المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم
إدارة المناهج والكتب المدرسية

علوم الأرض والبيئة

الصف الثاني عشر

الفرع العلمي

علوم الأرض والبيئة
الصف الثاني عشر
الفرع العلمي
١٤٤٠هـ/٢٠١٩م

ISBN: 978-9957-84-772-2

المطابع المركزية

إدارة المناهج والكتب المدرسية

علوم الأرض والبيئة

الصف الثاني عشر

الفرع العلمي

الناشر
وزارة التربية والتعليم
إدارة المناهج والكتب المدرسية

يسر إدارة المناهج والكتب المدرسية استقبال آرائكم وملحوظاتكم على هذا الكتاب عن طريق العناوين الآتية:
هاتف: ٨-٥/٤٦١٧٣٠٤ فاكس: ٤٦٣٧٥٦٩ ص.ب (١٩٣٠) الرمز البريدي: ١١١١٨
أو بواسطة البريد الإلكترونيّ: E-mail: Scientific.Division@moe.gov.jo

قررت وزارة التربية والتعليم تدريس هذا الكتاب في مدارس المملكة الأردنية الهاشمية جميعها، بناءً على قرار مجلس التربية والتعليم رقم ٢٠١٧/٧ تاريخ ٢٠١٧/١/١٧م، بدءًا من العام الدراسي ٢٠١٧/ ٢٠١٨م.

حقوق الطبع جميعها محفوظة لوزارة التربية والتعليم
عمان– الأردن/ ص.ب (١٩٣٠)

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنيّة
(٢٠١٧/٣/١٥٧٠)
ISBN: 978 - 9957 - 84 - 772 - 2

أشرف على تأليف هذا الكتاب:
أ.د. عبد القادر محمد عابد (رئيسًا)
د. مصدوق محمد التاج
د. خليل محمد خضر
د. محمود محمد أبو اللبن
د. مروة خميس عبد الفتاح (مقررًا)

وقام بتأليفه كلٌّ من:
جمال يوسف عبد الله
خولة يوسف الأطرم
معن هشام الرشدان
ناديا فتحي بيطار
وجدان رشيد ملحم

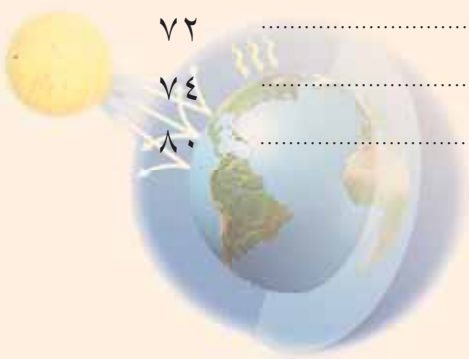
التحرير العلمي: د. مروة خميس عبد الفتاح
التصميم: عائد فؤاد سمور
الرسم: أحمد إبراهيم صبيح
التحرير اللغوي: ميسرة عبد الحليم صويص
التصوير: أديب أحمد عطوان
التحرير الفني: أنس خليل الجرابعة
الإنتاج: د. عبد الرحمن سليمان أبو صعيليك

دقق الطباعة: خولة يوسف الأطرم
راجعها: لؤي أحمد منصور

الطبعة الأولى ١٤٣٨هـ/ ٢٠١٧م
أعيدت طباعته ٢٠١٨م – ٢٠١٩م

قائمة المحتويات

الموضوع	الصفحة
المقدمة	٥
الفصل الدراسي الأول	
الوَحْدة الأولى: النجوم والمجرات	٨
الفصل الأول ١ النجوم	١٠
أولًا: أقدار النجوم وشدّة إضاءاتها الظاهرية	١٠
ثانيًا: سطوع النجوم وأقدارها المطلقة	١٥
ثالثًا: العوامل المؤثّرة في سطوع النجوم	٢١
رابعًا: مخطّط هيرتزبرنغ – رسل	٢٨
خامسًا: دورة حياة النجوم وتطوّرها	٣٠
الفصل الثاني ٢ المجرات	٣٦
أولًا: المجرات	٣٦
ثانيًا: أنواع المجرات	٣٨
الوَحْدة الثانية: تسخين سطح الأرض وغلافها الجوي	٤٤
الفصل الأول ١ تسخين الغلاف الجوي	٤٦
أولًا: الإشعاع	٤٦
ثانيًا: التدفّق	٤٩
الفصل الثاني ٢ الطاقة الحرارية على سطح الأرض	٦٣
أولًا: امتصاص الطاقة الشمسية من سطح الأرض	٦٣
ثانيًا: الاتزان الحراري على سطح الأرض	٦٦
الوَحْدة الثالثة: تاريخ الأرض	٧٠
الفصل الأول ١ الأحافير والجيولوجيا التاريخية	٧٠
أولًا: مفهوما الأحافير وعلم الأحافير	٧٢
ثانيًا: شروط التحفُّر	٧٢
ثالثًا: طرائق التحفُّر	٧٤
رابعًا: الجيولوجيا التاريخية	٨٠



الفصل الدراسي الثاني

الفصل الثاني ٢ التأريخ وعلم الطبقات ٨٩

أولًا: علم الطبقات ٨٩

ثانيًا: التعاقب الطبقي ٩٠

ثالثًا: التوافق وعدم التوافق ٩١

رابعًا: التأريخ النسبي ٩٤

خامسًا: المضاهاة ١٠٢

سادسًا: التأريخ المطلق ١٠٥

سابعًا: التأريخ بحلقات الأشجار ١١٣

الوَحْدة الرابعة: الجيولوجيا الاستكشافية وجيولوجية الأردن ١١٨

الفصل الأول ١ التنقيب والاستكشاف الجيولوجي ١٢٠

أولًا: التنقيب والاستكشاف ١٢٠

ثانيًا: مبادئ الاستكشاف الجيولوجي ١٢١

ثالثًا: مراحل التنقيب والاستكشاف ١٢٤

الفصل الثاني ٢ جيولوجية الأردن ١٣٣

أولًا: توزيع صخور الأحقاب الجيولوجية في الأردن ١٣٣

ثانيًا: التطوّر الجيولوجي في الأردن ١٣٥

ثالثًا: الثروات المعدِنية ودور الجيولوجي في استكشافها ١٣٨

رابعًا: السياحة الجيولوجية ١٤٠

الوَحْدة الخامسة: بِنية الأرض الداخلية وديناميتها ١٤٤

الفصل الأول ١ بِنية الأرض الداخلية ١٤٦

أولًا: الدراسات العلمية في تعرّف بِنية الأرض الداخلية ١٤٦

ثانيًا: نُطُق الأرض الرئيسة ١٤٩

الفصل الثاني ٢ ديناميّة الأرض ١٥٨

أولًا: فرضية انجراف القارات ١٥٨

ثانيًا: توسُّع قاع المحيط ١٦٤

ثالثًا: نظرية تكتونية الصفائح ١٧٢

رابعًا: البراكين والزلازل وعلاقتها بحركة الصفائح ١٨٢

مسرد المصطلحات ١٩٠

المراجع ١٩٤

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمةُ

جاء هذا الكتاب (علوم الأرض والبيئة) للصف الثاني عشر/ الفرع العلمي، مكملًا لما تم بناؤه في: مرحلة التعليم الأساسي، والصف الحادي عشر، ومشتملًا على خمس وَحَدات دراسية، هي:

الوَحْدة الأولى (النجوم والمجرات)، والوَحْدة الثانية (تسخين سطح الأرض وغلافها الجوي)، والوَحْدة الثالثة (تاريخ الأرض)، والوَحْدة الرابعة (الجيولوجيا الاستكشافية وجيولوجية الأردن)، والوَحْدة الخامسة (بِنية الأرض الداخلية وديناميتها).

يتضمّن المحتوى الكثير من: الجداول، والصور، والأشكال، والرسومات التوضيحية في أثناء العرض والشرح؛ بهدف تسهيل قراءته وتحليله وتفسيره، واستخدامها في حلّ بعض المسائل؛ علمًا بأنها في معظمها يُستعان بها وليست مقرّرة للحفظ، إلا في مواطن نُوِّه فيها بما هو مطلوب حفظه؛ ومن ذلك كل تعريف موضوع بين قوسين؛ ما لم يُشَر إلى غير ذلك.

