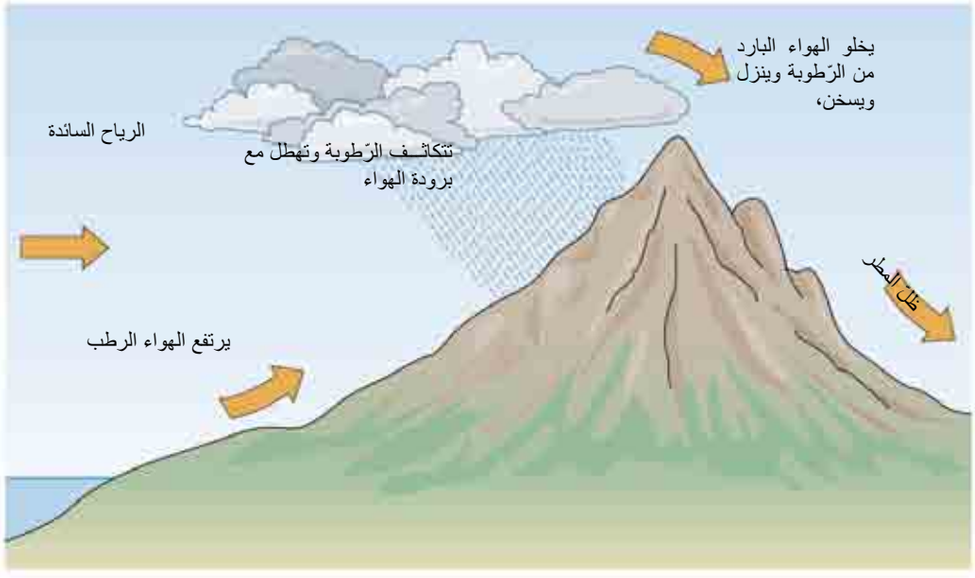
توجد في كثير من الأحيان السّحب الرّكاميّة على شكل غيوم منفصلة شاهقة بيضاء مفصولة بعضها عن بعض بمساحات ممتدة من السّماء الزرقاء.

لمعلوماتك

■ كما يُلاحظ أيّ طيار طائرة شراعية، لا توجد طريقة يمكن أن يرتفع بها الهواء كلّه. بعض الهواء يجب أن يهبط. وحيث يرتفع الهواء ويتكاثف بخار الماء نرى الغيوم؛ وحيث ينزل نرى السّماء الزرقاء بين الغيوم.

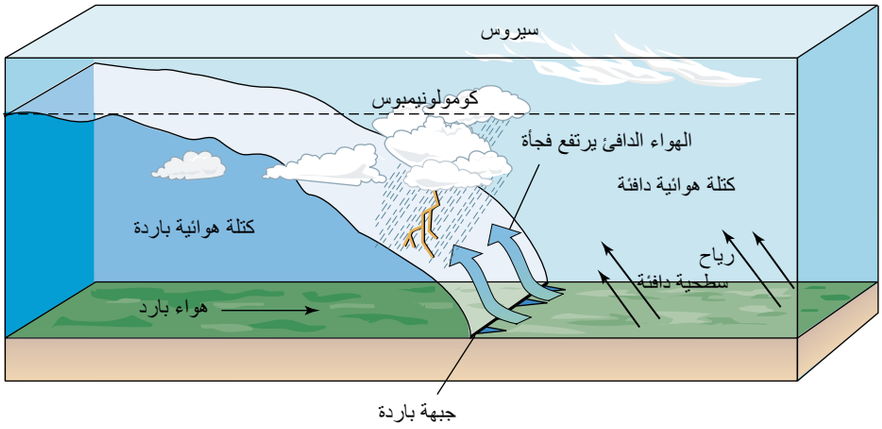
لمعلوماتك

■ تمامًا كما أنّ الظّلّ "العاديّ" هو المكان الذي يوجد فيه القليل من الضوء، لأنّ عقبة ما تعيق وصول الضوء، فإنّ ظل المطر هو المكان الذي يسقط المطر فيه قليلًا بسبب عقبة ما (مثل جبل) يحجز الهطل.



الشّكل 11.25

السلسلة الجبلية قد تنتج ظلّ المطر عند الجانب المقابل. ومع ارتفاع الهواء الدافئ الرطب على جانب مهب الريح ، يبرد الهواء وتهطل الأمطار. وعندما يصل الهواء إلى المنحدر المحمي من الريح والهواء الخالي من الرّطوبة ، فإنّ الجانب غير المواجه للريح يكون جافًّا. إنه يقع في ظلّ المطر.



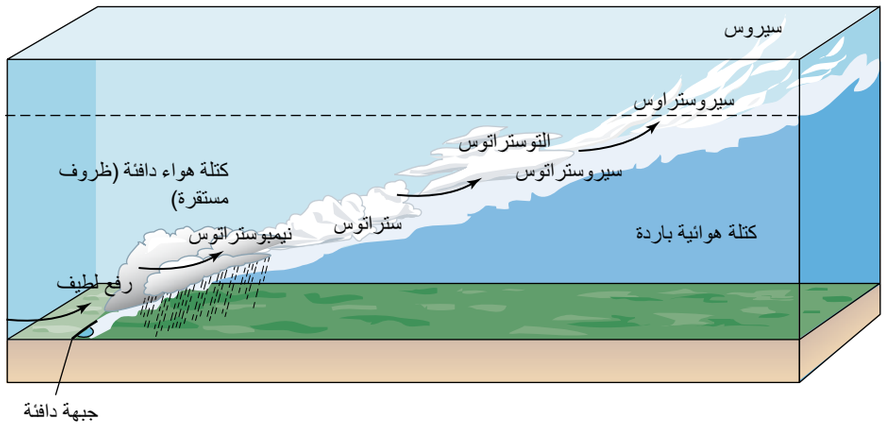
الشّكل 12.25
تتكوّن الجبهة الباردة عندما تتحرك كتلة هواء باردة إلى هواء حار. الهواء البارد يلزم الهواء الحار بالصعود، حيث يتكثف على شكل غيوم. إذا كان الجو أكثر حرارة ورطوبة وغير مستقر، فستسقط الأمطار الغزيرة وتتطوّر الرياح القوية

رفع الجبهات

في تقارير الطّقس، كثيرًا ما نسمع عن الجبهات. **الجبهة (*front*)** هي منطقة الاتصال بين كتلتين هوائيّتين مختلفتين. وعند التقاء كتلتين جويتين، فإنّ اختلافًا في درجة الحرارة، والرّطوبة، والضّغط يسبب رُكوب واحدة من الكتل الهوائيّة فوق الأخرى. وعندما يحدث هذا ، يحدث **رفع للجبهة (*frontal lifting*)**. إذا تحركت كتلة هوائية باردة إلى منطقة تحتلها كتلة هواء حارة ثابتة فإنّ منطقة الاتصال بينهما تسمّى *جبهة باردة*. ولكن إذا تحرك الهواء الحار إلى المنطقة المحتلة من كتلة هوائية باردة ثابتة فإنّ منطقة الاتصال تسمّى *جبهة دافئة*. يصاحب الجبهات عادة الرياح والسّحب والمطر والعواصف. أمّا *الجبهة المحتجبة* فتحدث عندما تعلو جبهةٌ باردة جبهةً دافئة أو العكس. وإنْ لم تتحرك إحدى الكتل الهوائيّة، فعندئذٍ تسمّى *منطقة الاتصال جبهةً ثابتة*.

إنّ خبراء الأرصاد الجوّيّة وغيرهم من المراقبين للسماء هم الذين يعرفون في كثير من الأحيان موعد اقتراب جبهة باردة من خلال مراقبة غيوم سيروس العالية، وتحول اتجاه الرياح، وانخفاض كلّ من درجة الحرارة والضّغط الجوّيّ. عندما يتحرك هواء بارد نحو هواء حار مشكّلًا جبهة باردة، يتم إجبار الهواء الدافئ على الصعود إلى أعلى، الشّكل (12.25). ومع ارتفاعها تبرد، ويتكاثف بخار الماء إلى سلسلة من السّحب المكفهرة، ونيمبوستراتوس. يتطوّر الجدار المتقدم في السّحب إلى عواصف رعدية مع أمطار غزيرة ورياح عاصفة. وبعد مرور الجبهة، يبرد الهواء وينزل، ويرتفع الضّغط، ويتوقف المطر. وما عدا السّحب الرّكاميّة في الطّقس المعتدل فإنّ السّماء تصبح صافية، ويحدث الهدوء بعد العاصفة.

