رابط الدرس الرقمي
www.ien.edu.sa

3-3

الأهداف

- تقارن بين أنواع الصخور المتحولة وأسباب تشكلها.
- تميز بين أنسجة التحول.
- تفسر كيفية حدوث التغيرات المعدنية والنسيجية في أثناء عملية التحول.

مراجعة المفردات

الصخور النارية الجوفية: صخور تشكّلت من صهارة بردت وتبلورت ببطء تحت سطح الأرض.

المفردات الجديدة

متورقة (صفائحية)
غير متورقة (غير صفائحية)
التحول الإقليمي
التحول بالتماس
التحول الحراري المائي
دورة الصخر

الصخور المتحولة Metamorphic Rocks

الفكرة الرئيسة تنشأ الصخور المتحولة عندما تتعرض صخور سابقة لها لزيادة الضغط والحرارة والمحاليل الحرارية المائية.

الربط مع الحياة. عند صناعة وطبخ المخبوزات تتحول جميع مكوناتها الأولية إلى شيء جديد. وكذلك تتغير خصائص الصخور إلى شيء جديد عندما تتعرض لدرجات الحرارة المرتفعة، وينتج عن ذلك صخور مختلفة كليًّا.

تعرُّف الصخور المتحوّلة

Recognizing Metamorphic Rocks

يوضح الشكل **15–3** صخورًا تحوّلت. كيف عرف الجيولوجيون حدوث ذلك؟ تزداد درجة الحرارة والضغط كلما تعمقنا في باطن الأرض، وعندما ترتفعان بقدر كافٍ تنصهر الصخور لتشكّل الصهارة. ولكن ما الذي يحدث لو لم تصل الصخور إلى درجة الانصهار؟ عندما تجتمع الحرارة والضغط العاليان، ويغيران نسيج الصخر ومكوناته المعدنية أو مكوناته الكيميائية من دون انصهاره يتشكّل الصخر المتحوّل. وكلمة تحول بالإنجليزية metamorphism مشتقة من الكلمة اليونانية meta بمعنى تغيّر، وكلمة morphe ومعناها شكل؛ إذ يتغير شكل الصخر في أثناء التحول، لكنه يبقى صلبًا.

وتتطلب عملية التحول درجات حرارة عالية، مصدرها حرارة باطن الأرض؛ ويتم ذلك بالدفن العميق، أو من الأجسام النارية الجوفية القريبة. أما الضغط العالي الذي تتطلبه عملية التحول فيتوافر بالدفن العميق أيضًا، أو من التضاغط الناتج في أثناء عملية تكوّن الجبال.

الشكل 15–3 يتطلب طي طبقات هذه الصخور أو ثنيها إلى الشكل الذي هي عليه اليوم وجود قوى كبيرة.
كوِّن فرضية للتغيرات التي حدثت للرسوبيات بعد استقرارها.

المعادن المتحولة Metamorphic minerals كيف يمكن أن تتغير المعادن من دون أن تنصهر؟ كما درستَ سابقًا، تتبلور المعادن من صهارة، وتبقى مستقرة ضمن مدى من درجات الحرارة المختلفة، وينطبق هذا المدى أيضًا على المعادن المكونة للصخور المتحوّلة، التي خضعت لتغيرات وهي في الحالة الصلبة. ففي أثناء التحول تتغير المعادن في الصخر إلى معادن جديدة بفعل ظروف الضغط والحرارة الجديدة. وقد قام العلماء بتجارب لتعرّف الظروف التي تؤدّي إلى تكوّن معادن جديدة تكرر ظهورها في الصخور المتحولة؛ وذلك لتفسير ما الذي يؤدي إلى تحوّل هذه الصخورداخل القشرة الأرضية. ويوضح الشكل **16–3** بعض المعادن المتحولة الشائعة.

ماذا قرأت؟ وضح ما المعادن المتحولة؟

أنسجة الصخور المتحولة Metamorphic textures تصنف الصخور المتحولة إلى مجموعتين على أساس النسيج: صفائحية (متورقة)، وغير صفائحية (غير متورقة). ويستعمل الجيولوجيون الأنسجة والمكونات المعدنية لتعرف الصخور المتحولة. ويوضح الشكل **17–3** كيفية استعمال هاتين الخاصيتين في تصنيف الصخور المتحولة.

