رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

6-3

الأمواج الزلزالية وبنية الأرض

Seismic Waves and Earth's Interior

الأهداف

- **تقارن** بين أنواع الأمواج الزلزالية الثلاثة.
- **تصف** كيف يعمل مقياس الزلازل (السيزمومتر).
- **تفسر** كيف استعملت الأمواج الزلزالية في معرفة مكونات باطن الأرض وتركيبها.

مراجعة المفردات

الستار: جزء من باطن الأرض يقع أسفل القشرة الأرضية وفوق اللب.

مفردات جديدة

الأمواج الزلزالية

الأمواج الأولية

الأمواج الثانوية

الأمواج الجسمية

الأمواج السطحية

بؤرة الزلزال

المركز السطحي للزلزال

مقياس الزلزال

مخطط الزلزال

الفكرة الرئيسة **يتم استعمال الأمواج الزلزالية في تصوّر بنية الأرض الداخلية.**

الربط مع الحياة عندما تنظر إلى المرآة فإنك ترى نفسك؛ لأن أمواج الضوء تنعكس عن وجهك وتتجه نحو المرآة، ثم ترتد عن سطحها إلى عينيك، فتحدث الرؤية. وبالكيفية نفسها، تنتقل الأمواج الزلزالية في باطن الأرض، وتنعكس عن التراكيب الداخلية معطية بذلك صورة عنها.

الأمواج الزلزالية Earthquake Waves

تنتج معظم الزلازل بفعل الحركة التي تحدث على الصدوع. إن الحركة في الصدوع قد تكون عبر سطوح ملساء نسبيًّا، أو عبر سطوح خشنة، كما في حركة الكتلتين الخشبيتين المغطاتين بورق الصنفرة؛ حيث تعمل السطوح الخشنة على إعاقة الحركة وإيقافها. كذلك مع استمرار حركة الصخور عبر السطوح الخشنة تتراكم الجهود فيها، وتعاني الصخور من تشوُّه مرن، حيث ترجع الصخور إلى وضعها الأصلي عند إزالة الإجهاد عنها. عندما تتجاوز الجهود المتراكمة في الصخور حد المرونة، وهو الحد الذي تفقد فيه الصخور خاصية المرونة، فإنها تلتوي أو تتمدد، وتصبح في مرحلة التشوُّه اللدن. وعندما تنكسر الصخور أو تنزلق عبر السطوح تتحرر الطاقة المختزنة منتجة الزلزال.

أنواع الأمواج الزلزالية Types of seismic waves تسمى الأمواج التي تنتشر في الأرض والناجمة عن الزلزال **الأمواج الزلزالية Seismic waves**. وينتج عن كل زلزال ثلاثة أنواع من الأمواج الزلزالية هي: الأولية والثانوية والسطحية.

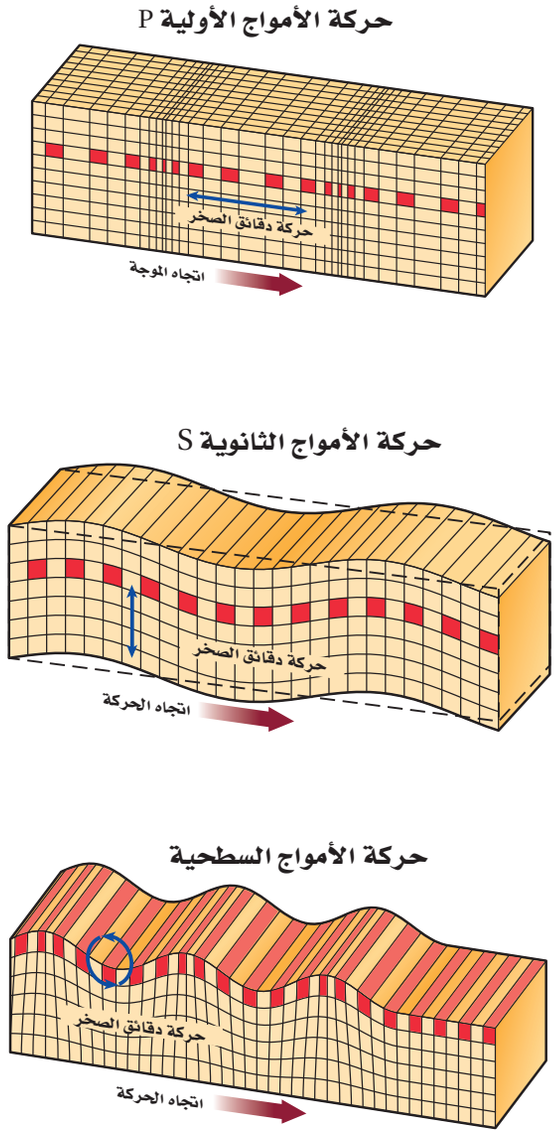
الأمواج الأولية Primary waves يطلق عليها أيضًا أمواج P. تعمل **الأمواج الأولية Primary Waves** على تضاغط الصخور وتخلخلها في نفس اتجاه حركتها، انظر **الشكل 17–6**. لاحظ من الشكل أن حجم الصخر المشار إليه بالمربعات الحمراء الصغيرة يتغير مع مرور الأمواج الأولية فيه. وتشبه الحركة التضاغطية للأمواج الأولية الحركة التي تحدث على طول نابض رخو؛ إذ تنتقل الحركة الموجية على طوله في اتجاه موازٍ لاتجاه شدِّه في البداية.