وعندما يتحرك الهواء الحار إلى كتلة هواء باردة، وتتشكّل جبهة حارة، فإنّ الهواء الأقلّ كثافة والأكثر حرارة يعلو تدريجيًّا الهواء الأكثر برودة، والأكثر كثافة (الشّكل 13.25). إنّ اقتراب جبهة دافئة، وإنْ كانت أقلّ وضوحًا وأكثر تدريجيًّا من اقتراب جبهة باردة، يستدلّ به عن طريق سحب سيروس.



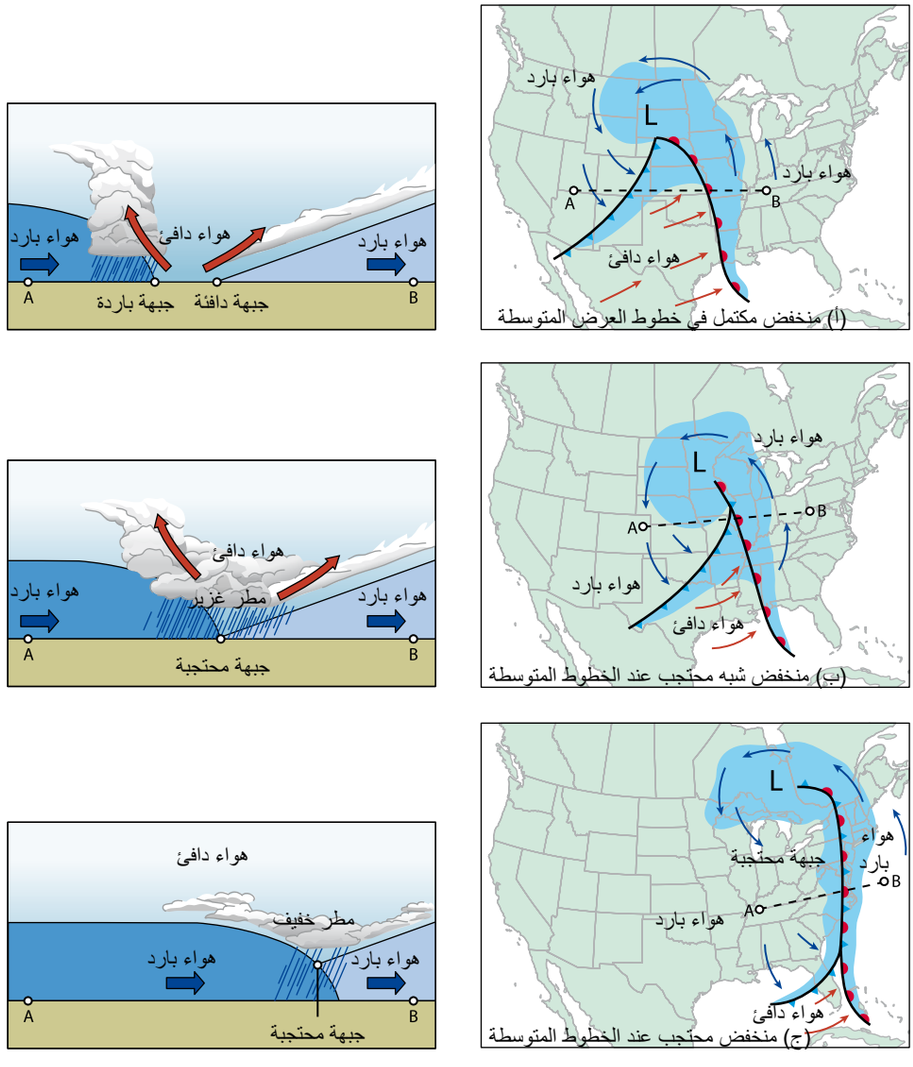
الشّكل 13.25
تحدث الجبهة الدافئة عندما تنتقل كتلة هوائية دافئة إلى كتلة هواء بارد. يعلو الهواء الدافئ الأقلّ كثافة فوق الهواء البارد الأعلى كثافة مكوّنا غيوما وأمطارا خفيفة إلى متوسطة تغطي مساحات كبيرة.

أمام الجبهة، تنحدر سحب سيروس ويزداد سمكها إلى سحب التوكوميولاس والتروستراتوس التي بدورها تكسب السّماء لونًا رماديًّا. ومع اقترابها من الجبهة، يتكوّن مطر أو ثلج معتدل، وتصبح الرياح نشطة. في الجبهة، ترتفع درجة حرارة الهواء تدريجيًّا، ويتحوّل المطر أو الثلج إلى رذاذ، في حين يكون الهواء حارًّا والغيوم مبعثرة وراء الجبهة.

عندما تندمج جبهتان؛ الأولى باردة والأخرى حارة، تكون النتيجةُ جبهةً محتجبة. وهناك عدة آليات تؤدي إلى تشكيل الجبهة المحتجبة. وللتبسيط، فإنّ الشّكل 14.25 يوضّح الخطوات التي تؤدي إلى تشكيل الجبهة المحتجبة عندما تدرك جبهةٌ باردة جبهةً دافئة تتحرك ببطء. في البداية، لا تتداخل الجبهات، ثم تلتقي النهايات الشّماليّة لكلّ جبهة في منطقة مركز ضغط منخفض (الشّكل 14.25أ). في هذه المرحلة، يكون الهواء الحار على اتصال مع الأرض بين الجبهتين. وعندما تعلو الجبهةُ الباردة الجبهةَ الحارة، تجتمع الجبهتان على الأرض، بحيث لا يلامس الهواء الدافئ فوق كلّ جبهة الأرض (الشّكل 14.25ب). ومع استمرار توجه الجبهة الباردة نحو الجبهة الدافئة، فإنّ الجبهة الحارة نفسها لا تلامس الأرض (الشّكل 14.25ج). تتقدم الجبهة الباردة على شكل إسفين تحت الجبهة الدافئة، والتقاطع بين الجبهتين هو فوق سطح الأرض. وكما كنت تتخيل، فإنّ هناك منطقة واسعة من الطّقس الممطر ترافق الجبهة المحتجبة.

لمعلوماتك

■ بغض النظر عن أيّ كتلة هواء تتقدم، فإنّ الكتلة الأكثر حرارة والأقلّ كثافة هي التي تدفع دائمًا عاليًا. الهواء السّاخن له ميل إلى الإرتفاع، في حين أن للهواء البارد ميلًا إلى الهبوط. لذا، فإنّ الهواء البارد الأعلى كثافة يسلك سلوك إسفين حيث الرّفع يأخذ مكانه.



الشّكل 14.25

خطوات تشكيل الجبهة المحتجبة عندما تعلو الجبهة الباردة فوق الجبهة الحارة. يمثل الجانب الأيمن مقاطع عمودية للخرائط على اليسار. موقع كلّ مقطع عرضي مبين على كلّ الخريطة.