وتتضمّن وحدات الكتاب بفصلَيه؛ أسئلة وأنشطة تتّسم بالتنوّع والشمولية والتشويق، وتهدف إلى تعميق المعرفة الصحيحة لدى الطالب، وتفعيل دوره في التعلّم، والارتقاء في تطوير مهاراته في البحث والاستقصاء والتحليل، وتنمية ميوله واتجاهاته الإيجابية نحو العلم والعلماء، بما ينسجم مع فلسفة التربية والتعليم.

علمًا بأنّ عملية تطوير المناهج والكتب المدرسية عملية مستمرة؛ لذا نرجو زملاءنا المعلمين وأولياء الأمور تزويدنا بأيّة ملاحظات تغني الكتاب وتسهم في تحسينه، بما يلبّي حاجات الطلبة وطموحات المجتمع الأردني.

الفصل الدراسي الأول

النتاجات

يُتوقّع منك في نهاية هذه الوَحْدة، أن تكون قادرًا على أن:

- توضّح خصائص النجم والمجرة.
- تُميّز بين مفاهيم: شدّة الإضاءة الظاهرية، والقَدْر الظاهري، والسطوع، والقَدْر المطلق.
- تُحدّد العوامل التي تؤثّر في شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم.
- تُحدّد العوامل المؤثّرة في سطوع النجم.
- تحسب سطوع النجوم بتغيّر العوامل المؤثّرة فيها.
- تستخدم قانون التربيع العكسي، وتُبيّن أهمّيّته وشروط تطبيقه.
- تحسب درجة حرارة النجم، ومساحة سطحه، وطول موجة الذروة لإشعاعه عن طريق تطبيق قانون ستيفان – بولتزمان وقانون فين للإزاحة.
- تستنتج مكوّنات النجم وصنفه الطيفي، اعتمادًا على خطوط الامتصاص.
- تتعرّف مخطّط هيرتزبرنغ – رسل لتطوّر النجوم، وتوظّفه في استنتاج الخصائص الفيزيائية العامة للنجوم.
- تُفسّر المراحل العمرية للنجوم وتطوّرها، وتفرّق بين أشكال موتها.
- توضّح مخطّط الشوكة الرنّانة لتصنيف المجرات، والتمييز بينها وَفْق: شدّة انفتاح الأذرع، وكمية الغاز والغبار الكوني بين نجومها، وأعمارها وأبعادها عن الأرض.
- تُكبِر دور العلماء في دراسة النجوم والمجرات.
- تستشعر عظمة الخالق في بديع خلق الكون.

قال الله تعالى:

﴿ وَهُوَ ٱلَّذِى جَعَلَ لَكُمُ ٱلنُّجُومَ لِتَهۡتَدُواْ بِهَا فِى ظُلُمَٰتِ ٱلۡبَرِّ وَٱلۡبَحۡرِۗ قَدۡ فَصَّلۡنَا ٱلۡأٓيَٰتِ لِقَوۡمٍ يَعۡلَمُونَ ﴾

(سورة الأنعام، الآية ٩٧).

تشغل الأرض حيزًا صغيرًا جدًّا من هذا الكون الرحيب المترامي الأطراف، الذي يضمّ في جنباته مليارات المجرات، تحوي كل واحدة منها أعدادًا هائلةً من النجوم وما قد يتبعها من كواكب وأقمار وكويكبات ونيازك وسُدُم. فما المجرات؟ وممّ تتكوّن؟ وما أنواعها؟ وما أشكالها؟ وما خصائصها الفيزيائية؟

الفصل الأول

النجوم
(Stars)

قال الله تعالى: ﴿ فَلَآ أُقۡسِمُ بِمَوَٰقِعِ ٱلنُّجُومِ ۝٧٥ وَإِنَّهُۥ لَقَسَمٞ لَّوۡ تَعۡلَمُونَ عَظِيمٌ ۝٧٦ ﴾

(سورة الواقعة، الآيتان: ٧٥–٧٦).

يُعرف النجم (Star) بأنه جِرم سماوي كروي ساخن، يتكوّن من غاز ساخن متأيّن (البلازما)، التي يغلب على مكوّناتها نُوى عناصر الهيدروجين والهيليوم، ونسب قليلة من عناصر أخرى، مثل الكربون والنيتروجين والأكسجين والحديد وغيرها، ويصدر عن هذا الجِرم طاقة حرارية وضوئية.

وتختلف النجوم عن بعضها بعضًا في خصائصها. وقد تمكّن العلماء من معرفة الكثير من خصائص النجوم الفيزيائية والكيميائية، عن طريق النظر إليها بالمقاريب (التلسكوبات)، وتحليل أطيافها الواصلة إلى الأرض بمختلف أنواع الأجهزة، كجهاز المطياف الضوئي (Spectroscope).

تبعد النجوم عنّا مسافات شاسعة، يستغرق الضوء في قطعها أزمنة تتراوح بين بضع دقائق إلى مليارات السنين. ومع ذلك فقد تمكّن العلماء من حساب تلك المسافات، فكيف تمكّنوا من ذلك؟ وكيف عرفوا خصائص النجوم ومراحلها العمرية، ومراحل تطوّرها؟ هذه الأسئلة وغيرها ستجيب عنها لدى دراستك هذا الفصل إن شاء الله تعالى.

أولًا: أقدار النجوم وشدّة إضاءاتها الظاهرية

إذا نظرت إلى السماء ليلًا، فإنك تلاحظ تفاوت النجوم في شدّة إضاءاتها، وتُمثِّل **شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم** المجموع الكلي للطاقة الضوئية الواصلة من ذلك النجم، إلى عين الراصد. وقد صُنّفت النجوم حسب شدّة إضاءاتها الظاهرية إلى درجات سُمّيت **أقدارًا** (Magnitudes)، وأوّل من صنّف النجوم الفلكي اليوناني هيبارخوس (Hipparchus) معتمدًا على عينه المجرّدة؛ حيث صنّف النجوم إلى ست مجموعاتٍ، أَطلق على النجوم الأشدّ إضاءة اسم نجوم القَدْر الأول، وسمّى النجوم التي تأتي بعدها نجوم القَدْر الثاني، وهكذا وصولًا إلى أخفت النجوم التي لا تكاد تُرى بالعين المجرّدة، فسمّاها نجوم القَدْر السادس. ونظرًا لأن تحديد هذه الأقدار يتم عن طريق

ظهورها لنا بهذه الحال، فقد أطلق عليها الفلكيّون اسم **القَدْر الظاهري** (Apparent Magnitude). وقد كرّس هذه الأفكار الفلكي العربي أبو الحسين عبد الرحمن بن عمر الصوفي المتوفّى في عام (٣٧٦هـ/ ٩٨٦م)، في كتابه (صور الكواكب الثمانية والأربعين). وبتطوّر آلات الرصد الفلكي فقد تمكّن الفلكيّون المعاصرون المحدّثون من التقاط صورٍ فوتوغرافية لنجوم، كما قاسوا شدّة إضاءاتها كمّيًّا، فوجدوا أن شدّة إضاءة نجم من القَدْر الأول تعدِلُ ١٠٠ ضعف شدّة إضاءة نجم من القَدْر السادس. وبناءً عليه، فيُمكن حساب النسبة بين شدّة إضاءة نجمين من قَدْرين مختلفين، بعد استنتاج معامل الضرب المناسب على النحو الآتي:

نفرض أن (ن) هو معامل الضرب المطلوب:

الفرق في قَدْري النجمين هو ٦ − ١ = ٥

ن^{٥} = ١٠٠

ن = ٢,٥١٢ ≈ ٢,٥

بمعنى أن شدّة إضاءة كل قَدْر تعدِلُ (٢,٥) ضعف شدّة إضاءة القَدْر الذي يليه، كما يظهر في الجدول (١−١). فمثلًا شدّة إضاءة نجم من القَدْر الثالث، أكبر من شدّة إضاءة نجم من القَدْر الرابع بمقدار (٢,٥) ضعفًا.