وزارة التعليم
Ministry of Education
2023 - 1445

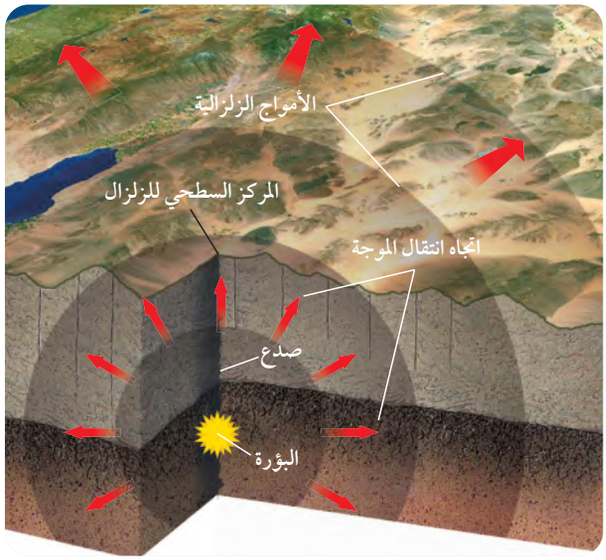
الأمواج الثانوية Secondary waves يطلق عليها أيضًا أمواج S. وسميت **الأمواج الثانوية Secondary Waves** لأنها أبطأ من الأمواج الأولية، وهي ثاني الأمواج الزلزالية وصولاً إلى محطة الرصد. وتُسبب الأمواج الثانوية في أثناء حركتها حركة جسيمات الصخر عموديًّا على اتجاه حركتها، كما في **الشكل 17–6**، وتشبه الحركة الموجية في الحبل؛ حيث تنتقل عموديًّا إلى أعلى وإلى أسفل من أحد طرفيه إلى الطرف الآخر. وتسمى كل من الأمواج الأولية والثانوية **الأمواج الجسمية Body waves**؛ لأنها تنتقل داخل الأرض.

الأمواج السطحية Surface waves تنتقل **الأمواج السطحية Surface waves** على سطح الأرض فقط، وهي أبطأ الأمواج الزلزالية، لذلك فهي ثالث الأمواج وصولًا إلى محطة الرصد وتتسبب في حركة جسيمات سطح الأرض حركة جانبية إلى أعلى وإلى أسفل كحركة الأمواج البحرية، كما في **الشكل 17–6**. وتعد من أكثر الأمواج الزلزالية تدميرًا؛ لأنها تسبب معظم أنواع الحركة، كما أنها تستغرق وقتًا أطول لتعبر الصخور.

نشأة الأمواج الزلزالية Generations of seismic waves تنشأ أولى الأمواج الزلزالية الجسمية في نقطة الكسر في صخور القشرة الأرضية، وتنتشر منها في جميع الاتجاهات، وتسمى هذه النقطة **بؤرة الزلزال Focus**، وتقع في معظم الأحيان على عمق يبلغ عدة كيلومترات أسفل سطح الأرض. أما النقطة التي تقع على سطح الأرض مباشرة فوق البؤرة فتسمى **المركز السطحي للزلزال Epicenter** **الشكل 18–6**، وتنشأ الأمواج الزلزالية السطحية عن المركز السطحي للزلزال، وتنتشر منها على سطح الأرض.