لمعلوماتك

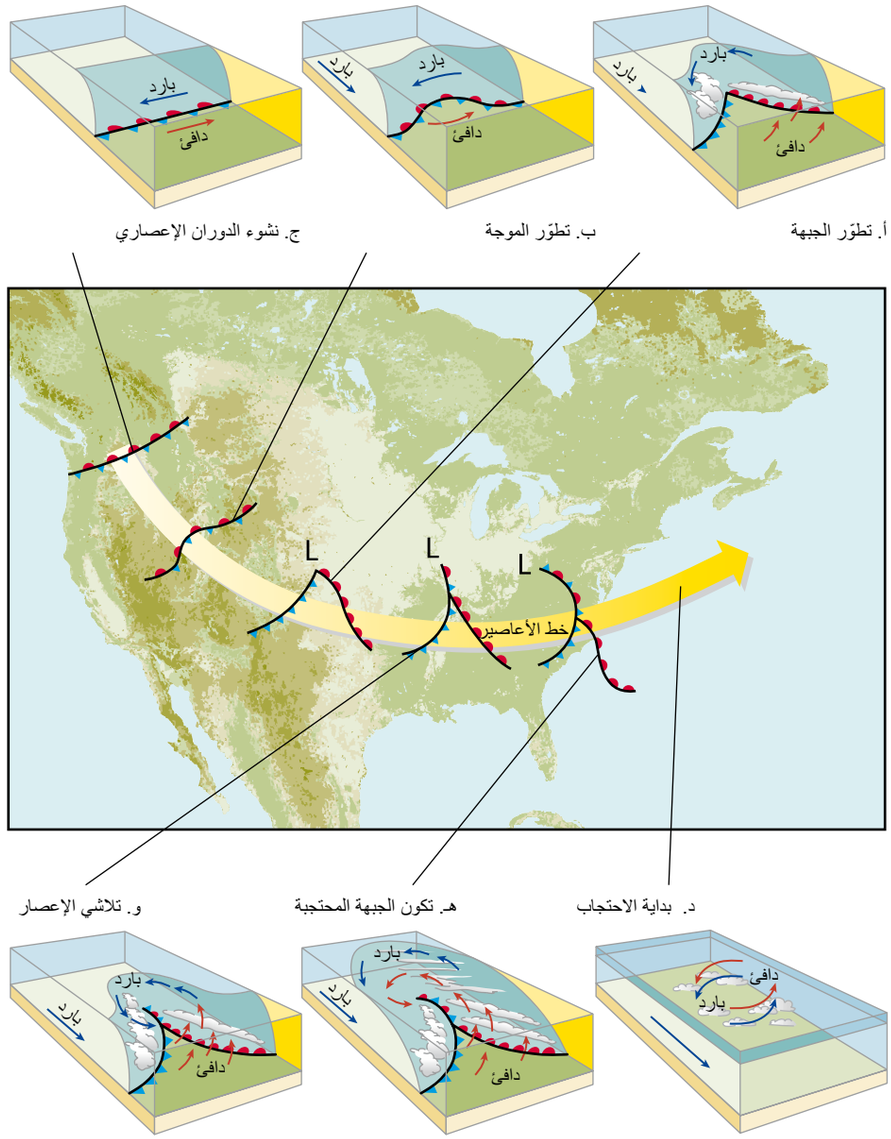
■ لماذا نسمي منطقة الاتصال بين الكتل الهوائيّة جبهة؟ كلمة (الجبهة) مصطلح عسكري يستخدم لوصف الحدود بين جيشين. وفي أثناء الحرب العالمية الأولى، اعتمد خبراء الأرصاد الجوّيّة النرويجية الجبهة وسيلة لوصف حدود الخط الفاصل بين كتلتين هوائيتين "متحاربتين".

عندما توجد اثنتان من الكتل الهوائيّة المختلفة غير قويتين بما يكفي لتجاوز إحداهما الأخرى، فإنّ الحدود بينهما تصبح *جبهة ثابتة*. الجبهة الثابتة مثل طريق مسدود بين الجبهات. وعلى هذا النحو، يمكن أن تبقى في المنطقة عدة أيام. وفي نهاية المطاف ينتهي هذا الجمود. فإمّا أن تبدد الجبهة، أو ترتفع، أو تتغير إلى جبهة باردة أو دافئة اعتمادًا على الظروف.

أعاصير خطوط العرض الوسطى

إنّ **أعاصير خطوط العرض الوسطى** ***(Midlatitude Cyclones)*** أنظمة عواصف تعبر الولايات المتحدة عادة (وغيرها) من الغرب إلى الشرق. ويرتبط تشكّل هذه الأعاصير بشكل وثيق مع التفاعلات بين الكتل الهوائيّة عند الجبهة القطبية. ويشير مصطلح *الإعصار* إلى دوران عكس اتجاه عقارب الساعة، في شمال الأرض، حول مركز الضّغط المنخفض. تدور الأعاصير المعكوسة *anticyclone* في اتجاه عقارب الساعة حول مركز ضغط عال.

يتطوّر إعصار خطوط العرض الوسطى من خلال ست خطوات متميزة، بدءًا من نشأة الإعصار؛ أي ولادته (الشّكل 15.25). تحدث المرحلة الأولى في الجبهة القطبية في مكان يتصف بخصائص الجبهة الثابتة، حيث تتحرك كلّ من الكتل الهوائيّة بالتوازي مع الجبهة (الشّكل 15.25أ).



أ. تطوّر الجبهة
ب. تطوّر الموجة
ج. نشوء الدوران الإعصاري
د. بداية الاحتجاب
هـ. تكون الجبهة المحتجبة
و. تلاشي الإعصار

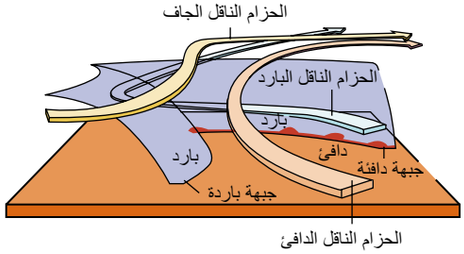
الشّكل 15.25
خطوات حياة إعصار خطوط العرض المتوسطة.

ينشأ الإعصار عندما تصبح الجبهة الخطية مضطربة ويتطوّر منحنى كالموجة. بحيث يكون الهواء الحار بارزًا في الكتلة الهوائيّة الباردة (الشّكل 15.25ب). وفي العادة. تسير الموجة شرقًا مع الرياح الغربية.

وإذا لم تتلاشَ الموجة فإنّ الهواء الحار يواصل التحرك صوب القطب. أمّا الهواء البارد فيدفع في اتجاه خط الاستواء. في هذه المرحلة تتطوّر جبهتان: الأولى دافئة على الحافة الأمامية للنظام. تليها أخرى باردة. تنتهي الجبهات في المركز الذي أصبح يُشكّل منطقة دائرية تقريبًا من *الضّغط المنخفض* (الشّكل 25-15ج). إنّ قوة تحدّر ضغط الهواء تحرّكه إلى الداخل نحو مركز الضّغط المنخفض. ولكن قوة كوريوليس تحرف الريح إلى اليمين. تقوم الرياح بالدوران عكس اتجاه عقارب الساعة حول مركز الضّغط المنخفض. وهناك فرق في درجة الحرارة بين الجانب الأكثر حرارة إلى الشرق من النظام والجانب البارد الغربي.

في معظم الظروف. تتحرك الجبهة الباردة شرقًا أسرع من الجبهة الحارة. يبدأ هواء بارد برفع الجبهة الدافئة. وتشكيل جبهة محتجبة (الشّكل15.25د). ومع استمرار نمو الجبهة المحتجبة (الشّكل 25-15هـ). فإنّ هواء دافئًا أكثر يصعد إلى أعلى. حتى لا يوجد فرق كبير في درجة الحرارة أفقيًّا عبر العاصفة. ولكن أين يذهب الهواء الدافئ؟ يبين الشّكل 15.25 أنّ الهواء الدافئ جميعه أجبر على الصعود فوق الجبهة الباردة المتقدمة. ودون أن يكون هناك فرق في درجة الحرارة أفقيًّا. تصبح العاصفة بلا مصدر للطاقة. ويتوقّف تدفّق الإعصار عكس اتجاه عقارب الساعة. ويسود طقس بارد صافٍ.

هذا هو *نموذج الإعصار النرويجي*. وهو يقوم بجهد كبير لوصف بداية إعصار خطوط العرض الوسطى ووسطه ونهايته. وقد تم تطويره في أوائل القرن العشرين عندما كانت بيانات الأرصاد الجوّيّة محدودة على السطح. وهناك حاجة إلى بيانات لعمليات المستوى العلوي لكي نفهم سبب استمرارية أعاصير خطوط العرض الوسطى. لقد استدعت وجهةُ النظر الحديثة عن أعاصير الخطوط الوسطى فكرةَ ثلاثة حُزم ناقلة كبيرة من الهواء هي: الحزام الناقل الحار. والحزام الناقل البارد. والحزام الناقل الجاف.الشّكل (16.25).