الصخور المتورقة Foliated rocks تتميز الصخور المتحولة **المتورقة Foliated** بوجود المعادن في صفائح وأحزمة (خطوط)؛ حيث يتسبب الضغط العالي في أثناء التحول في صفّ المعادن الصفائحية أو الإبرية الشكل، بحيث يكون محورها الطويل متعامدًا مع الضغط، كما في الشكل **18–3** في الصفحة الآتية. وينتج عن هذا الاصطفاف المتوازي للمعادن التورق الذي تلاحظه في الصخور المتحولة المتورقة.

الستوروليت

المايكا

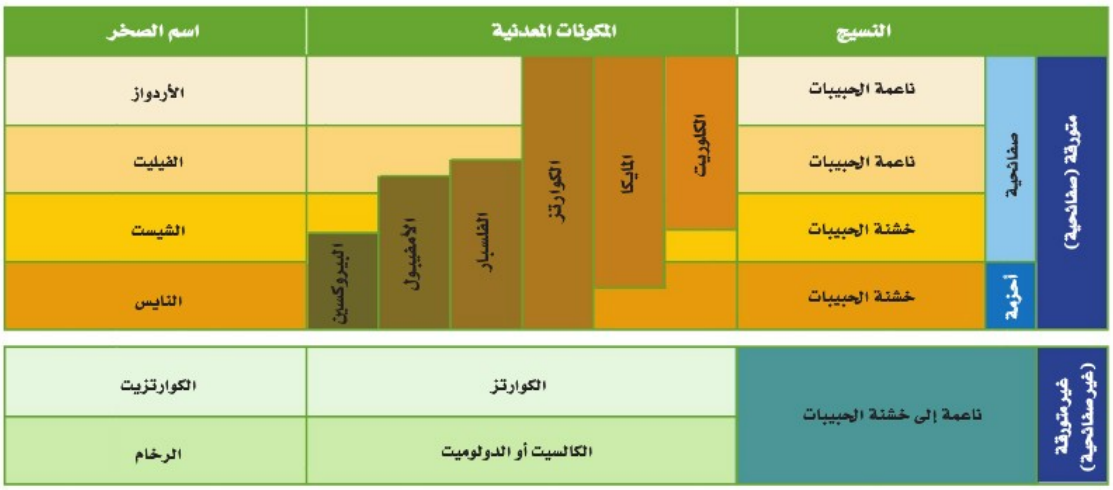
الجارنت

التلك

الشكل 16–3 معادن متحولة، منها المايكا والستوروليت والجارنت والتلك وتوجد بلوراتها بألوان وأشكال وأحجام متعددة، قد يكون لونها بين القاتم والفاتح.

الشكل 17–3 توازي الزيادة في حجم الحبيبات التغير في المكونات وتطور التورّق. ولا يعد حجم الحبيبات عاملًا في تصنيف الصخور غير المتورقة.

مخطط الصخور المتحولة

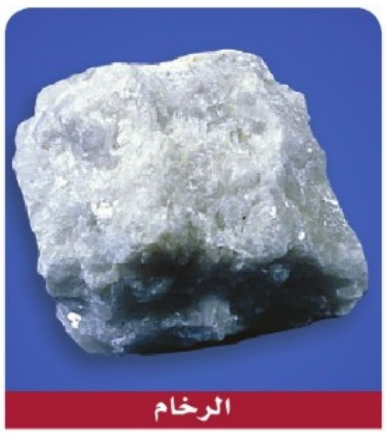


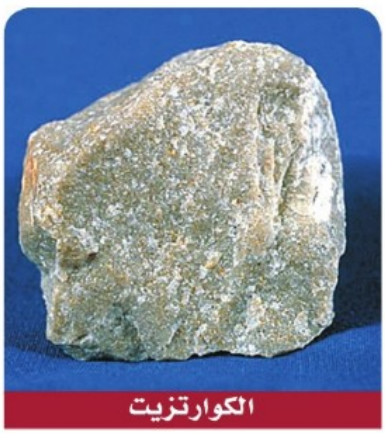
الشكل 18–3 يتطور التورق عندما يؤثر الضغط في اتجاهين متضادين، ويكون التورق متعامدًا على اتجاه الضغط.