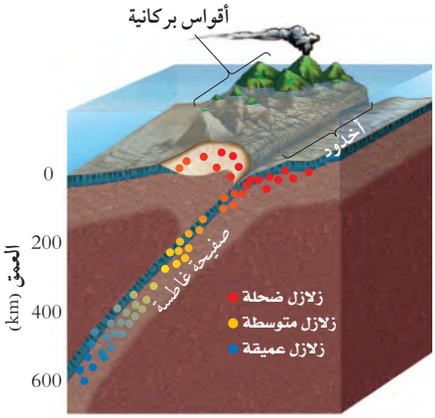


الشكل 17–6 تمتاز الأمواج الزلزالية بنوع الحركة التي تسببها للصخور التي تمر فيها؛ حيث تكون حركة جسيمات الصخر إلى الأمام وإلى الخلف وفي نفس اتجاه حركة أمواج – P بينما تكون حركة الأمواج – S عمودية على خط انتشار الموجة، وإلى أعلى وإلى أسفل، ومن جانب إلى آخر في الأمواج السطحية.



الشكل 18–6 بؤرة الزلزال هي النقطة التي ابتدأ عندها تشكُّل الكسر في الصدع. وتسمى النقطة التي تقع على سطح الأرض مباشرة فوق البؤرة المركزَ السطحيَّ للزلزال.

استنتج. حدد النقطة التي يكون عندها الدمار الذي تسببه الأمواج السطحية أكبر ما يمكن. **المركز السطحي للزلزال**



الشكل 19–6 تصنف الزلازل بناء على عمق البؤرة إلى زلازل ضحلة ومتوسطة وعميقة. وتعد الزلازل الضحلة أكثرها تدميرًا.

الشكل 20–6 أحد أجهزة مقياس الزلازل (السيزمومتر) الحديثة.

وتنتقل الطاقة المنبعثة من بؤرة الزلزال في جميع الاتجاهات على هيئة موجات زلزالية. وتبلغ قوة الزلازل أكبر ما يمكن في بؤرة الزلزال، وكلما ابتعدنا عن البؤرة قلّت قوة الموجات الزلزالية وخفتت بسبب المقاومة التي تواجهها في أثناء مرورها في صخور القشرة الأرضية. وتصنف الزلازل بحسب عمق البؤرة، كما في **الشكل 19–6**، إلى ثلاثة أنواع: الزلازل الضحلة التي تنشأ على عمق أقل من 70 km، والزلازل المتوسطة التي تنشأ على عمق 70–300 km، والزلازل العميقة التي تنشأ على عمق 300–700 km.

ويوضح **الشكل 19–6** العلاقة بين نطاق الطرح – الناتج عن غطس صفيحة أرضية أسفل صفيحة أخرى – وحدوث الزلازل. ولا تحدث الزلازل العميقة إلا في هذا النوع من الحدود. والمسؤول عن حدوث الزلازل في هذا النطاق – وبخاصة العميقة منها – هو الصفيحة الغاطسة الصلبة؛ حيث يسبب غطس الصفيحة إلى أسفل تراكم الجهود فيها، مما يؤدّي إلى تكسرها وتحرير طاقة على شكل أمواج زلزالية ذات بؤر مختلفة الأعماق.

مقياس الزلزال ومخططه
Seismometer and Seismogram

لا يمكن الإحساس بالاهتزازات الناجمة عن الأمواج الزلزالية على مسافات بعيدة جدًّا عن المركز السطحي، ولكن يمكن اكتشافها عن طريق جهاز حساس يسمى **مقياس الزلزال (السيزمومتر) Seismometer**، انظر **الشكل 20–6**.

تتألف بعض أجهزة السيزمومتر من أسطوانة دوارة مغطاة بورقة وقلم أو أي أداة للتسجيل، وكتلة معلقة كالبندول. تختلف أجهزة السيزمومتر في تصميمها، ولكنها

وزارة التعليم
Ministry of Education
2023 - 1445

جميعًا تتضمن إطارًا مثبتًا في الأرض، وكتلة معلقة على نابض أو سلك، كما في **الشكل 21–6**.

عندما يحدث الزلزال تبقى الكتلة والقلم في أثناء حدوث الاهتزاز من دون حركة بسبب القصور الذاتي، فيتم تسجيل حركة الكتلة بالنسبة إلى الإطار على أداة للتسجيل كالورقة، أو تُسجل مباشرة على أقراص حاسوبية. ويسمى السجل الذي يتم الحصول عليه من السيزمومتر **مُخَطّط الزلزال (السيزموجرام) seismogram**، ويوضح **الشكل 22–6** جزءًا من السيزموجرام.