الجدول (١−١): مقارنة نسبة شدّة الإضاءة الظاهرية بين نجمين بمعرفة الفرق في قَدْريهما.

قَدْر النجم	الفرق في القَدْر نسبة للقَدْر السادس	شدّة إضاءة نجم نسبة إلى شدّة إضاءة نجم من القَدْر السادس
١	٥	٢,٥ × ٢,٥ × ٢,٥ × ٢,٥ × ٢,٥ = ٩٧,٦٦ ≈ ١٠٠ مرّة
٢	٤	٢,٥ × ٢,٥ × ٢,٥ × ٢,٥ = ٣٩,١ ≈ ٣٩ مرّة
٣	٣	٢,٥ × ٢,٥ × ٢,٥ = ١٥,٦٢٥ ≈ ١٦ مرّة
٤	٢	٢,٥ × ٢,٥ = ٦,٢٥ مرّات
٥	١	٢,٥ (مرّتان ونصف)
٦	٠	١ (مرّة واحدة)

بناءً على ما سبق، فإنّه يمكن التعبير رياضيًّا عن النسبة بين شدّة الإضاءة الظاهرية لنجمين والفرق بين قدريهما الظاهريين، باستخدام المعادلة الرياضية الآتية:

$$ق_{٢} - ق_{١} = ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} (ش_{١} / ش_{٢})$$

حيث:

$ق_{٢}$: القَدْر الظاهري للنجم الثاني.

$ق_{١}$: القَدْر الظاهري للنجم الأول.

$ش_{١}$: شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم الأول.

$ش_{٢}$: شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم الثاني.

مثال (١)

نجم (α) قَدْره الظاهري ١٠ أضعاف القَدْر الظاهري للنجم (β)، وكانت النسبة بين شدّة إضاءة النجم (β) إلى شدّة إضاءة النجم (α) تساوي $١٠^{-٩}$. احسب القَدْر الظاهري لكلا النجمين.

الحل:

$$ق_{\beta} - ق_{\alpha} = ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} ش_{\alpha} / ش_{\beta}$$

$$ق_{\beta} - ١٠ ق_{\beta} = ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} ١٠^{-٩}$$

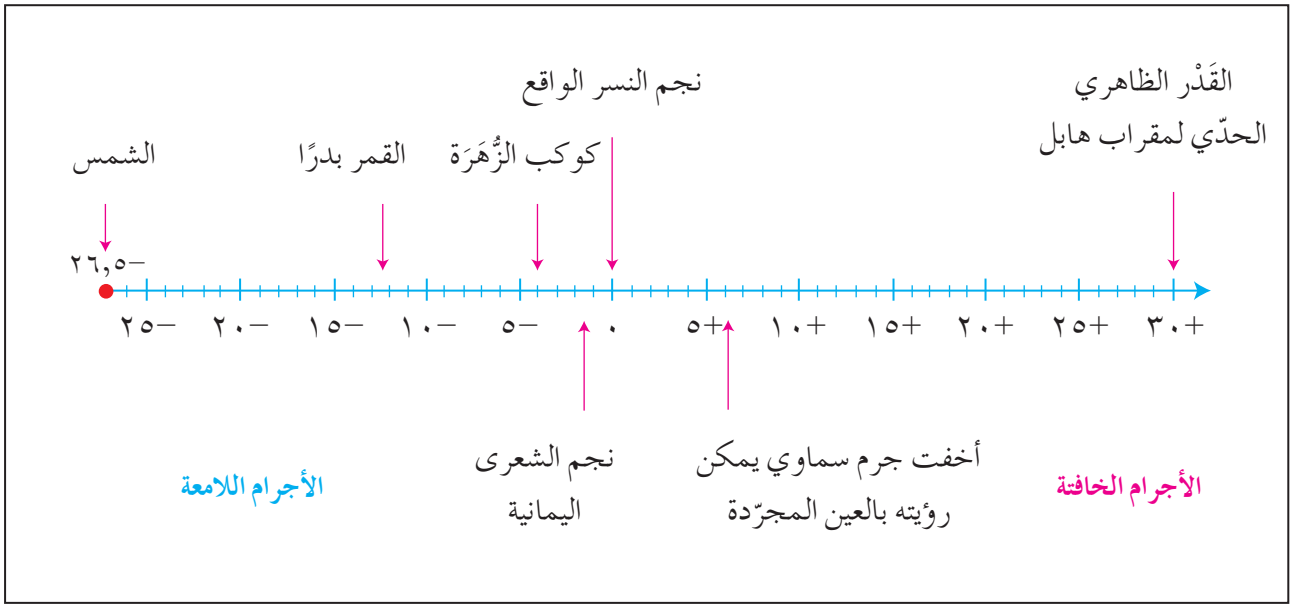
$$-٩ ق_{\beta} = ٢,٥ \times -٩$$

إذن: $ق_{\beta} = ٢,٥$

ولكن: $ق_{\alpha} = ١٠ ق_{\beta}$.

إذن: $ق_{\alpha} = ١٠ \times ٢,٥ = ٢٥$.

وبتطوّر أجهزة الرصد الفلكي، أصبح بالإمكان مشاهدة نجوم لم تكن مرئية في السابق؛ لذا، فقد وُسّع مقياس هيبارخوس من الطرفين، بحيث جُعلت نهايته الصغرى عند الرقم −٢٦,٥؛ أي عند القَدْر الظاهري للشمس، بينما تُركت نهايته الكبرى مفتوحة لاستيعاب الأجرام السماوية التي قد تُكتشف لاحقًا بصرف النظر عن خفوتها. انظر الشكل (١−١)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (١−١): مقياس هيبارخوس المحدّث لأقدار النجوم الظاهرية بعد توسعته من الطرفين ليشمل الأجرام السماوية جميعها التي يمكن رصدها.

- ما قَدْر أشدّ النجوم إضاءة في السماء ليلًا؟ وما قَدْر أشدّ الأجرام السماوية إضاءة في السماء؟
- لماذا أُغلق التدريج من جهة الشمس، وبقي مفتوحًا من جهة الأجرام الخافتة؟
- ما حدود القَدْر الظاهري لنظام الأقدار بعد التوسعة؟
- ما القَدْر الظاهري لكل من الأجرام السماوية الآتية: القمر بدرًا، وكوكب الزُّهَرَة، ونجم النسر الواقع، ونجم الشعرى اليمانية؟ نظّم إجابتك في جدول.

مثال (٢)

إذا كانت شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم الأول ١٠٠٠٠ ضعف شدّة إضاءة النجم الثاني الظاهرية، وكان القَدْر الظاهري للنجم الأول يساوي −٥، احسب القَدْر الظاهري للنجم الثاني. أيّهما يُرى بالعين المجرّدة؟

الحل:

$$\text{ش}_١ / \text{ش}_٢ = ١٠٠٠٠ ، \text{ق}_١ = -٥$$

$$\text{ق}_٢ - \text{ق}_١ = ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} \text{ ش}_١ / \text{ش}_٢$$

$$\text{ق}_٢ - (-٥) = ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} ١٠٠٠٠$$

$$\text{ق}_٢ + ٥ = ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} ١٠^{٤}$$

$$\text{ق}_٢ + ٥ = ٢,٥ \times ٤$$

$$\text{ق}_٢ + ٥ = ١٠$$

إذن: $\text{ق}_٢ = ٥$

تستطيع العين المجرّدة رؤية كلا النجمين؛ لأن قَدْريهما أقل من القَدْر السادس الذي يعتبر ضمن حدود الرؤية حسب مقياس هيبارخوس المحدّث لأقدار النجوم الظاهرية.

اختبر معلوماتك

ادرس الجدول الآتي، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

الجدول (١−٢): اختبر معلوماتك.