الشّكل 16.25

نموذج الحزام الناقل لأعاصير خطوط العرض الوسطى والتي تبين علاقة الحُزم الناقلة الدافئة، والباردة، والجافة للجبهات المشاهدة على السطح .

يهبّ الحزام الناقل الحار شمالًا من خليج المكسيك. ومن ثم يحمل رطوبة كبيرة معه. يتبع تدفقًا للهواء بالقرب من السطح.

إلا أنه يخضع لرفع أمامي عندما يصادف جبهة دافئة. ثم يبرد الهواء الدافئ ذاتيًّا. مما يؤدي إلى التّكاثف وتساقط الأمطار. أمّا الحزام الناقل البارد فيهب منخفضًا من الشرق في شمال الجبهة الدافئة. يتدفق الهواء البارد تحت الناقل الحار ملتقطًا الرّطوبة من تبخر قطرات المطر التي تقع من خلاله من الهواء الساخن فوقه. وعندما يقترب الحزام الناقل البارد من مركز الإعصار. يرفع الهواء البارد. ويبرد أكثر. ويصبح الهواء المرتفع مشبعًا فينتج المزيد من الأمطار. الآن. يصبح الحزام الناقل البارد جزءًا من الرياح الغربية في المستويات العليا. في حين ينشأ الحزام الناقل الجاف إلى الغرب من العاصفة. في الجزء العلوي من التروبوسفير. وهو تدفق جاف بارد يحافظ على التزود من الهواء البارد وراء الجبهة الباردة. وبعد أن يوقفه التدفق الإعصاري. ويتجه شمالًا فإنّ الحزام الناقل الجاف يصبح أيضًا ضمن الرياح الغربية في المستوى العلوي.

إنّ نموذج الحزام الناقل يكمل نموذج الجبهة القطبية النرويجي عن طريق إلقاء الضوء على القوى الدافعة التي تغذي إعصار خطوط العرض الوسطى.

5.25 الطّقس العنيف

إنّ الأنواع الثلاثة من الرّفع التي نوقشت تجلب ظروف طقس مختلفة. ويعتمد الطّقس الناتج عن اتصال الكتل الهوائيّة على ظروف المناطق المصدرة لها. يمكن أن تحدث تغيرات الطّقس بسرعة أو ببطء شديد. إنّ معظم التغيرات السريعة. والأكثر عنفًا تحدث مع ثلاثة أنواع من العواصف الرئيسة هي: الرّعديّة. والقمعيّة. والبحرية *hurricanes*.

العواصف الرّعديّة

الشّكل 17.25
مرحلة مكتملة من سحابة العاصفة الرّعديّة تظهر على شكل غيمة من السّحب المكفهرة التي تصل إلى نحو 12 كيلومترًا. الرياح القوية الأفقية ودرجات الحرارة الجليدية تسطح تاج السّحابة وتُمدِّدُه على شكل سندان.

تبدأ العاصفة الرّعديّة من هواء رطب غير مستقر، مرتفع، يتعرض للتبريد والتّكاثف متحوّلًا إلى سحابة ركام واحدة. تبنى هذه السّحابة وتنمو تصاعديًّا ما دام هناك تغذية من التيار الصاعد المكون من الهواء الساخن المرتفع من الأسفل. وتنمو قطيرات الغيمة بشكل أكبر وأثقل داخل سحابة حتى تبدأ في نهاية المطاف إلى سقوط كالمطر. إنّ المطر الساقط يسحب بعض الهواء البارد معه، مكونًا تيارًا هابطًا؛ الهواء المبرد أكثر برودة وأكثر كثافة من الهواء الذي حوله. معًا، يكون ارتفاع التيار الصاعد الحار ونزول التيار البارد أسفل السّحابة في عاصفة على شكل خلية. وهذه هي مرحلة النضج، والتي تظهر فيها غيمة السّحابة الرّعديّة كالعملاق؛ مظلم وطويل في السّماء. إنها تحوي قاعدة قطرها عدة كيلو مترات في العادة، ويمكن أن تصل إلى ارتفاع 12 كيلومترًا. وعلى مثل هذا الارتفاع، تُمدِّدُ الرياحُ الأفقية وانخفاضُ درجات الحرارة تاجَ الإعصار وتسطّحُه على شكل سندان، الشّكل (17.25). وبعد تبدّد العاصفة الرّعديّة، تترك وراءها غيمة سيروس السندان للتذكير بوجودها الضخم.

تتطوّر نحو 1800 عاصفة رعديّة في الغلاف الجوّيّ للأرض في أيّ وقت من الأوقات. وحيثما تحدث العواصف الرّعديّة، يوجد البرق والرّعد. وكلما اصطدمت قطيرات الماء وفركت في السّحابة بعضها بعضًا، تصبح السّحابة مشحونة كهربائيًّا. وبدلًا من توزيعها بشكل موحد من خلال السّحابة، تنفصل الشحنات الكهربائية؛ وهي عادة ما تكون مشحونة إيجابيًّا حيث توجد بلورات الثلج (على برودة أعلى سحابة) وسالبة الشحنة حيث السّحابة أكثر حرارة (في أسفل سحابة). ومع بناء الجهد الكهربائيّ بين المناطق المتعاكسة في الشحنات، تصبح الشحنة كبيرة بما يكفي لتحرر الطاقة الكهربائية، ونقلها إلى نقاط أخرى من الشحنة المعاكسة، والتي تعني الأرض غالبًا. إنّ الطاقة الكهربائية التي تتدفق من السّحابة إلى الأرض هي البرق (الشّكل 18.25). ولما كان البرق يسخن الهواء، فإنه يتمدد، ونسمع قصفه الصاخب المرافق. تضرب الصواعق الأرض حوالي 100 مرة كلّ ثانية، مع بعض الصواعق ذات الجهد الكهربائيّ الذي يصل إلى 100 مليون فولت. ويصيب البرق حوالي 100 فرد سنويًّا في الولايات المتحدة وحدها.

الأعاصير القمعيّة

هي جسم دوار، مثل الكرة الدوارة المربوطة بخيط، تزداد سرعتها عندما تسحب نحو محور دورانها، ومن ثم تحافظ على زخمها الزاوي. وبالمثل، تزداد سرعة الرياح الدوارة ببطء على مساحة واسعة عندما يقلّ نصف قطر دورانها. هذه الزيادة في السرعة يمكنها إنتاج إعصار قمعيّ *tornado*، وهو سحابة على شكل قمع تمتد من أسفل سحابة كبيرة مكفهرة.

الشّكل 18.25
عندما تتعرض الأرض لبرق في أثناء عاصفة رعدية شديدة، تظهر الألوان الأزرق، والأخضر، والأحمر بسب الوميض الناجم عن تحدّب عدسة آلة التصوير عند التقاط الصورة.

الشّكل 19.25
مثل مكنسة كهربائية عملاقة، تستطيع الرياح القوية من الإعصار القمعي التقاط كل شيء في طريقها وطمسها.

تسمّى سحابة القمع التي أنتجت من عاصفة رعدية قوية إعصارًا قمعيًّا فقط بعد أن تلامس الأرض. تدور رياح الإعصار القمعيّ عكس اتجاه عقارب الساعة (اتجاه عقارب الساعة في نصف الكرة الجنوبيّ) في سرعة رياح منخفضة 65 كم / ساعة. ولكنها قد تصل إلى 450 كم / ساعة اعتمادًا على قوة الإعصار.

ومع حركة الإعصار فوق الأرض وبسرعة 95-45 كم، فإنه يتبع مسار السّحابة الرّعديّة الأم. ويمكن للإعصار أن يصعد ويهبط. وقد يرتفع لفترة وجيزة عن الأرض ثم يعود إليها مرة أخرى. يسلك الإعصار القمعيّ سلوك مكنسة كهربائية عملاقة؛ فهو يلتقط كلّ شيء في طريقه. كما أنّه يلحق فوضى بسبب عصف الرياح في الدوامة وليس بسبب السّحب فقط. ويترك هذا الإعصار آثارًا من الأوحال والأنقاض في الهواء. الشّكل (19.25).