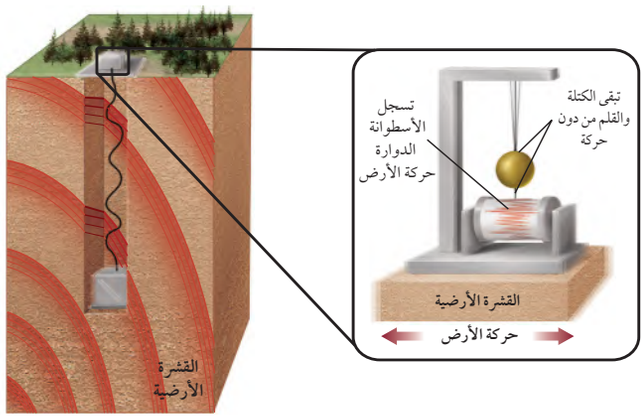
وتستخدم في الوقت الحاضر أجهزة حديثة لرصد الزلازل وتحليلها؛ حيث تستخدم الأقمار الاصطناعية في نقل البيانات من محطات الرصد الزلزالي إلى باقي المحطات في العالم. ويتم استخدام برمجيات حديثة في تحليل البيانات وتحديد مواقع الزلازل وقوتها ويستخدم الحاسب الآلي في تخزينها.

الصفحة التالية

ماذا قرأت؟ لخص الفرق بين السيزمومتر والسيزموجرام.

البُعد عن المركز السطحي للزلزال Distance from the epicenter

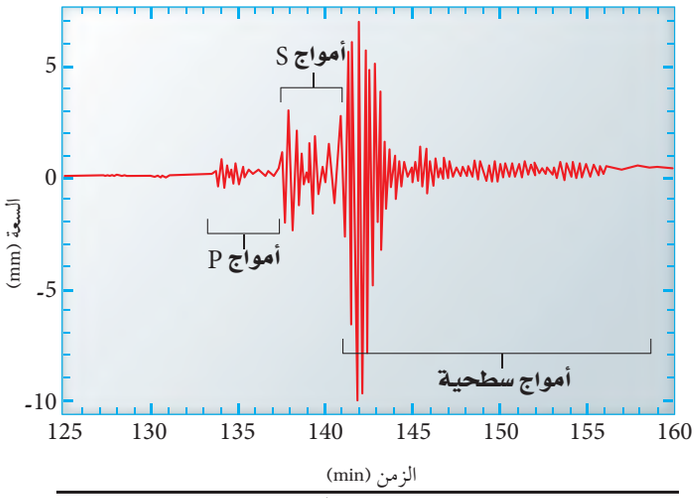
لاحظ من **الشكلين 22–6** و **23–6** أن أمواج P هي أول الأمواج الزلزالية وصولاً إلى محطات الرصد، ويليها الأمواج الثانوية، وأخيرًا الأمواج السطحية. يلاحظ أن الفرق الزمني بين منحنيي P و S في **الشكل 23–6** يزداد كلما زاد البُعد عن المركز السطحي للزلزال، أي أن فرق زمني الوصول بين أمواج P و S في السيزموجرام يكون أكبر في المحطات البعيدة عن المركز السطحي للزلزال مقارنة بالمحطات القريبة. ويُستعمل هذا الفرق الزمني في حساب بُعد المركز السطحي للزلزال عن محطة الرصد التي سجلت الزلزال.



الشكل 21–6 في الإطار جهاز سيزمومتر قديم مثبت في الأرض. عندما يحدث الزلزال يتحرك الإطار بينما تبقى الكتلة المعلقة وملحقاتها دون حركة، فيُسجل الكتلة والقلم الحركة النسبية للإطار.

قارن ذلك بأجهزة الاستقبال والإرسال الحديثة.

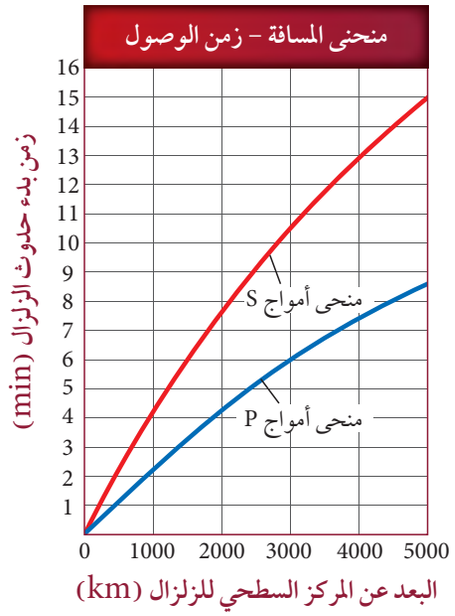
السيزمومترات الحديثة توفر قدرات رصد وتحليل أكثر تقدمًا ودقة مقارنة بالأجهزة القديمة.



الشكل 22–6 يوفر السيزموجرام سجلاً للأمواج الزلزالية التي عبرت نقطة معينة.