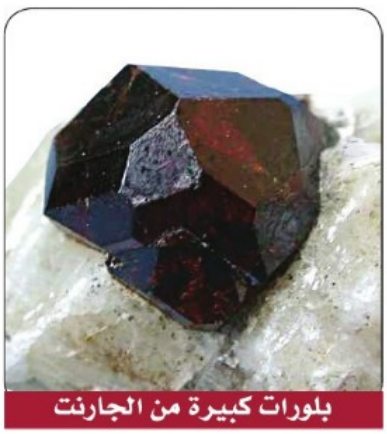
الصخور المتحولة غير المتورقة Nonfoliated rocks

تختلف الصخور المتحولة غير المتورقة Nunfoliated عن الصخور المتورقة في أنها مكونة من معادن ذات بلورات كتلية الشكل. ويوضح الشكل **19–3** مثالين شائعين على الصخور غير المتورقة، هما الرخام والكوارتزيت. والكوارتزيت صخر قاس، وغالبًا ما يكون فاتح اللون، وينشأ عن تحول الحجر الرملي الغني بالكوارتز، بينما ينشأ الرخام عن تحول الحجر الجيري. ونادرا ما تُحفظ الأحافير في الصخور المتحولة. وبعض أنسجة أنواع الرخام ملساء تشكّلت من تداخل حبيبات الكالسيت. وتستعمل أنواع الرخام هذه غالبًا في أرضيات المنازل. ويتم استخراج الرخام في المملكة العربية السعودية من عدة أماكن منها جبل خنوقة شمال شرقي عفيف، بينما يستخرج الرخام الأسود من جبل غرور ودمخ شمال غرب حلبان. ويمكن في ظروف معينة أن يكبر حجم المعادن المتحولة الجديدة، بينما تبقى المعادن المحيطة بها صغيرة الحجم. وعلى الرغم من أن هذه البلورات الكبيرة تشبه البلورات الكبيرة جدًّا في البيجماتيت الجرانيتي، إلا أنها تختلف عنها؛ فبدلًا من أن تتشكّل من الصهارة فإنها تتشكّل في الصخر الصلب من خلال إعادة ترتيب الذرات في أثناء التحول. ويوضح الشكل **19–3** معدن الجارنت الذي تشكل بهذه الطريقة.

الشكل 19–3 تختلف الصخور المتحولة الظاهرة في الشكل عن الصخور الرسوبية في أنها لا تُظهر وجود الأحافير فيها؛ لأن الحرارة الشديدة التي تعرضت لها أزالت تلك الأحافير. ومع ذلك، لا تؤدي عملية التحول دائمًا إلى تدمير التطبق المتقاطع وعلامات النيم التي يمكن مشاهدتها في بعض أنواع الكوارتزيت.


الرخام


الكوارتزيت


بلورات كبيرة من الجارنت

درجات التحول Grades of Metamorphism

تـؤدي توافقـات مختلفة من درجات الحرارة والضغـط إلى حدوث درجات تحول مختلفة. يقـترن التحول المنخفض الدرجة بدرجات الحـرارة والضغط المنخفضين وبمجموعـة محـددة مـن المعـادن والأنسـجة، بينما يقـترن التحول العـالي الدرجة بدرجـات حرارة وضغط مرتفعين وبمجموعة مختلفة من المعادن والأنسـجة. أما التحول المتوسط الدرجة فيقع بين التحولين منخفض الدرجة وعالي الدرجة.

ويوضح الشكل **20–3** المعادن الموجودة في صخر طَّفل متحول على درجات تحول مختلفة. لاحظ التغير في المكونات عندما تتغير الظروف من تحول منخفض الدرجة إلى عالي الدرجة. ويسـتطيع الجيولوجيون أن ينشـئوا ما يسـمى خرائط تحوّل من خلال إسقاط أماكن المعادن المتحولة على خريطة اقتصادية، وذلك لتحديد أماكن معادن متحولة إقتصادية ، منها الجارنت والتلك.

الشـكل 20–3 تحـول صخر الطَّفـل يؤدي إلى تكـون معادن مختلفة الألـوان في درجات تحول مختلفة.

أنواع التحول Types of Metamorphism

يمكـن أن تنتج آثـار التحول عن التحـول بالتماس والتحـول الإقليمي والتحول الحراري المائي، وتزودنا المعادن التي تشـكّلت ودرجة التغير التي حدثت للصخر بمعلومات عن نوع التحول ودرجته.