تحدث الأعاصير القمعيّة في أنحاء كثيرة من العالم؛ ففي السهول الوسطى للولايات المتحدة، تمتد منطقة الإعصار من تكساس الشّماليّة خلال أوكلاهوما، وكنساس، وميسوري. وتتعرّض هذه المنطقة إلى أكثر من 300 إعصار قمعيّ كلّ عام. ومن هنا جاءت تسمية هذ المنطقة بزقاق الأعاصير القمعيّة. إنّ الأعاصير القمعيّة تكثر في هذا الجزء من البلاد؛ حيث اضطر السكان إلى بناء العديد من الملاجئ تحت الأرض كمنازل لهم؛ قوة الإعصار مخيفة ومدمرة.

الأعاصير البحرية (Hurricanes)

في المناطق المدارية المشبعة بالبخار، حيث ترفع الشمس درجة حرارة المحيطات، يكون انتقال الحرارة إلى الغلاف الجوّيّ عن طريق التّبخّر والتوصيل شاملًا، بحيث تكون حرارة كلّ من الهواء والماء متساوية تقريبًا. إنّ الرّطوبة العالية في هذا الجزء من العالم تؤدي إلى تطوّر السّحب الرّكاميّة والعواصف الرّعديّة بعد الظهر. معظم العواصف الفردية ليست حادة، ولكن العواصف الرّعديّة تصبح أحيانًا، جهازًا آليًّا، وتبدأ في السلوك كنظام واحد يسمى اضطراب المناطق المدارية. يكوّن الهواء الحار المرتفع منطقة وسطى ذات ضغط منخفض توجه المزيد من الهواء نحو وسط الاضطرابات باستمرار. يسير الهواء المتدفق على شكل لولب نحو الداخل بسبب قوة كوريوليس (الفصل 24). وإنْ لم تكسر هذه العاصفة المتصاعدة برياح المستوى العلوي، فإنّها قد تتطوّر إلى منخفض مداري (سرعة الرياح أقلّ من 60 كم / ساعة). وقد سمّي كذلك بسبب وجود المنطقة الوسطى من الضّغط المنخفض. إذا زادت شدة العاصفة فإنها تتطوّر إلى عاصفة استوائية مع زيادة سرعة الرياح فوق 60 كم / ساعة. وإذا كانت الظروف مواتية فستتطوّر عاصفة أشد هي الإعصار، مع سرعة الرياح فوق 120 كم / ساعة، وتصل إلى ما يقرب من 300 كم / ساعة.

تكتسب الأعاصير الطاقة من الحرارة المتحررة من تكثيف المياه (الفصل 7). يُنتج التّكاثف كميات هائلة من الأمطار التي تكون مثالية للعواصف من هذا القبيل. تسخن الحرارة الهواء المحيط في المستوى العلوي، مما يتسبب في ارتفاعها. ومع ارتفاع هواء المستوى العلوي، يتم امتصاص الهواء السّطحيّ من الأعلى، وزيادة الضّغط المنخفض في الوسط؛ أي عين الإعصار.

لمعلوماتك

■ تشكل إعصار كاترينا في 23 من أغسطس 2005م، بالقرب من جزر البهاما، وضرب ساحل خليج المكسيك في الولايات المتحدة بعد ستة أيام، فأحدث دمارًا كبيرًا في نيو أورليانز، ولويزيانا، وساحل مسيسبي. ولكن مثل هذه العاصفة الكبيرة دمرت مناطق في الخليج الساحلي تصل إلى بُعد 160 كم من عين العاصفة. وقد قتل حوالي 1836 شخصًا نتيجة الإعصار والفيضانات التي تبعته. وكان الإعصار الأكثر دموية في الولايات المتحدة منذ إعصار كيشوبي عام 1928م. وكان مكلفًا أيضًا؛ أكثر من 100 بليون دولار لإصلاح دمار العاصفة وإزالة الأضرار. وما زالت بعض المناطق دون إصلاح. لقد كان أكبر كارثة مكلفة في تاريخ أمريكا.

الشّكل 20.25
صورة الأقمار الصناعية لإعصار كاترينا عام 2005
تبين الصورة سمة الإعصار وهي حُزم من الغيوم المكفهرة تدور حول عين الضّغط المنخفض من العاصفة.

إنّ الهواء الأفقيّ يتدفّق على شكل لولب عكس اتجاه عقارب الساعة (في نصف الكرة الشّماليّ) حول العين. إنّ الحُزم اللوبية من السّحب المكفهرة تعطي الإعصار مظهره المألوف. الشّكل (20.25).

يشكّل تدفّق الهواء الذي يحدث في عين الإعصار حلقة تغذية راجعة إيجابية. يحرر التّكاثف طاقة توجه الهواء الرطب نحو أعلى سطح المحيط. يبرد الهواء الرّطب، ويحدث تكاثف أكثر، وهذا يحرّر مزيدًا من الحرارة التي توجه المزيد من الهواء الرطب الدافئ إلى أعلى. تستمر هذه الدورة - محرك حرارة طبيعي — إلى أن تعترض رياح قوية علوية من خارج العاصفة نمط التدفق نحو الأعلى، أو يتحرك الإعصار البحري فوق اليابسة. عندما يسير الإعصار البحري على اليابسة يُحرم من مصدر الطاقة.

لمعلوماتك

■ نسمع كلام خبراء الأرصاد الجوّيّة حول التنبؤ بقولهم: قصير ومتوسط وطويل المدى. ماذا تعني هذه التنبؤات؟
يتوقع التنبؤ قصير المدى لليومين القادمين مع تفاصيل حول الحرارة والرياح والطّقس. أمّا المتوسط المدى فيتنبأ مسبقًا عن الطّقس ما بين 3 و 7 أيام، ولكن بتفاصيل أقلّ. في حين يتنبأ البعيد المدى لأكثر من سبعة أيام. في هذه التنبؤات يتم توقع أن يكون الطّقس أعلى من العادي أو أدنى منه.

■ 6.25 العنوان الرّئيس للنقاش

إنّ وظيفة خبراء الأرصاد الجوّيّة ذات أهمية بالغة وهي التنبؤ بالأعاصير البحرية وغيرها من العواصف. ومن مهام التنبؤ بالطّقس تحديدُ خصائص الهواء: كيفية تغيرها، وسبب هذا التغيّر، وفي أيّ اتجاه قد تتحرك الكتل الهوائيّة؛ لأنّ التنبؤ بالأعاصير البحرية والقمعيّة ينقذ حياة الأفراد. ولدى خبراء الأرصاد الجوّيّة سجل طويل ورائع من إنقاذ الأرواح البشرية والحدّ من الخسائر في الممتلكات.