النجم	أ	ب	جـ	د
القَدْر الظاهري	صفر	٨	−٨	٣

أ − رتّب النجوم (أ، ب، جـ، د) تنازليًا، حسب شدّة إضاءاتها الظاهرية.

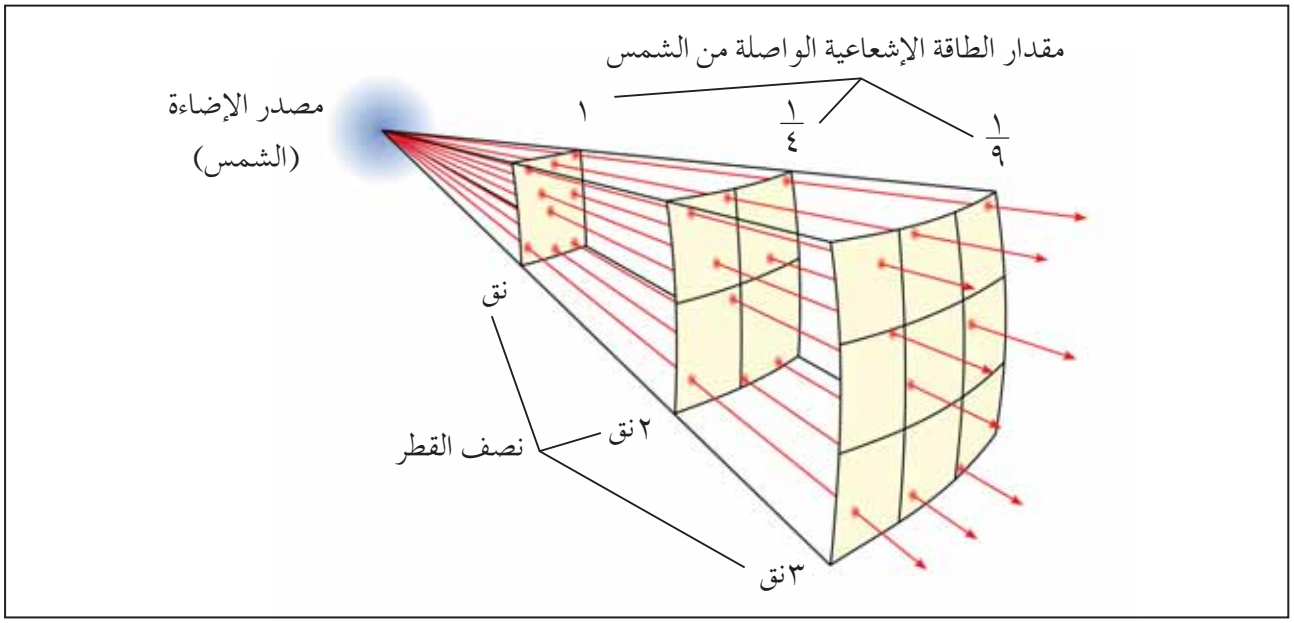
ب− ما رمز النجم الذي لا يُرى بالعين المجرّدة؟

جـ− احسب النسبة بين شدّة الإضاءة الظاهرية للنجمين (ب، د).

ثانيًا: سطوع النجوم وأقدارها المطلقة

تعتمد شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم على عاملين: سطوع النجم وبُعده عن الأرض. ويُعرف **السطوع** (Luminosity) بأنه القدرة الإشعاعية للنجم، أي مقدار الطاقة التي يُشعّها النجم فعليًّا في الثانية الواحدة، ويُقاس بوَحْدة الواط (جول/ ث). وقد تعلّمت سابقًا أن شدّة الإضاءة الظاهرية للنجوم تعني المجموع الكلي للطاقة الضوئية الواصلة من النجم إلى عين الراصد.

وتتناقص شدّة الإضاءة الظاهرة للنجوم بزيادة بُعدها عنّا وَفق **قانون التربيع العكسي** (Inverse Square Law) الذي ينص على أن "**شدّة الإشعاع الواصلة من النجم عند أي سطح، تتناسب عكسيًّا مع مربع البُعد بينهما**"؛ والشدّة تعني الطاقة الإشعاعية الواصلة من وَحْدة المساحة في وَحدة الزمن، لاحظ الشكل (١-٢).



الشكل (١-٢): قانون التربيع العكسي.

لاحظت من الشكل (١-٢)، تناقص شدّة الإضاءة الظاهرية بالابتعاد عن الشمس؛ إذ كلما زاد بُعد الجسم عن مصدر الإضاءة (نصف القطر) فإن الطاقة الإشعاعية تتوزّع على مساحات كروية أكبر؛ لذا، إذا تضاعف نصف القطر (نق)، فإن مقدار الطاقة الإشعاعية الواصلة من الشمس ينخفض إلى الربع، وإذا تضاعف نصف القطر ثلاث مرات، فإن مقدار الطاقة الإشعاعية الواصلة من الشمس ينخفض إلى التُّسع وهكذا. فالنجم الأبعد يُظهر شدّة إضاءة ظاهرية أقل والعكس صحيح.

ويُستخدم قانون التربيع العكسي **لمقارنة شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم نفسه على أبعادٍ مختلفة،** أو **للمقارنة بين شدّة الإضاءة الظاهرية لنجمين مختلفين بشرط تساويهما في السطوع.** ويُعبّر عن قانون التربيع العكسي بالمعادلة الرياضية الآتية:

$$ش_{٢} / ش_{١} = (ف_{١} / ف_{٢})^{٢}$$

حيث:

ش: شدّة إضاءة النجم الظاهرية.

ف: بُعد النجم (المسافة التي يبعدها النجم عن الراصد).

وإذا كان لدينا نجمين سطوعهما مختلف، فإننا نستخدم العلاقة الرياضية الآتية:

$$ش_{٢} / ش_{١} = (س_{٢} / س_{١}) \times (ف_{١} / ف_{٢})^{٢}$$

والعلاقة الرياضية التي تربط شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم (ش) بسطوعه (س) وبُعده عن الراصد (ف) هي:

$$ش = س / ٤ \pi ف^{٢}$$

حيث:

ش: شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم.

س: سطوع النجم.

ف: بُعد النجم عن الراصد (ويُقاس **بالفرسخ الفلكي** وهو إحدى وَحْدات قياس المسافات الفلكية؛ ويُرمز له بالرمز (Pc)، ويساوي ٣,٢٦ سنة ضوئية = ٣,١ × ١٠^١٣ كم).

اختبر معلوماتك

١– ما نسبة تغيّر شدّة الإضاءة الظاهرية للمصدر، في كل من الحالات الآتية:

الجدول (١–٣): اختبر معلوماتك.

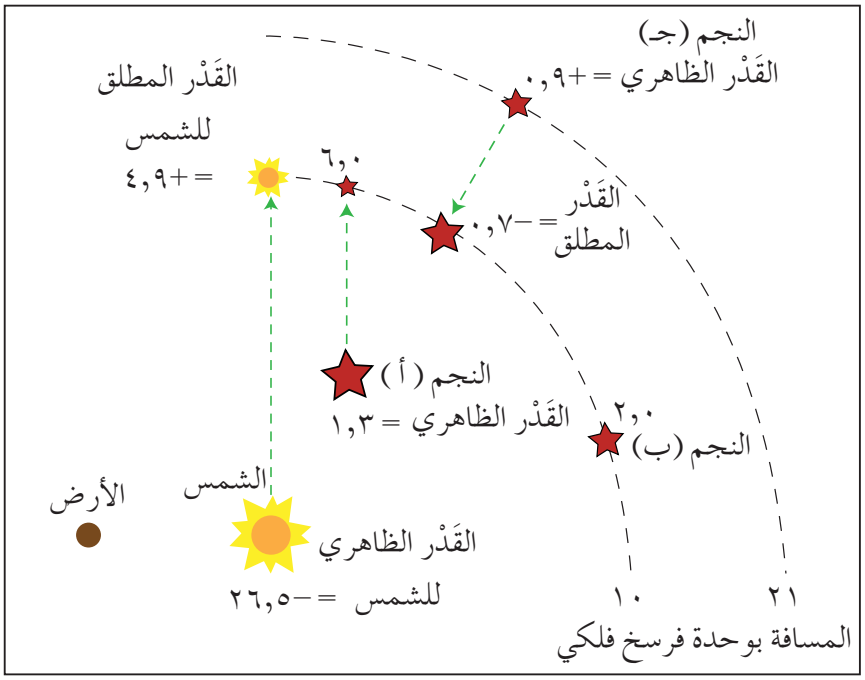
المسافة ($ف_٢$)	٢/١ ($ف_١$)	١٠ ($ف_١$)	٤/١ ($ف_١$)
نسبة شدّة الإضاءة ($ش_٢ / ش_١$)			