مختبر حل المشكلات

تفسير الرسوم العلمية التوضيحية

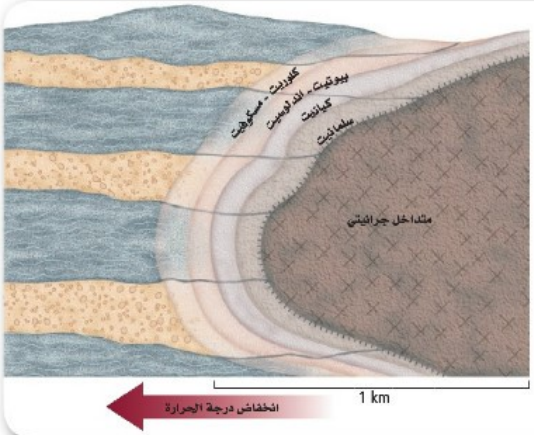
أي المعادن المتحولة يتشـكّل؟ يعتمد تشـكّل المعادن في الصخور المتحولـة عـلى درجـة تحـول الصخـر الأصـلي ومكوناتـه. ويوضـح الشـكل أدناه والشـكل **19–3** مجموعـات المعادن التي تتشكّل تحت ظروف مختلفة من التحول.

التحليل

1. مـا المعـدن الـذي يتشـكّل إذا تعـرض الطَّفـل والبازلت لتحول منخفض الدرجة؟
2. مـا المعـدن الذي يتشـكّل في الطَّفـل تحت ظروف التحول عالي الدرجة ، ولا يتشكّل في البازلت؟

التفكير الناقد

3. قارن مجموعات المعادن التي تتوقع تشكّلها في تحول متوسط الدرجة في كل من البازلت والطَّفل.
4. صـف الاختلاف في المكونات الرئيسـة بين الطَّفل والبازلت. كيف تعكس هذه الاختلافات المعادن التي تنشأ في أثناء التحول؟
5. فسر هناك تغير طفيف في المكونات المعدنية عندما يتحـول الحجـر الجـيري إلى رخـام؛ إلا أن معدن الكالسـيت يبقـى هو المعدن السـائد. فسر سـبب حدوث ذلك.



الشكل 21–3 قد يسبب التحول بالتماس الناتج عن حقن (المتداخل الجرانيتي) تشكّلَ أحزمة (نطق) من المعادن المتحولة.

وظّف ما تعلمته عن التحول بالتماس لتحديد نوع الصخر الموجود الآن على حافة الجسم الناري الجوفي.

التحول الإقليمي Regional metamorphism ينشأ **التحول الإقليمي regional metamorphism** عندما تتعرض مناطق واسعة من القشرة الأرضية لدرجة حرارة وضغط مرتفعين، وتتراوح درجة التحول بين منخفض وعالٍ. أما نتائج التحول الإقليمي فتتضمن التغير المعدني ونوع الصخر، بالإضافة إلى طي وتشويه طبقات صخور المنطقة. ويوضح الشكل **15–3** طبقات صخور مطوية عانت من التحول الإقليمي.

التحول بالتماس contact meramorphism عندما تصبح مادة مصهورة كالأجسام النارية الجوفية، في تماس مع صخور صلبة، يحدث تأثير محلي نسميه **التحول بالتماس contact meramorphism** تتشكّل مجموعات المعادن المميزة للتحول بالتماس على درجات حرارة عالية وضغط متوسط إلى منخفض. ويوضح الشكل **21–3** نطق معادن مختلفة تحيط بالجسم الناري الجوفي. ولأن درجة الحرارة تنخفض عند الابتعاد عن الجسم الناري الجوفي فإن تأثيرات التحول تنخفض أيضًا مع المسافة. تعلمت سابقًا أن المعادن تتبلور عند درجات حرارة محددة، فالمعادن المتحولة التي تتشكّل عند درجات حرارة أعلى تكون أقرب إلى الجسم الناري الجوفي، حيث أعلى درجة حرارة، ولأن اللابة تبرد بسرعة فإن الحرارة لا يمكنها أن تخترق كثيراً صخور السطح، لذا فإن تأثير التحول بالتماس الناتج عن الصخور النارية البركانية يكون محدودًا.

التحول الحراري المائي hydrothermal metamorphism يحدث **التحول الحراري المائي hydrothermal metamorphism** عندما تتفاعل مياه ساخنة جدًّا مع الصخر، فتغير مكوناته الكيميائية والمعدنية. وجملة الحراري المائي بالإنجليزية hydrothermal مشتقة من الكلمتين اليونانيتين hydro بمعنى الماء، و thermal بمعنى حرارة. ولما كانت الموائع في أثناء التحول تهاجر من الصخر وإليه، لذا فإن المكونات الكيميائية والنسيج الأصليين يمكن أن يتغيرا. وتكون التغيرات الكيميائية شائعة في التحول بالتماس بالقرب من الأجسام النارية الجوفية والبراكين النشطة. وغالبًا ما تتوضّع خامات اقتصادية بهذه الطريقة كالذهب والنحاس والخارصين والتنجستن والرصاص؛ فالذهب المتوضع في الكوارتز في الشكل **22–3** ناتج عن التحول الحراري المائي.