وزارة التعليم
Ministry of Education
2023 - 1445

الخاصية	السيزمومتر	السيزموجرام
الوظيفة	يقيس الاهتزازات الأرضية	يوضح تغيرات الاهتزازات الأرضية بمرور الوقت
الشكل	جهاز مادي	رسم بياني
البيانات	كمية الاهتزازات الأرضية	تغيرات الاهتزازات الأرضية بمرور الوقت
الاستخدام	رصد الزلازل	تحليل البيانات الزلزالية



الشكل 23–6 تظهر منحنيات المسافة – زمن الوصول للأمواج الزلزالية أن الفترات الزمنية التي تستغرقها أمواج P و S للوصول إلى محطات رصد الزلازل مختلفة لاختلاف بُعد المحطات عن المركز السطحي للزلزال.

حدد الفترة الزمنية التي تستغرقها أمواج P لزلزال يقع على بُعد 2000 km لتصل محطة الرصد. وما الفترة الزمنية التي تستغرقها أمواج S لقطع المسافة نفسها؟

أدلة على بنية الأرض الداخلية
Clues to Earth's Interior

لا تعمل الأمواج الزلزالية على اهتزاز سطح الأرض فقط وما تُحدثه من دمار، بل تنتقل أيضًا إلى داخلها، لذلك فهي توفر معلومات قيّمة للعلماء تمكنهم من بناء نموذج عن بنية الأرض الداخلية.

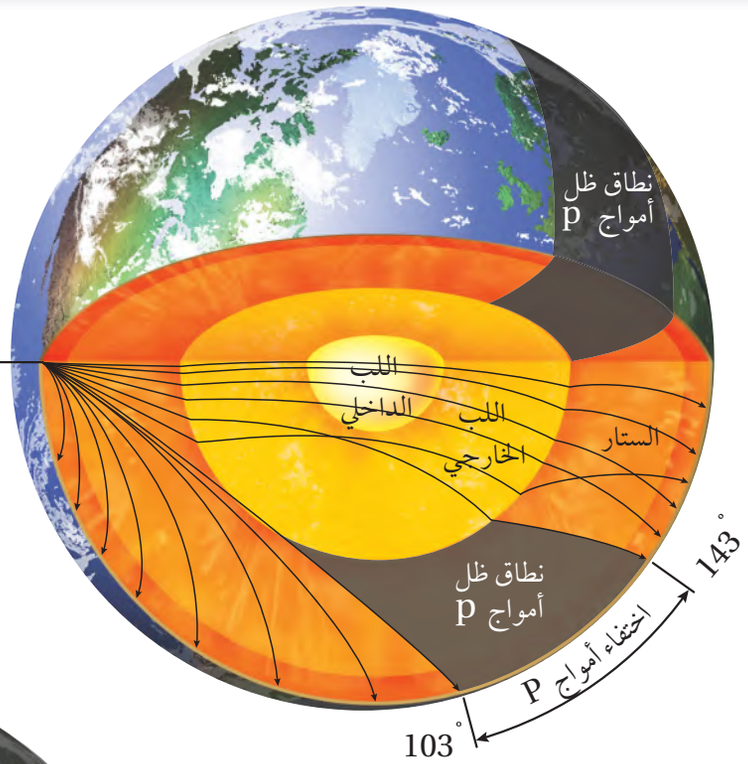
مكونات الأرض Earth's composition يوضح **الشكل 24–6** أن الأمواج الزلزالية يتغير مسارها وسرعتها عندما تواجه حدودًا فاصلة بين طبقتين مختلفتين في مكوناتهما، وبذلك استطاع العلماء أن يحددوا سُمك طبقات الأرض ومكوناتها بمقارنة سرعة الأمواج الزلزالية مع القياسات التي حصلوا عليها في المختبرات لأنواع مختلفة من الصخور. وتوصلوا نتيجة لذلك إلى أن الستار العلوي يتكون من صخر البيرودوتيت (يتكون معظمه من معدن الأوليفين)، وأن اللب الخارجي يتكون معظمه من مصهور الحديد والنيكل، أما اللب الداخلي فهو في حالة صلبة ويتكون معظمه من الحديد والنيكل.

بنية الأرض الداخلية Earth's internal structure تتغير سرعة الأمواج الزلزالية واتجاهها عندما تواجه موادّ مختلفة في باطن الأرض. لاحظ من **الشكل 25–6** كيف تتّبع أمواج P و S في البداية مساراتٍ مباشرةً إلى حد ما في أثناء عبورها الستار، ولكنها تعاني من انكسار وانعكاس عندما تعبر الحدود الرئيسة بين طبقات الأرض. لذلك استطاع علماء الزلازل من خلال رصد زمن ومسافة الأمواج الزلزالية ومسار كل موجة وتمثيلها بيانيًّا في منحنيات المسافة – زمن الوصول، معرفة أن مكونات الأرض والكثافات تختلف من الداخل.