٢– ماذا يحدث لشدّة الإضاءة الظاهرية للنجم، عندما تقلّ المسافة بين مصدر الإشعاع والراصد؟ لماذا؟

٣– متى تتساوى شدّة الإضاءة الظاهرية لمصدر ضوء سطوعه ١٠٠٠٠ واط، مع شدّة إضاءة مصدر آخر سطوعه ٩٠٠٠٠ واط؟

تبدو بعض النجوم خافتة على الرغم من أنها شديدة السطوع؛ وذلك بسبب بُعدها البائن عن الأرض، في حين تبدو نجومٌ أُخرى (ومنها الشمس) شديدة الإضاءة على الرغم من قلّة سطوعها مقارنة بالنوع السابق بسبب قُربها من الأرض. وقد وجد العلماء أن توحيد عامل البُعد يسمح بالمقارنة بين سطوع النجوم بسهولة؛ لذا، لجأوا إلى افتراض وجود النجوم على مسافة معيارية واحدة من الأرض هي ١٠ فراسخ فلكية. وأطلقوا على القَدْر الظاهري للنجم وهو على بُعد ١٠ فراسخ فلكية **القَدْر المطلق** (Absolute Magnitude)، ويُرمز له بالرمز $ق_م$.

لتعرّف أهمية المقارنة بين النجوم اعتمادًا على أقدارها المطلقة، ادرس الشكل (١–٣)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (١–٣): الأقدار المطلقة لبعض النجوم.

- احسب نسبة التغيّر في شدّة إضاءة الشمس الظاهرية لو أصبحت على بُعد ١٠ فراسخ فلكية، علمًا بأن متوسط بُعد الأرض عن الشمس ١٥٠ مليون كم.
- ما الفرق بين قيمتَي قَدْري الشمس؛ الظاهري والمطلق؟
- ما التغيّر الحاصل للنجم (جـ) عند تغيير موقعه؟
- ما القَدْر المطلق للنجم (أ)؟ وما علاقة ذلك ببُعده عن الأرض؟
- النجم (ب) يبعُد عن الأرض ١٠ فراسخ فلكية، فما قَدْره المطلق؟ وما قَدْره الظاهري؟

عند وضع الشمس على بُعد ١٠ فراسخ فلكية عن الأرض، ستبدو لنا نجمًا خافتًا يصعب رؤيته؛ لأنها صارت أبعد عنّا، وصار قَدْرها المطلق +٤,٩ مع ثبات سطوعها. أما إذا وضعنا النجم (جـ) على بُعد ١٠ فراسخ فلكية، فإن قَدْره الظاهري سيتغيّر من +٠,٩ إلى −٠,٧. أي أنه يقلّ، وستزداد شدّة إضاءته الظاهرية؛ لأنه أصبح أقرب إلينا، في حين يبقى سطوعه ثابتًا.

يمكن صياغة قانون التربيع العكسي بحيث يربط بين سطوع نجم ما على بُعد ١٠ فراسخ فلكية وشدّة إضاءته الظاهرية باستخدام العلاقة الرياضية الآتية:

$$ق - ق_{١٠} = ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} ش_{١٠} / ش$$

ولكن: $ش = س / ٤ \pi ف^{٢}$

إذن: ق – ق$_{١٠}$ = ٢,٥ لو$_{١٠}$ (س/ ٤ π ١٠^{٢}/ س/ ٤ π ف^{٢}).

ولمّا كان القَدْر (ق$_{١٠}$) يُمثِّل القَدْر المطلق، فإننا نرمز إليه بالرمز ق$_{م}$:

ق – ق$_{م}$ = ٢,٥ لو$_{١٠}$ (ف/ ١٠)^{٢}

ق – ق$_{م}$ = ٥ لو$_{١٠}$ (ف/ ١٠)

ومنها: ق – ق$_{م}$ = ٥ (لو$_{١٠}$ ف – لو$_{١٠}$ ١٠)

لكن لو$_{١٠}$ ١٠ = ١، **إذن:** ق – ق$_{م}$ = ٥ لو$_{١٠}$ ف – ٥

ومنها نتوصّل إلى أنه يمكن حساب القَدْر المطلق للنجوم؛ باستخدام العلاقة الرياضية الآتية:

$$ق_{م} = ق + ٥ - ٥ \text{ لو}_{١٠} ف$$

حيث:

ق$_{م}$: القَدْر المطلق للنجم.

ق: القَدْر الظاهري للنجم.

ف: بُعد النجم عن الراصد، ويُقاس بوَحْدة الفرسخ الفلكي.

مثال (٣)

احسب بُعد نجم عنّا قَدْره المطلق ٢٠، وقَدْره الظاهري ٣٥.

الحل:

ق$_{م}$ = ق + ٥ – ٥ لو$_{١٠}$ ف

٢٠ = ٣٥ + ٥ – ٥ لو$_{١٠}$ ف

٢٠ = ٤٠ – ٥ لو$_{١٠}$ ف

٢٠– = – ٥ لو$_{١٠}$ ف

لو$_{١٠}$ ف = ٤

إذن: ف = ١٠^{٤} فرسخ فلكي.

مثال (٤)

نجم يبعد عنّا مسافة ١٠٠٠ فرسخ فلكي، إذا وُضع على بُعد ١٠ فراسخ فلكية، احسب ما يأتي:

أ – نسبة التغيّر في شدّة إضاءة النجم الظاهرية.

ب– التغيّر في قَدْر النجم الظاهري.

الحل:

أ – نسبة التغيّر في شدّة إضاءة النجم الظاهرية: $ش_٢ / ش_١ = (ف_١ / ف_٢)^٢$

$= (١٠ / ١٠٠٠)^٢$

$= ١٠^{-٤}$.

أي أن شدّة الإضاءة الظاهرية ($ش_٢$) تزيد عن شدّة الإضاءة الظاهرية ($ش_١$) بمقدار ١٠٠٠٠ مرّة.

ب– التغيّر في قَدْر النجم الظاهري: $ق_٢ - ق_١ = ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} ش_١ / ش_٢$

$= ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} ش_١ / ١٠^{-٤} ش_١$

$= ٢,٥ \text{ لو}_{١٠} ١٠^{-٤}$

$= ٢,٥ \times -٤$

$= -١٠$

إذن: $ق_٢ - ق_١ = -١٠$.

اختبر معلوماتك

١– ادرس الجدول الآتي، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

الجدول (١–٤): اختبر معلوماتك.

رمز النجم	ق	قم
س	٩	١
ص	٢	٤–
ع	٣	٣
ل	٨–	٢
هـ	٤	١

أ – ما رمز النجم الأشدّ إضاءة ظاهرية؟

ب– ما رمز النجم الأكثر سطوعًا؟

جـ– ما رمز النجم الذي يبعُد ١٠ فراسخ فلكية؟

د – أي النجمين أبعد عن الأرض (س) أم (هـ)؟ فسّر إجابتك.

٢– النجم (م) قَدْره الظاهري ٢ وشدّة إضاءته تساوي ٠,٠١ شدّة إضاءة النجم (ن)، فإذا كان القَدْر المطلق للنجم (ن) يساوي ٧، احسب بُعد النجم (ن).