المفردات

الاستعمال العلمي مقابل الاستعمال الشائع

متداخل (متطفل)

الاستعمال العلمي: صهارة متوضعة في صخر سابق.

الاستعمال الشائع: شخص تداخل في شؤون الآخرين؛ أي اقحم نفسه.

الشكل 22–3 تتكون عروق الذهب في الكوارتز عندما يبرد المحلول الحراري المائي.

الربط مع رؤية ٢٠٣٠
رؤية VISION 2030
المملكة العربية السعودية KINGDOM OF SAUDI ARABIA
مجتمع حيوي
• من أهداف الرؤية: تعظيم القيمة المتحققة من قطاع التعدين والاستفادة منها.

الأهمية الاقتصادية للصخور والمعادن المتحولة

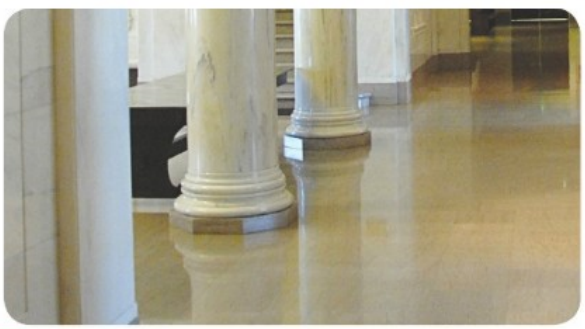
Economic Importance of Metamorphic Rocks and Minerals

أدّى نمط الحياة الحديث إلى ازدياد استخراج واستخدام موارد الأرض الطبيعية. فنحن مثلًا نحتاج إلى الملح للطهي، والذهب للتجارة، وفلزات أخرى للبناء والأغراض الصناعية، كما نحتاج إلى الوقود الأحفوري للطاقة، وإلى الصخور والعديد من المعادن في المستحضرات التجميلية، إلى غير ذلك من الاستعمالات. ويوضح الشكل **23–3** مثالين لكيفية استعمال الصخور المتحوّلة في البناء. وينتج الكثير من هذه الموارد المعدنية الاقتصادية من عمليات التحوّل، ومن بينها: فلزات الذهب والفضة والنحاس والرصاص، بالإضافة إلى موارد غير فلزية مهمة وكثيرة.

موارد المعادن الفلزية Metallic mineral resources توجد الموارد الفلزية غالبًا على شكل خامات معدنية فلزية، وعلى الرغم من اكتشاف توضّعات فلزية نقية أحيانًا، فإن الكثير من التوضّعات غير النقية تترسّب من المحاليل الحرارية المائية، متركزة على هيئةعروق، أو منتشرة في كتلة الصخر. ويكثر وجود توضّعات الذهب والفضة والنحاس في العروق الحرارية المائية للكوارتز بالقرب من الأجسام النارية الجوفية. وتوجد معظم التوضّعات الفلزية الحرارية المائية على شكل كبريتيدات، ومنها: الجالينا (PbS)، والبيريت (FeS_2)، أو على شكل أكاسيد ومنها خاما الحديد (الماجنتيت والهيماتيت)؛ وهما معدنان تشكّلا بالتوضُّع من محاليل حرارية مائيةحاملة للحديد. وفي المملكة العربية السعودية الكثير من المعادن التي توضّعت من المحاليل الحرارية المائية، ومنها: الذهب، والفضة، والنحاس.

ماذا قرأت؟ اذكر الموارد الاقتصادية التي تنتجها المحاليل الحرارية المائية.

موارد المعادن غير الفلزية Nonmetallic mineral resources يؤدي تحوّل الصخور النارية فوق القاعدية إلى إنتاج معدني التلك والإسبستوس، ولما كانت قساوة التلك تساوي 1 على مقياس موهس، فإنه يستعمل بوصفه مسحوق بودرة، ومُشحِّمًا، كما يدخل في صناعة الدهانات. أما الإسبستوس فلأنه غير قابل للانفجار، وموصليته الحرارية والكهربائية منخفضة، لذا فإنه يستعمل مضادًّا للحريق وفي مواد العزل. وقبل أن تُعرف خصائصه المسببة للسرطان، استُعمل بشكل واسع في صناعة البناء، ولا تزال كثير من البنايات القديمة تحتوي على الإسبستوس. ومن المعادن الأخرى غير الفلزية التي تَنتج عن التحوّل معدن الجرافيت، وهو المكوّن الرئيس في صناعة أقلام الرصاص.