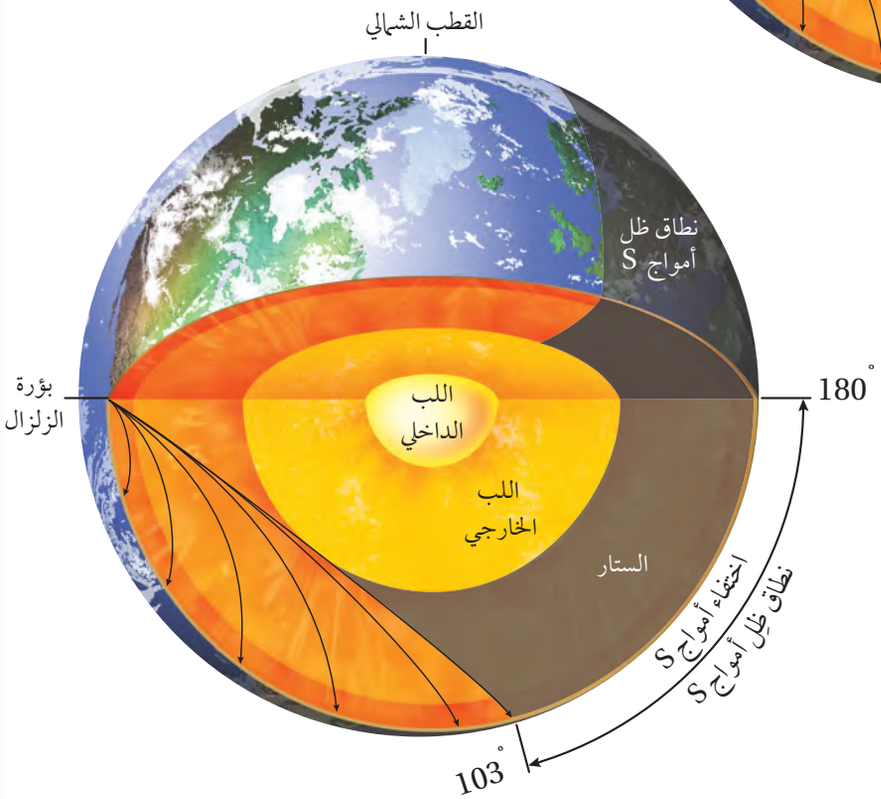
وزارة التعليم
Ministry of Education
2023 - 1445

الأمواج الزلزالية Seismic Waves

يؤدي انكسار أمواج P عند اللب الخارجي إلى تكوين نطاق ظل على سطح الأرض، بحيث لا تظهر أمواج P على المخطط الزلزالي (السيزموجرام) على بعد زاويّ يتراوح بين $143^\circ - 103^\circ$ عن المركز السطحي للزلزال، بينما تظهر أمواج P على أجهزة السيزمومتر في الجانب المقابل للمركز السطحي للزلزال.

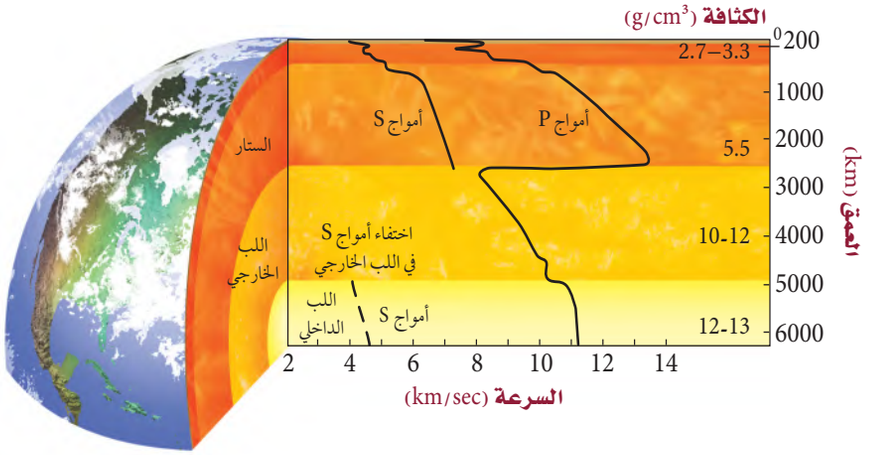


لأن أمواج S لا تمر من خلال اللب الخارجي للأرض السائل، لذلك فإنها لا تظهر ضمن نطاق يسمى ظل أمواج S على بعد زاويّ يتراوح بين $180^\circ - 103^\circ$ عن المركز السطحي للزلزال.