ثالثًا: العوامل المؤثّرة في سطوع النجم

يعتمد سطوع النجم (س) على درجة حرارة سطحه (د)، ومساحة سطحه (م). ويربط **قانون ستيفان – بولتزمان** بين سطوع النجم ومساحته ودرجة حرارة سطحه، حيث ينص على الآتي: **"يتناسب سطوع النجم تناسبًا طرديًّا مع مساحته، والقوة الرابعة لدرجة حرارته السطحية"**. ويُعبّر عن هذا القانون رياضيًّا بالعلاقة الآتية:

$$س = \sigma \, م \, د^{٤}$$

حيث:

س: السطوع (القدرة الإشعاعية) ويُقاس بوَحْدة الواط (جول/ ث).

م : مساحة سطح النجم المشعّ، وتُقاس بوَحْدة م^{٢}، (ونستخدم قانون مساحة سطح الكرة لحساب مساحة سطح النجم؛ حيث م = ٤ π نق^{٢}، ويرمز (نق) إلى نصف القطر).

د : درجة حرارة النجم السطحية، وتُقاس بوَحْدة كلفن. (كلفن = °س + ٢٧٣).

σ : ثابت ستيفان – بولتزمان = ٥,٦٧ × ١٠$^{-٨}$ واط/ م^{٢}. ك^{٤}

وللمقارنة بين سطوعَي نجمين مختلفين نستخدم العلاقة الرياضية الآتية:

س$_{٢}$/ س$_{١}$ = σ م$_{٢}$ د$_{٢}^{٤}$/ σ م$_{١}$ د$_{١}^{٤}$

س$_{٢}$/ س$_{١}$ = ٤σ π نق$_{٢}^{٢}$ د$_{٢}^{٤}$/ ٤σ π نق$_{١}^{٢}$ د$_{١}^{٤}$

إذن: س$_{٢}$/ س$_{١}$ = (نق$_{٢}^{٢}$ د$_{٢}^{٤}$)/ (نق$_{١}^{٢}$ د$_{١}^{٤}$)

مثال (٥)

احسب نسبة تغيّر سطوع نجم ما، إذا تضاعفت درجة حرارته، مع ثبات نصف قطره.

الحل:

نفرض أن:

س$_{١}$، نق$_{١}$، د$_{١}$: سطوع النجم ونصف قطره ودرجة حرارته، قبل أن تتضاعف درجة حرارته.

س$_{٢}$، نق$_{٢}$، د$_{٢}$: سطوع النجم ونصف قطره ودرجة حرارته، بعد أن تضاعفت درجة حرارته.

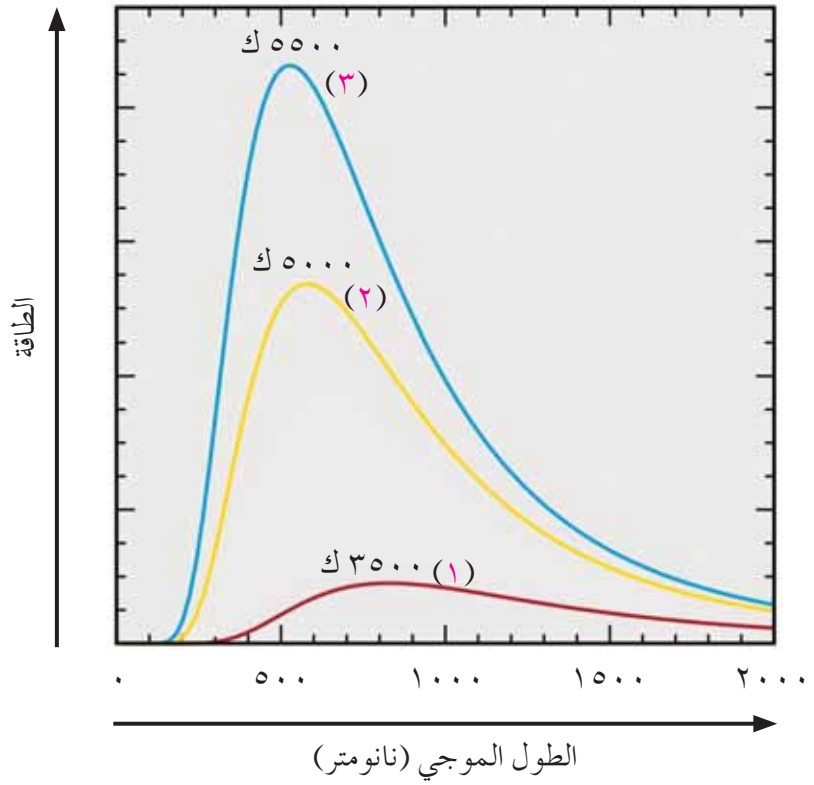
س$_{٢}$/ س$_{١}$ = (نق$_{٢}^{٢}$ د$_{٢}^{٤}$)/ (نق$_{١}^{٢}$ د$_{١}^{٤}$)

= ١ × (٢د$_{١}$/ د$_{١}$)^{٤} = ١٦، **إذن:** س$_{٢}$ = ١٦ س$_{١}$.

تعلّمت أن سطوع النجم يعتمد على درجة حرارة سطحه ومساحته، فكيف يؤثّر تغيّر هذين العاملين في سطوع النجم؟

١- درجة حرارة سطح النجم

يُشعّ النجم طاقته عند درجة حرارة معيّنة على شكل حزمة متعددة الأطوال الموجية، تكون أعلى طاقة في هذه الحزمة محمولة على موجة محورية تُسمّى **موجة الذروة** ($\lambda_{ذ}$) (Wavelength of Maximum Intensity). ويعتمد الطول الموجي لذروة الإشعاع على درجة حرارة سطح النجم كما يظهر في الشكل (١-٤). ادرس الشكل جيدًا، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.



الشكل (١-٤): العلاقة بين طاقة الإشعاع وطول موجة الذروة لإشعاع النجم بوَحْدة (النانومتر) لخمس نجوم مختلفة. يتّضح من الشكل، أن طول موجة الذروة يقلّ لدى ارتفاع درجة حرارة سطح النجم مَقيسة بوَحْدة كلفن.

- قارن بين النجوم جميعها من حيث: درجة حرارة سطحها، وطول موجة ذروة الإشعاع لها.
- ماذا يحدث لطول موجة ذروة الإشعاع بزيادة درجة حرارة سطح النجم؟

يؤدي اختلاف درجات حرارة سطوح النجوم إلى اختلاف سطوعها، وبزيادة درجة حرارة النجم يقلّ طول موجة الذروة لإشعاع النجم ما يزيد في سطوعه. وإذا تساوى نجمان في الحجم، فإن النجم ذا السطوع العالي تكون درجة حرارة سطحه أعلى، والطاقة المنبعثة منه أكبر.

لقد استفاد العالم فين (Wien) من تلك المشاهدات في استنباط قانون رياضي يربط بين درجات حرارة سطوح النجوم وموجات الذروة لها، عُرف باسم **قانون فين للإزاحة** (Wien's Displacement Law) الذي ينص على أن "**درجة حرارة الجسم المشعّ تتناسب عكسيًّا مع طول موجة ذروة الإشعاع له**". والاختلاف في درجة الحرارة – مهما كان بسيطًا – يؤثّر بصورة واضحة في سطوع النجوم. ويمكن التعبير عن هذا القانون رياضيًّا كالآتي:

$$د = ث / \lambda_ذ$$

حيث:

د : درجة الحرارة بوَحْدة كلفن.

$\lambda_ذ$: طول موجة الذروة للإشعاع ويُقاس بوَحْدة المتر (١م = $١٠^{١٠}$ أنغستروم = $١٠^{٩}$ نانومتر = $١٠^{٦}$ ميكرومتر = $١٠^{٣}$ ملمتر).