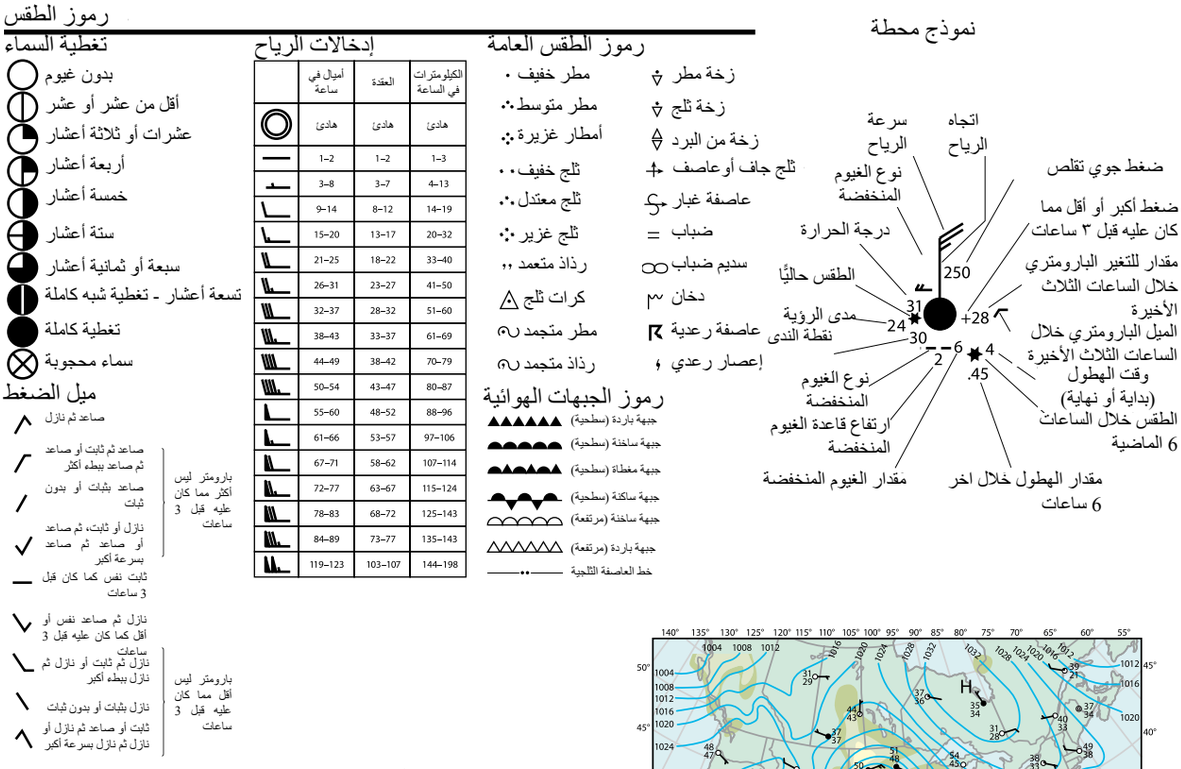
يشمل التنبؤ بالطّقس بيانات كثيرة جدًّا من أنحاء العالم كلّه. وقبل ستينيّات القرن العشرين، جمعت معظم هذه البيانات، وحلّلت، ورسمت باليد على خرائط الطّقس. وقد احتاج ذلك إلى الآلاف من العمليات الحسابية، وعمل دؤوب لساعات طويلة. أما الآن، ومع وجود أجهزة الحاسوب، يمكن معالجة أعداد كبيرة من البيانات من أنحاء العالم جميعه في غضون دقائق. إنّ أجهزة الحاسوب تقوم بأكثر من مجرد تحليل البيانات التي يمكن أن تساعد على التنبؤ بالطّقس ورسمها؛ إنّها ترسم الخرائط للأحوال الجوّيّة المتوقعة التي يستخدمها المتنبئ كدليل للتنبؤ بالطّقس. ومع ذلك، فإنّ العديد من المتغيّرات كثيرًا ما تعيق التنبؤات الدقيقة. لذا لا تعتمد على غياب المطر في تنبؤاتك.

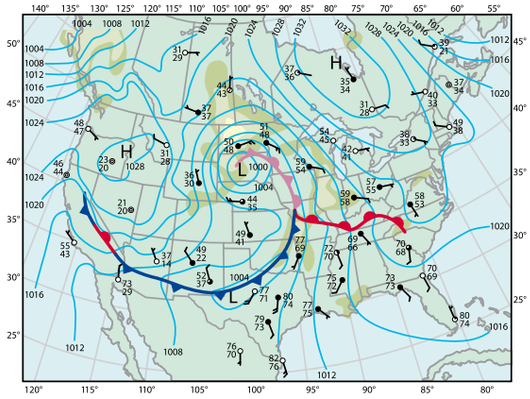
لمعلوماتك

■ العواصف الدوارة والاضطرابات الناجمة عن النشاط الشّمسيّ تنتج "الطّقس الفضائيّ" بين الشمس والأرض. مشاعل الطاقة الشمسية، واندفاعات الكتل الإكليلية، والعواصف المغناطيسية لا تؤثّر في الأقمار الصناعية للأرض فقط، بل وفي بيئة سطح الأرض أيضًا. يعزى فشل نظام الاتصالات غالبًا، وانقطاع التيار الكهربائيّ والإضاءة إلى الأحوال الجوّيّة الفضائية. ومع زيادة استخدامنا للفضاء يجب أن تزداد قدرتنا على التنبؤ بالطّقس فيه.

خرائط الطّقس

تعدّ خريطة الطّقس، أو مخطط الطّقس الأداةَ الرئيسة للمتنبئ، وهي تمثيل لأنظمة الجبهات، وأنظمة الضّغط المنخفض والمرتفع في المناطق التي تعلو الأماكن المرسومة على الخريطة. إنّ الرموز على خريطة من هذا القبيل هي تدوين مختزل لتمثيل البيانات المجمعة من محطات المراقبة المختلفة. تسمّى الرموز رموز الطّقس. يقوم تدوين الاختزال هذا بتصنيف 18 نوعًا من البيانات في منطقة صغيرة تسمّى نموذج المحطة. إنّ الدائرة في المركز تصف المظهر الشامل للسماء. كما أنّ البروز من الدائرة هو سهم الرياح، وذيله في الاتجاه الذي تأتي منه الريح. في حين يشير الريش إلى سرعة الرياح. إن العناصر الخمسة عشر الأخرى في الطّقس هي في موقع معياري حول الدائرة. خريطة الطّقس مغطاة بخطوط هي خطوط تساوي الضّغط *isobar* ، التي تربط بين نقاط الضّغط المتساوي. عندما يتحرك الهواء من مناطق الضّغط العالي إلى الضّغط المنخفض، فإنه يرتفع ويبرد والرّطوبة فيه تتكاثف إلى غيوم. على مقربة من المنخفض (*L* على الخريطة)، نرى غطاء سحابيًّا واسع النطاق. وبالقرب من المرتفع (*H* على الخريطة)، نرى السّماء صافية. في المناطق العالية الضّغط، ينزل الهواء ويبرد ذاتيًّا. ولأنّ نزول الهواء لا يكون غيومًا، فإنّنا نجد السّماء صافية والطّقس معتدلا. تمثّل الخطوط السميكة على خريطة الطّقس الجبهات. ولأنّ الجبهات عموما تعني تغييرًا في الطّقس، فهي ذات أهمية كبيرة على خرائط الطّقس.





تظهر خرائط الطّقس الظروف الجوّيّة. عندما يرتفع الهواء الدافئ، فإنه يتمدد ويبرد. وعندما يبرد، تتكاثف جزيئات بخار الماء لتشكيل الغيوم. ولأنّ الهواء يتحرك من مناطق الضّغط العالي إلى مناطق الضّغط المنخفض، فإنّ مناطق الضّغط المنخفض يرافقها غطاء من السّحب. وفي منطقة الضّغط العالي، يهبط الهواء عمومًا. ولأنّ الهواء النازل لا يكون الغيوم فإنّنا نجد السّماء صافية والطّقس معتدلا.

ملخّص المصطلحات

الرّطوبة: ***Humidity*** مقياس لتركيز بخار الماء في كتلة هواء أو مقداره؛ أي كتلة بخار الماء في وحدة الحجم من الهواء.

الرّطوبة النّسبيّة: ***Relative humidity*** كمية بخار الماء في الهواء على درجة حرارة معينة معبرًا عنها بنسبة مئوية لأكبر كمية من بخار الماء يمكن استيعابها في الهواء في درجة الحرارة تلك.

ضغط البخار المتشبّع: Saturation vapor pressure الحدّ الأقصى لمقدار الرّطوبة التي يمكن أن تُستوعب في الهواء عند درجة حرارة معينة، وهو الحدّ الأعلى للرطوبة.

أدياباتي: Adiabatic مصطلح يصف التّغيّر في درجة الحرارة عند غياب تحوّل (نقل) الحرارة؛ الهواء المتمدد يبرد والهواء المنضغط يسخن.

الانعكاس الحراري (انعكاس درجة الحرارة): Temperature inversion ظرف تكون فيه المناطق العليا من التروبوسفير أكثر حرارة من المناطق السفلى.