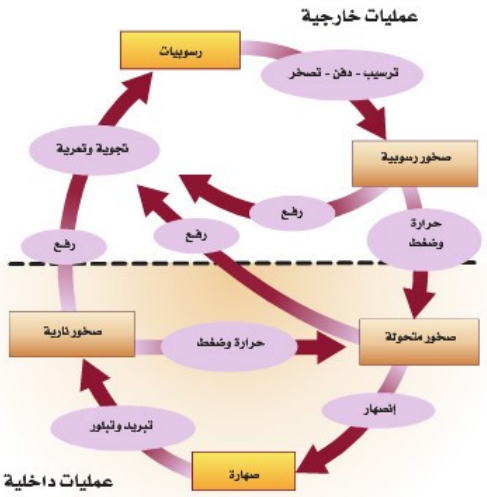


الشكل 23-3 الرخام والأردواز صخران متحولان استعملا في البناء منذ قرون.

دورة الصخر Rock Cycle

قد يتغير أي صخر إلى صخر آخر، وتسمى عملية التغير وإعادة التشكّل المستمرتان **دورة الصخر rock cycle**. ويلخص الشكل 24–3 دورة الصخر، حيث تمثل الأسهم العمليات المختلفة التي تغير صخرًا إلى نوع آخر. وتصنف أنواع الصخور الثلاثة– النارية والرسوبية والمتحولة – في مجموعات حسب طريقة تشكّلها. فالصخور النارية تتبلور من الصهارة، والصخور الرسوبية تتشكّل من رسوبيات ملتحمة أو مفككة، والصخور المتحولة تتكون عندما تتعرض الصخور الى حرارة وضغط.

وبعد أن يتشكّل الصخر، هل يحافظ على خصائصه ونوعه؟ قد يحدث ذلك، غير أن الاحتمال الأكبر هو ألا يظلّ كذلك؛ فقد تغير الحرارة والضغط الصخور النارية إلى صخور متحولة، وقد يتغير صخر متحول إلى صخر متحول آخر أو ينصهر، ومن ثم يكوّن صخرًا ناريًّا. وبدلًا من ذلك قد يتجوّى الصخر المتحول وتصيبه التعرية، ويصبح رسوبيات، وتلتحم هذه الرسوبيات وتكون صخرًا رسوبيًّا.



الشكل 24–3 تتغير الصخور باستمرار فوق سطح الأرض وتحته. توضح دورة الصخر بعض سلاسل التغيرات التي تمر بها الصخور.

التقويم 3–3

الخلاصة

- أنواع التحول الثلاثة الرئيسة هي التحول الإقليمي والتحول التماسي والتحول الحراري المائي.
- يمكن أن يكون نسيج الصخور المتحولة متورقًا أو غير متورق.
- في أثناء عملية التحول تتشكّل معادن جديدة تكون مستقرة تحت درجة الحرارة المرتفعة والضغط.
- مجموع العمليات التي تتغير خلالها الصخور بشكل مستمر من نوع إلى آخر تسمى دورة الصخر.

فهم الأفكار الرئيسة

1. **الفكرة الرئيسة** لخّص كيف يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى عملية التحوّل؟
2. لخص أسباب تشكّل النسيج المتحول المتورق.
3. طبق مفهوم دورة الصخر لتفسر كيفية تصنيف الأنواع الصخرية الرئيسة الثلاثة.
4. قارن بين العوامل التي تسبب أنواع التحول الرئيسة الثلاثة.

التفكير الناقد

5. استنتج خطوات تكون صخر الرخام من الحجر الجيري.
6. توقع موقع جسم ناري جوفي بناء على المعلومات المعدنية الآتية: جُمع معدنا الكلوريت والمسكوفيت من الجزء الشمالي من منطقة الدراسة؛ وجُمع الجارنت والستورولیت من الجزء الجنوبي من المنطقة.

الرياضيات في الجيولوجيا

7. تتشكّل غالبًا الأحجار الكريمة في صورة بلورات معدنية كبيرة في الصخور المتحولة. وتوصف الأحجار الكريمة بوحدة القيراط. يساوي القيراط 0.2 g أو 200 mg. اكتشفت بلورة جارنت كبيرة في نيويورك عام 1885 كتلتها 4.4 kg وقطرها 15 cm. ما كتلة هذه الجوهرة بوحدة القيراط؟