ث: ثابت فين = $٢,٩ \times ١٠^{-٣}$ كلفن.متر

مثال (٦)

ما درجة الحرارة السطحية لنجم ما، إذا علمت أن $\lambda_ذ$ له = ٥٠٠٠ أنغستروم؟

الحل:

تُحوّل قيمة طول الموجة ذروة الإشعاع إلى وَحْدة المتر: $\lambda_ذ = ٥٠٠٠ \times ١٠^{-١٠}$ متر.

$$د = ث / \lambda_ذ$$

$$د = ٢,٩ \times ١٠^{-٣} / ٥٠٠٠ \times ١٠^{-١٠}$$

إذن: د = ٥٨٠٠ كلفن.

اختبر معلوماتك

ادرس البيانات الموضّحة في الجدول الآتي، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

الجدول (١–٥): اختبر معلوماتك.

رمز النجم	طول موجة الذروة للإشعاع (نانومتر)	القَدْر المطلق
أ	٢٩٠	٢–
ب	٥٠٠	٥
جـ	١٠٠٠	١٠

١– ما رمز النجم الأعلى درجة حرارة؟

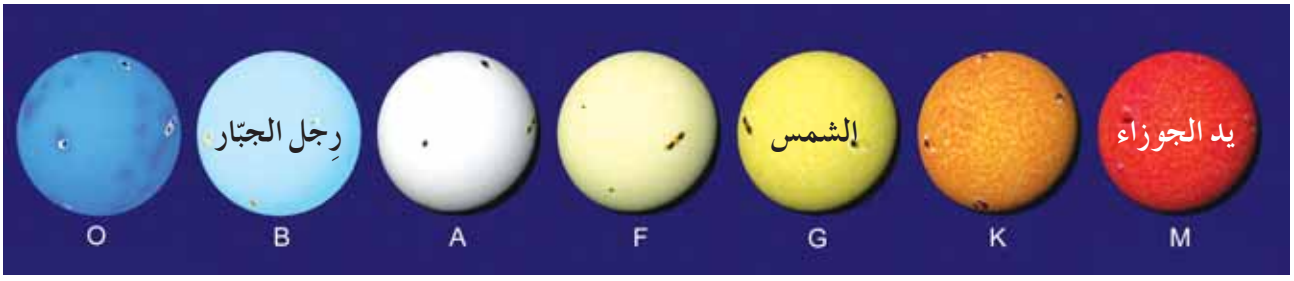
٢– ما رمز النجم الأكثر سطوعًا؟

٣– ما النسبة في درجة حرارة النجمين (ب، جـ)؟

٤– ما العلاقة بين درجة الحرارة وطول موجة الذروة للإشعاع؟

- **الأصناف الطيفية للنجوم ومكوّناتها**

تمكّن علماء الفلك من معرفة الكثير عن النجوم عن طريق دراسة الضوء القادم منها. فلون النجم يُسهم في معرفة درجة حرارة سطحه. وقد صنّف العلماء النجوم إلى **أصناف طيفية** (Spectral Classes) اعتمادًا على درجات حرارتها السطحية، على النحو الموضّح في الشكل (١–٥). والآن، انظر الشكل (١–٥)، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.

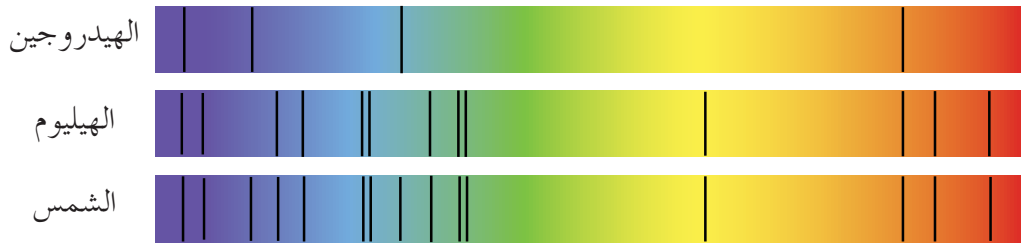


الشكل (١–٥): الأصناف الطيفية للنجوم ودرجات حرارتها السطحية، ويظهر فيه الصنف الطيفي للشمس (G).

- ما الصنف الطيفي للنجوم التي لها أعلى درجة حرارة؟ وتلك التي لها أقل درجة حرارة؟
- ماذا يحدث للطول الموجي بالانتقال من الصنف الطيفي (O) إلى الصنف الطيفي (M)؟

لاحظت أنه بالانتقال من الصنف الطيفي (O) إلى الصنف الطيفي (M) تقلّ درجة حرارة سطح النجم، وأن الصنف الطيفي (O) له أعلى درجة حرارة وأقل طول موجي، وأن الصنف الطيفي (M) له أقل درجة حرارة وأعلى طول موجي.

يتم تحديد الأصناف الطيفية للنجوم، عن طريق تحليل مكوّنات الطيف بواسطة جهاز المطياف الضوئي، حيث يظهر الطيف على هيئة حزم ضوئية مفصولة بخطوط امتصاص. وتُفيد معرفة خطوط الامتصاص في معرفة مكوّنات النجم؛ لأن كل عنصر له أطياف امتصاص تميّزه عن غيره، انظر الشكل (١-٦).



الشكل (١-٦): طيفا امتصاص الهيدروجين والهيليوم في طيف الشمس. وقد تم التركيز على طيفَي امتصاص الهيدروجين والهيليوم؛ لأنهما يشكّلان المكوّنات الرئيسة للشمس وبنسبة ٩٨٪ تقريبًا.

٢- مساحة سطح الجسم المشعّ

العامل الثاني المؤثّر في السطوع هو **مساحة سطح الجسم المشعّ** (Surface Area). لاحظ الشكل (١-٧)، الذي يُمثّل ثلاث نجوم متساوية في درجات حرارتها السطحية، ولكنها مختلفة في مساحات سطوحها، أصغرها الشمس. ادرسه جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة الآتية.

الشكل (١-٧): ثلاث نجوم متساوية في درجات حرارتها السطحية، ومختلفة في مساحات سطوحها.

- قارن بين النجوم الثلاثة من حيث السطوع.
- لماذا ثُبّتت درجات الحرارة السطحية للنجوم الثلاثة؟
- ما العلاقة بين مساحة سطح النجم وسطوعه؟

مثال (٧)

نجم سطوعه يساوي ٥,٦٧ × ١٠^{٢٦}واط، يصدر طاقته الإشعاعية العظمى عند الطول الموجي ٢٩٠٠ نانومتر، احسب مساحة سطح هذا النجم.

الحل:

أولًا: نحسب درجة الحرارة بوَحْدة كلفن:

د = ث / $\lambda_{ذ}$

= ٢,٩ × ١٠$^{-٣}$ / ٢٩٠٠ × ١٠$^{-٩}$

د = ١٠^{٣} كلفن.

ثانيًا: نحسب مساحة سطح النجم:

س = σ م د^{٤}

ومنه: م = س / σ د^{٤}

= ٥,٦٧ × ١٠^{٢٦} / ٥,٦٧ × ١٠$^{-٨}$ × (١٠^{٣})^{٤}

إذن: م = ١ × ١٠^{٢٢}م^{٢}.

اختبر معلوماتك

نجم مساحة سطحه ١ × ١٠^{١٢}م^{٢}، وطول موجة الذروة له ١٤٥ نانومتر، احسب:

١- درجة حرارة سطح النجم.

٢- سطوعه.