مستوى تكاثف الرّفع: Lifting condensation level الارتفاع الذي يصبح عنده الهواء المرتفع مشبعًا ومتكثفًا تبعًا لمعدّل التّبريد الذّاتيّ الجاف.

رفع تيارات الحمل (أو الرّفع الحملي): Convectional lifting نمط لدوران الهواء الناجم عن ارتفاع الهواء المسخن من سطح الأرض، في حين يهبط الهواء الأبرد العالي.

الرّفع الجبلي: Orographic lifting رفع كتلة هواء فوق حاجز طوبوغرافي مثل الجبل.

الجبهة: Front منطقة التماس بين كتلتين من الكتل الهوائيّة المختلفة.

الرّفع الجبهي: Frontal lifting رفع كتلة هوائية فوق أخرى بسبب التقائهما.

إعصار خطوط العرض الوسطى: Midlatitude cyclone أعاصير تتحرك من الغرب إلى الشرق مع منطقة وسطى ذات ضغط منخفض، يتطوّر حولها دوران عكس اتجاه عقارب الساعة (في نصف الكرة الشّماليّ). والتي عادة ما تكون جبهة باردة وجبهة دافئة ؛ وعادة ما تكون جبهة قطبية.

أسئلة مراجعة

1.25 رطوبة الغلاف الجوّيّ

1. ميز بين الرّطوبة من جهة والرّطوبة النّسبيّة من جهة أخرى.
2. لِمَ لا تزداد الرّطوبة النّسبيّة في الليل؟
3. عندما تنخفض درجة حرارة الهواء، هل تزداد الرّطوبة النّسبيّة، أم تنخفض، أم تبقى كما هي؟
4. ما علاقة نقطة التّشبّع بنقطة الندى؟
5. ماذا يحدث لبخار الماء في الهواء المشبع عندما يبرد؟
6. ما العوامل المسببة للتّكاثف؟
7. عند أيّ درجات الحرارة يحدث التّكاثف بسهولة أكبر. المنخفضة أم المرتفعة؟ اشرح.
8. عندما يتكاثف بخار الماء إلى الماء السائل ، فهل تمتص طاقة أم تتحرر؟
9. ميّز بين التّكاثف وتساقط الأمطار.

2.25 متغيّرات الطّقس

10. اشرح لماذا يرتفع الهواء الدافئ ويبرد عند تمدده.
11. عندما يرتفع الهواء، هل يصبح أكثر حرارة، أم أكثر برودة، أم يبقى عند درجة الحرارة نفسها؟
12. ما العملية الأدياباتية؟
13. اذكر طريقتين على الأقل تزداد فيهما طاقة الهواء الحرارية.
14. اذكر طريقتين على الأقل تقل فيهما الطاقة الحرارية في الهواء.
15. ما انعكاس درجة الحرارة؟ استشهد بما لا يقل عن مثال مبينًا مكان نشوئه.
16. ماذا يحدث لضغط الهواء ودرجة حرارته عندما يتدفق مرتفعًا بجانب جبل؟

3.25 تطوّر الغيوم

17. اشرح كيفية تشكّل الغيوم.
18. سمّ شكل السّحابة فيما يلي: (أ) ظلّ ضبابيّ في فصل الشّتاء. (ب) سماء على شكل الماكريل. (ج) قطن عائم. (د) تساقط ثلوج.
19. سمّ المجموعة التي تنتمي إليها كلّ سحابة مما يلي: (أ) ألتوكويولاس. (ب) سيروستراتوس. (ج) نمبوستراتوس. (د) سحب ركاميّة.
20. أيّ السّحب الآتية أكثر احتمالًا لإنتاج المطر أو الثلج؟

أ. سيروستراتوس

ب. نيمبوسترتوس

ج. ألتوكوميولاس

د. ستراتوكوميولاس

21. أيّ مما يأتي تميزه الغيوم التي تتطوّر رأسيًّا: الهواء المستقر *stable* أم الهواء الثابت *stationary h* وغير المستقر، أم الجاف؟
22. أيّ أنواع الغيوم أكثر احتمالًا لأن تصبح مقدمة رعد؟

4.25 الكتل الهواء، والجبهات، والعواصف

23. اشرح الدور الذي يقوم به رفع تيارات الحمل في تشكيل الغيوم الرّكاميّة.
24. اشرح كيف يتم إنشاء دورة تيارات الحمل.
25. هل يتكوّن ظلّ المطر على الجانب المواجه للريح من سلسلة الجبال أم على الجانب غير المواجه لها؟ اشرح.
26. ما الفرق بين الجبهتين: الباردة والدافئة؟
27. ما الآليات الرئيسة الثلاث للرفع في الغلاف الجوّيّ؟
28. ما الظروف التي يحدث بوجودها تساقط الأمطار بسبب الرّفع الجبلي؟

5.25 الطّقس العنيف

29. كيف تحدث الحركة نحو الأسفل في العواصف الرّعديّة؟
30. صف بإيجاز تكوّن الرّعد والبرق.

تمارين

لا تقلق من عدد التمارين الكبير في هذا الفصل والفصول الأخرى. سيقوم معلمك بتعيين عدد قليل منها فقط.

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

1. ● ميز بين الطّقس والمُناخ.
2. ■ ما الكتلة الهوائية التي تنتج هطل الأمطار: الرطوبة المرتفعة أم الرطوبة النازلة، أم كلاهما؟
3. ■ لماذا تتشكّل الغيوم فوق قمم الجبال؟
4. ■ لماذا يحدث الضباب من هبوب الهواء الرطب الدافئ فوق الماء البارد؟
5. ● لماذا يتشكّل الندى على الأرض في ليالي الصّيف الصافية الهادئة؟
6. ● لماذا نشعر بأنّ يوما في يوليو في خليج المكسيك أكثر سخونة من يوم في يوليو في ولاية أريزونا، حتى عندما تكون درجات الحرارة هي نفسها؟
7. ■ هل تتوقع تبخر كوب من الماء بسرعة أكبر في يوم صيفيّ حار عاصف جاف أم في يوم شتويّ هادئ بارد جاف؟ دافع عن إجابتك.
8. ● لماذا تزداد درجة حرارة سطح الأرض في ليلة صافية وهادئة وغطاء السّحب المنخفضة تعبر السّماء؟
9. ♦ خلال زيارة قمتَ بها في الصّيف إلى كانكون في المكسيك، بقيتَ في غرفة مكيفة الهواء، استعددت للمغادرة صوب الشاطئ، وقد وضعتَ نظارتَك الشّمسيّة على عينيك. وفي اللحظة التي خطوت فيها خارج البيت، تشكّل ضباب على نظّارتك. لماذا؟
10. ♦ بعد يوم من التزلج في جبال روكي، قررتَ الذهاب نحو الداخل للحصول على كوب من الكاكاو الحار. وعندما دخلتَ امتلأتِ النظارة الطبية الخاصة بك بالضباب. لماذا؟
11. ● هل يمكن تغير درجة حرارة الجو إن لم تزدد الحرارة أو تنقص؟ اشرح.
12. ■ لماذا يجب على الكتلة الهوائيّة الارتفاع من أجل إنتاج تساقط للأمطار؟
13. ● مع تحرك كتلة هواء إلى أعلى منحدر لأحد الجبال ثم نحو أسفله، ماذا يحدث لدرجة حرارة الجو ومحتوى الرّطوبة؟
14. ● لماذا يحدث التّشبّع والتّكاثف في يوم بارد وليس في يوم حار؟
15. ● إذا كانت السّماء ملبدة بالغيوم والسّماء تمطر. فما نوع السّحابة فوقك: نمبوستراتوس أم كوميولونمبوس؟
16. ■ ما الفرق بين الندى والصقيع؟
17. ■ ما الذي يفسر المسافات الكبيرة من السّماء الزرقاء بين الغيوم الرّكاميّة؟
18. ● لِمَ لا تتشكّل السّحب الرّكاميّة في منطقة لا يوجد فيها تيار حمل للهواء؟
19. ■ أيّ أشكال السّحب يرتبط بالكتلة الهوائيّة المستقرة؟
20. ● ما شكل السّحابة المرتبط مع العواصف الرّعديّة؟
21. ■ ما العلاقة بين ضغط بخار التّشبّع والرّطوبة؟
22. ■ عند يكون معدّل التّكاثف أكبر من معدّل التّبخّر، ماذا يحدث للهواء؟
23. ● استشهد بما لا يقل عن أربعة أنواع من المعلومات اللازمة للتنبؤ بالطّقس.
24. ● تعتمد دقة التنبؤات الجوّيّة على بيانات كثيرة جدًّا، وآلاف من العمليات الحسابية. إذا قلّ عدد البيانات، فهل تقلّ الدقة أيضًا؟
25. ■ ما الفرق بين الأمطار المصاحبة لمرور جبهة حارة والأمطار المصاحبة لمرور جبهة باردة؟
26. ■ متى تحدث العملية الأدياباتية في الجو؟
27. ♦ كيف يمكن لطبقة من سحب ألتروستراتوس أن تتحوّل إلى ألتوكوميولاس؟
28. ♦ القارة القطبية الجنوبيّة مغطاة بالأنهار الجليدية والمسطحات الجليدية الكبيرة. هل يكون تساقط الثلوج في هذه القارة ثقيلًا أم خفيفًا؟ لماذا؟
29. ● كيف تسبب الجبهات تكوّن الغيوم وتساقط الأمطار؟
30. ● اشرح لماذا تكون الأمطار المتجمدة أكثر شيوعًا مع الجبهات الحارة وليس مع الجبهات الباردة؟
31. ■ ما الخطوات التي يجب حدوثها قبل تساقط الأمطار؟
32. ● بإيجاز، ما الجبهة المحتجبة؟
33. كيف تتشكّل صحراء ظلّ المطر؟
34. ■ يسخن الهواء النازل، ولكن التيارات المنحرفة نحو الأسفل في العاصفة الرّعديّة باردة. لماذا؟
35. ♦ تتشكّل الأعاصير القمعيّة في مناطق تيار صاعد قوي، ومع ذلك فإنها تنحدر من قاعدة سحابة. اشرح.
36. ■ تحدث الأعاصير في الساحل الشرقي للولايات المتحدة أكثر منها في الساحل الغربي. لماذا؟
37. ● لماذا تكون السّحب التي تتشكل فوق المياه أكثر كفاءة في إنتاج تساقط الأمطار من السّحب التي تتشكل فوق اليابسة؟
38. ■ ما مصدر الكمية الهائلة من الطاقة المتحررة من إعصار ما؟
39. ● ما المنطقة التي في الولايات المتحدة التي يحدث فيها أعلى نسبة من الأعاصير القمعيّة؟
40. ● في أيّ طبقة من الغلاف الجوّيّ تحدث لدينا الأحوال الجوّيّة جميعها؟