الشكل 24–6 يزودنا كل من زمن الوصول وسلوك الموجات الزلزالية بصورة تفصيلية لبنية الأرض الداخلية. كذلك تزودنا هذه الأمواج بأدلة على مكونات أجزاء الأرض المختلفة.

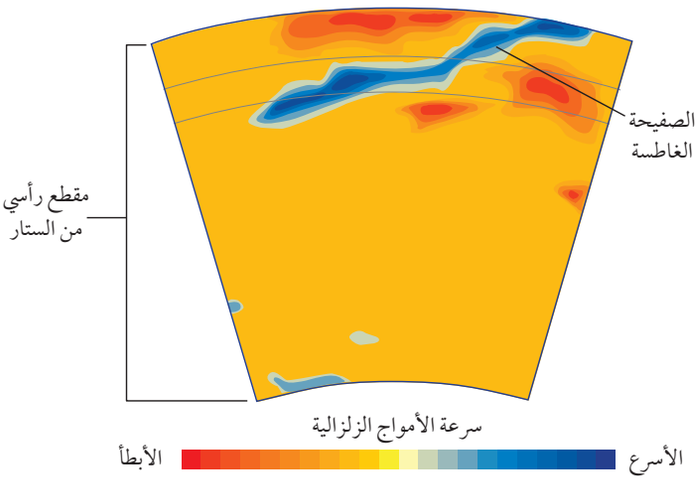
وزارة التعليم
Ministry of Education
2023 - 1445



الشكل 25–6 تختلف طبقات الأرض الداخلية في مكوناتها؛ وقد استطاع العلماء تحديد مكوناتها من خلال معرفة سلوك الأمواج الزلزالية عبر أنواع مختلفة من الصخور.

ماذا يحدث لأمواج S عندما تنشأ بفعل الزلازل؟ للإجابة عن هذا السؤال: أولًا، توصل علماء الزلازل إلى أن أمواج S لا تسير في الأوساط السائلة، ولاحظوا أنها لا تسير في مركز الأرض، مما جعلهم يكتشفون أن جزءًا من باطن الأرض يوجد في الحالة السائلة القليلة اللزوجة. وقد أيّدت البيانات التي جُمعت حول مسار الأمواج الزلزالية وزمن وصولها في باطن الأرض إلى أن لب الأرض الخارجي سائل ولبها الداخلي صلب.

تصور باطن الأرض Imaging Earth's interior تتأثر كل من سرعة الأمواج الزلزالية وكثافة الصخور بعوامل أخرى غير العمق، منها درجة الحرارة، يمكن الحصول على صور لبنية الأرض الداخلية تتضمن بعض التراكيب، ومنها الصفيحة الغاطسة التي تتضح في **الشكل 26–6**. ويمكن تشبيه هذه الصور بالصور الملتقطة بالأشعة السينية.



الشكل 26–6 تم التقاط هذه الصورة في اليابان من خلال تتبع مسارات الأمواج الزلزالية في باطن الأرض؛ حيث تشير المناطق الحمراء إلى سرعات الأمواج الزلزالية الأبطأ من القيمة المتوسطة، وتشير المناطق الزرقاء إلى سرعات الأمواج الأسرع من القيمة المتوسطة. كذلك تمثل المنطقة الزرقاء في الصورة الصفيحة الغاطسة.

وزارة التعليم
Ministry of Education
2023 - 1445

التقويم 3–6

الخلاصة

- أنواع الأمواج الزلزاليــة ثلاثة: أولية وثانوية وسطحية.
- مقياس الزلازل (الســيزمومتر) جهاز يســتقبل الأمواج الزلزالية، ويسجلها على مخطط الزلزال (السيزموجرام).
- استطاع العلماء أن يحددوا المركز السطحي للــزلازل من الفــرق الزمني بــين زمني وصول كل من أمواج P وأمواج S.
- تتغير سرعة واتجــاه كل من أمواج P وأمواج S عندما تواجه حدودًا فاصلة بين مواد مختلفة.
- يمكن الحصول على صورة مفصلة عن مكونــات الأرض الداخلية من خلال تحليل الأمواج الزلزالية التي تعبر باطن الأرض.