مسائل

ارجع إلى صندوق تصور العلوم الطبيعية صفحة 667 لحل التمرينين التاليين.

● مبتدئ ■ متوسط المعرفة ♦ خبير

1 . ♦ في درجة 50 فهرنهايت، الحدّ الأقصى لبخار الماء في الهواء 9 جم/م^3. إذا كانت الرّطوبة النّسبيّة 40% . فما كتلة بخار الماء في 1 م^3 من الهواء؟

2 . الرّطوبة النّسبيّة لهواء 50% والضّغط هو 1000 مليبار (*mb*). إذا ازداد الضّغط إلى 1053 مليبار دون تغيير في درجة الحرارة أو محتوى بخار الماء، فما الرّطوبة النّسبيّة؟ (مساعدة : استخدم قانون بويل في الفصل 5).

اختبار الاستعداد للقراءة

إذا استوعبت هذا الفصل جيدا، فعليك الإجابة عن 7 أسئلة من 10 إجابة صحيحة. وإن لم تستطع، فعليك الدراسة أكثر قبل الانتقال إلى الفصول اللاحقة.

اختر أفضل إجابة لكلّ سؤالٍ مما يلي:

1. الهواء الذي يحوي أكبر قدر ممكن من بخار الماء عند درجة حرارة تلك الكتلة الهوائية:
أ. ذو رطوبة نسبية 100%.
ب. مشبع.
ج. معدّل تبخره يساوي معدّل تكاثفه.
د. كلّ ما ذكر
2. تكون الجبهة الحارة في معظم أعاصير خطوط العرض الوسطى:
(أ) وراء الجبهة الباردة، وإلى الغرب منها.
(ب) أمام الجبهة الباردة، وإلى الشرق منها.
(ج) تنتهي في وسط الضّغط العالي.
(د) تلتوي مرة أخرى إلى جبهة ثابتة.
3. تحدث العملية الأدياباتية عند:
(أ) تسخين الهواء من الإشعاع الشّمسيّ.
(ب) طرح الحرارة عن طريق التّبخّر.
(ج) تمدد الهواء وتبريده.
(د) تشكّل الغيوم.
4. عندما ينزل الهواء:
(أ) ينضغط وترتفع درجة حرارته.
(ب) يصل إلى مستوى توازن ثم يبدأ في الهبوط.
(ج) يتمدد ويبرد.
(د) يتشكّل إلى غيوم.
5. عندما تكون المناطق العليا من الغلاف الجوّيّ أكثر حرارة من المناطق الدنيا، يحدث:
(أ) رفع تيارات الحمل.
(ب) انعكاس الحرارة.
(ج) عدم الاستقرار المطلق.
(د) عملية أدياباتية.
6. من العوامل الرئيسة اللازمة لتساقط الأمطار حدوث:
(أ) التيار الصاعد في سحب كثيفة نسبيًّا.
(ب) معدّل تكاثف يتجاوز معدّل التّبخّر.
(ج) نوى التّكاثف.
(د) كلّ ما ذكر
7. للحصول على السّحب لا بدّ من رفع الهواء. إنّ آليات الرّفع الرئيسة هي:
(أ) الجبلي، وتيارات الحمل، والرّفع الجبهي.
(ب) القاري، والجبلي، والرّفع المحتجب.
(ج) الرّفع الكلامي، والرّفع المقوم، والرفع الوجهي.
(د) الرّفع الثابت، والرّفع المحتجب، ورفع التماس.
8. عندما تنخفض درجة حرارة الهواء، فإنّ الرّطوبة النّسبيّة:
(أ) تزداد.
(ب) تنقص.
(ج) تبقى كما هي.
(د) لا شيء مما ذكر
9. في نصف الكرة الشّماليّ، تدور الأعاصير البحرية والأعاصير القمعيّة في اتجاه ..... بسبب .....
(أ) عقارب الساعة ، قوة كوريولوس .
(ب) عكس عقارب الساعة، قوة كوريولوس .
(ج) عقارب الساعة، قوة سيكلوجين .
(د) عكس عقارب الساعة، قوة نشأة الإعصار.
10. عندما يكون الهواء مشبعًا، فإنّ معدّل التّكاثف يكون:
(أ) أكبر من التّبخّر
(ب) أقلّ من معدّل التّبخّر.
(ج) مساويًا لمعدّل التّبخّر.
(د) معتمدًا على درجة الحرارة.

إجابات إختبار الإستعداد للقراءة

ج10، ب9، ج8، أ7، ج6، ب5، ج4، أ3، ج2، ب1

اكتشف المزيد

http://www.noaa.gov

توفر الصفحة الرئيسة لخدمة الطقس الوطنية معلومات مفصلة عن الطقس وتوقعاته. راجع الخرائط والصور واكتشف انماط الطقس وتوقعاته. راجع الخرائط والصور واكتشف انماط الطقس التاريخية. اطلع على الصفحة التربوية للحصول على روابط ممتازة مع أنشطة وأدوات تعليمية.

http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc/html

إذا كنت تبحث عن ملفات أو أرشيف متجددة عن بيانات الطقس حول العالم، عليك الدخول الى هذا الموقع. يحتوي الموقع على معلومات شاملة ولكنه يتطلب النقر على روابط متعددة قبل الحصول على البيانات.