فهم الأفكار الرئيسة

1. **وضح** كيف تستعمل كل من أمواج P وأمواج S في تحديد خواص لب الأرض؟
2. **ارسم** مخططًا لسيزمومتر يوضح كيف تُقاس اهتزازات الأرض وتسجَّل على السيزموجرام.
3. **صف** كيف يُستعمل منحنى المسافة–زمن الوصول في دراسة الزلازل؟
4. **ميز** بين سرعة الأمواج الزلزالية في أثناء مرورها في المواد الباردة والمواد الساخنة.

التفكير الناقد

5. **اربط** بين حركة الأمواج الزلزالية مع ملاحظات شخص يراقب كيفية انتقالها على سطح الأرض.
6. **استنتج** باستعمال **الشكل 22–6** الذي يمثل مخططًا زلزاليًّا، فسّر لماذا تعد الأمواج السطحية أكثر الأمواج الزلزالية تدميرًا، على الرغم من أنها آخر الموجات وصولاً إلى محطات الرصد؟

الكتابة في الجيولوجيا

7. اكتب مقالة حول الطرائق التي يعتمدها العلماء في معرفة مكونات الأرض الداخلية.

في الصفحة التالية

جواب 1: تعتمد سرع الأمواج وتختلف سرعتها واتجاهها نتيجة للمواد التي تمر فيها (حيث أن أمواج S لا تسير في الأوساط السائلة ولا تسير في مركز الأرض).

جواب 2: يعتمد على الطالب ويجب أن توضح الرسوم كيف تسجل حركة الكتلة بالنسبة للإطار.

جواب 3: يستخدم العلماء منحنيات المسافة وزمن الوصول والتي تزودهم بمتوسط أزمنة وصول جميع الأمواج الزلزالية وهي تساعد العلماء على تحديد موقع المركز السطحي للزلزال.

جواب 4: تقل سرعة الأمواج الزلزالية بشكل عام مع ارتفاع درجة الحرارة ولذلك تقل سرعة الأمواج في المناطق الساخنة وتزيد سرعتها في المناطق الباردة.

جواب 5: قد يلاحظ الشخص أن الأمواج الزلزالية تشبه بحركتها أمواج البحر فالأمواج P تبدو وكأنها تقترب وتبتعد من الشخص أما الأمواج S فهي تحرك سطح الأرض للأمام والخلف.

جواب 6: وذلك لأن الأمواج السطحية تسبب في حركة جسيمات الأرض وتحرر جميع طاقتها على سطح الأرض حيث يوجد الناس والمنشآت.

لفهم مكونات الأرض الداخلية، يستعين العلماء بمجموعة من الطرق العلمية المتطورة التي تسمح لهم بالكشف عن أسرار الطبقات الباطنية دون الحاجة للتنقيب المباشر. إليكم بعض هذه الطرق مع إضافات توضح أهميتها:

الطرق السيزمية: تُعد الأداة الأساسية للعلماء، حيث تُظهر الموجات الزلزالية التي تنتقل عبر الأرض معلومات قيمة عن تركيب الصخور وخصائصها. تُقسم هذه الموجات إلى موجات أولية (P-waves) وموجات ثانوية (S-waves)، وكل منها له سرعة انتشار مختلفة تُعطي دلالات على نوع المادة التي تمر بها.

الطرق الكهربائية: تُستخدم لقياس المقاومة الكهربائية للصخور، وهذا يُساعد في تحديد تركيبها ومحتوى المياه والمعادن فيها. تُعطي هذه الطريقة صورة واضحة عن التغيرات في الخصائص الكهربائية للطبقات الجيولوجية.

الطرق التثاقلية: تُستخدم لقياس تغيرات الجاذبية الأرضية التي تُشير إلى كثافة الطبقات الداخلية. تُساعد هذه الطريقة في تحديد وجود الفراغات أو الكهوف تحت السطح.

الطرق المغناطيسية: تُستخدم لقياس التغيرات في المجال المغناطيسي للأرض، والتي تُعطي معلومات عن التركيب المعدني للصخور والتغيرات في درجات الحرارة.

بالإضافة إلى هذه الطرق، يستخدم العلماء أيضًا التحليل الكيميائي للصخور البركانية والمعادن التي تصل إلى سطح الأرض، والتي تُعطي فكرة عن التركيب الكيميائي للطبقات الداخلية. كما يُمكن استخدام التحليل الجيوكيميائي للغازات البركانية للكشف عن تركيب الصهارة والعمليات الجيولوجية الحاصلة في العمق.

هذه الطرق تُمكن العلماء من رسم خريطة دقيقة للطبقات الداخلية للأرض، وتُساهم في فهم العمليات الجيولوجية وتاريخ تطور كوكبنا.