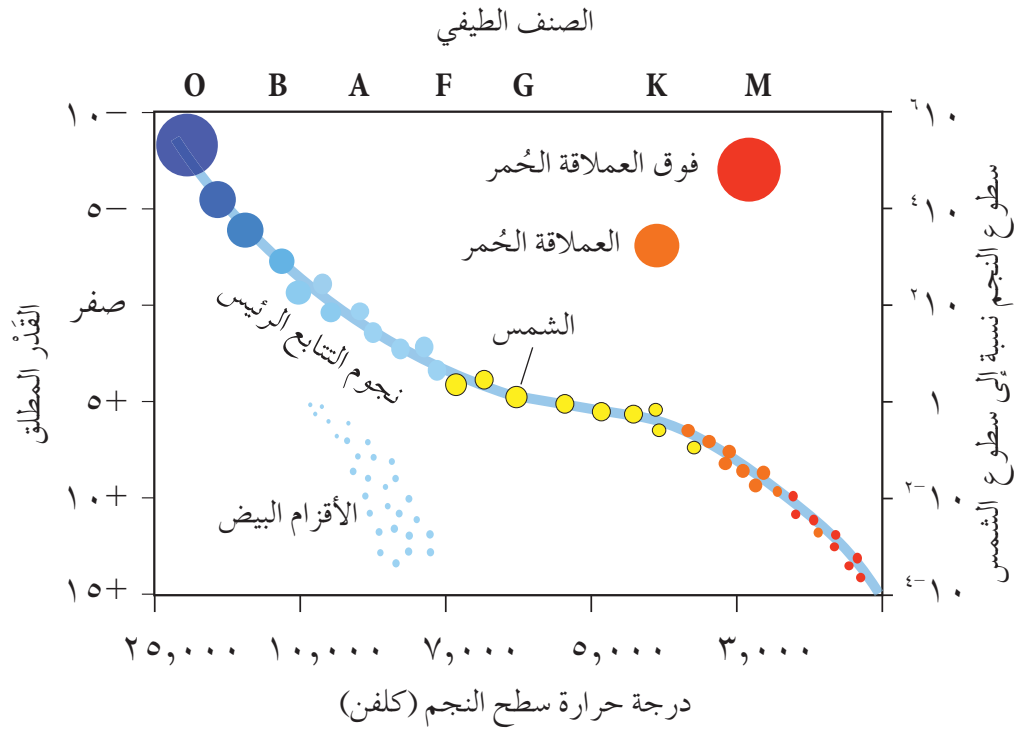
٣- إذا زاد نصف قطره ٤ مرّات، وزادت موجة الذروة له ٤ مرّات، ماذا يحدث لسطوعه؟

علمًا بأن ثابت ستيفان = ٥,٦٧ × ١٠$^{-٨}$ واط/م^{٢}.ك^{٤}، وثابت فين = ٢,٩ × ١٠$^{-٣}$ك.م.

رابعًا: مخطّط هيرتزبرنغ - رسل

في أوائل القرن العشرين كان لدى الفلكيين دراية جيدة بخصائص النجوم، من حيث درجات حرارتها وكتلها وحجومها. ولكن، كانت لديهم بعض التساؤلات مثل: ما الذي يجعل خصائص النجوم ذات الصنف الطيفي (A)، تختلف عن خصائص النجوم ذات الصنف الطيفي (K)؟ أو لماذا يختلف سطوع نجوم الصنف الطيفي الواحد؟ وما مصدر طاقة النجوم التي تجعلها ساطعة بالشكل التي هي عليه؟

تمكّن الفلكيّان إجنار هيرتزبرنغ (Ejnar Hertzprung)، وهنري رسل (Henry Russell)، من جمع معلومات عن سطوع النجوم بدلالة أقدارها المطلقة، وعن ألوانها بدلالة درجات حرارتها السطحية وصنفها الطيفي، ولاحظا العلاقة التي تربطها؛ إذ أُسقطت البيانات المتعلقة بسطوع النجوم بدلالة أقدارها المطلقة (على المحور الرأسي)، في حين أُسقطت البيانات المتعلقة بكل من درجات حرارة سطوح النجوم والصنف الطيفي (على المحور الأفقي)، وهي ما تُعرف **بمخطّط هيرتزبرنغ – رسل** (Hertzprung - Russell Diagram) أو **(H-R Diagram)** اختصارًا، ويظهر في الشكل (١–٨).



الشكل (١–٨): مخطّط هيرتزبرنغ – رسل.

يُلاحظ من مخطّط هيرتزبرنغ – رسل، أن النجوم تختلف في أنواعها وخصائصها؛ مثل السطوع، ودرجة الحرارة، ومساحة السطح، ووَفْقًا لذلك يمكن وضعها في ثلاث مجموعات، هي:

١- **نجوم التتابع الرئيس** (Main Sequence Stars): هي النجوم الموجودة على شريط يمتد من أعلى يسار المخطّط إلى أسفل يمينه، ويُسمّى **شريط التتابع الرئيس** (Main Sequence)، ويضمّ أكثر من ٩٠٪ من النجوم التي يمكن رؤيتها من الأرض، وتكون أقطارها مختلفة الحجوم.

٢- **النجوم الحُمر العملاقة وفوق العملاقة** (Red Giants and Super Giants Stars): تمتاز **النجوم العملاقة** (Giants) بأنها ذات درجات حرارة سطح منخفضة وسطوع عالٍ؛ بسبب كِبَر مساحة سطحها، وتقع هذه النجوم في الجزء الأيمن العلوي من المخطّط، وتضمّ هذه المجموعة مجموعة أخرى قليلة العدد نسبيًّا، تقع في الجزء الأعلى من الجهة اليُمنى من المخطّط وتُسمّى **النجوم فوق العملاقة** (Super Giants)، التي تتميّز بضخامة حجومها ويظهر أغلبها باللون الأحمر، وقليل منها تبدو برتقالية. ومن أمثلتها، نجم يد الجوزاء في برج الجوزاء.

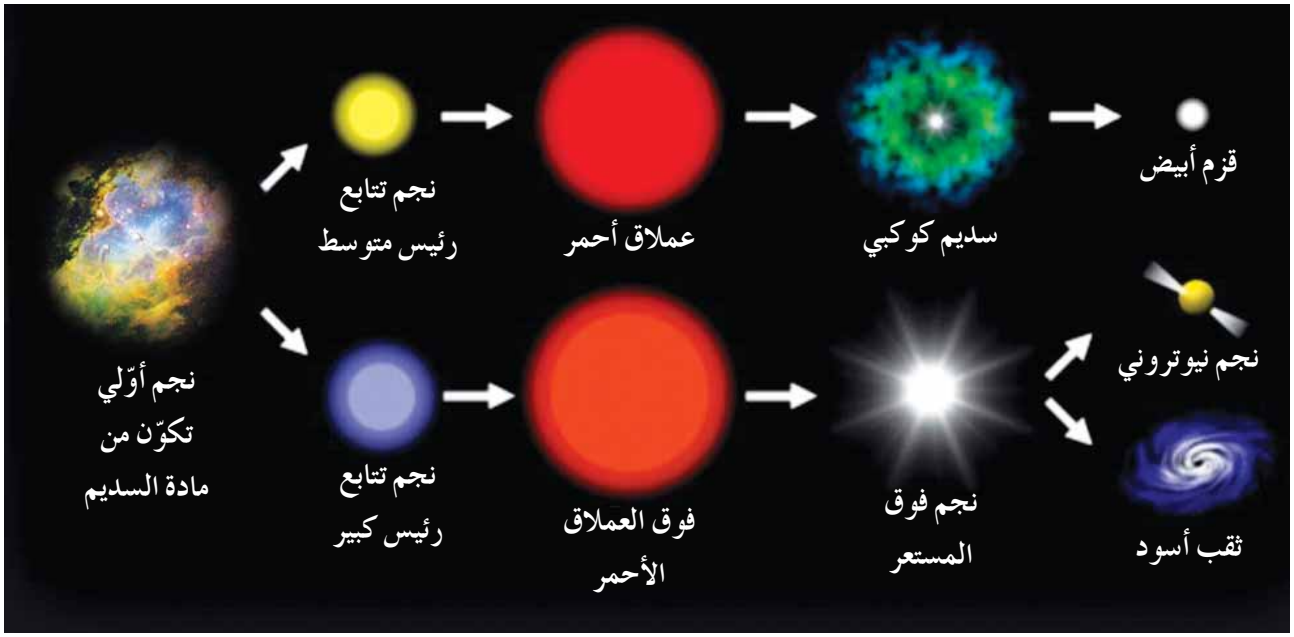
٣- **الأقزام البيض** (White Dwarfs): تقع هذه النجوم في الجزء الأيسر السفلي من مخطّط (H–R)، وتمتاز بانخفاض سطوعها بسبب صِغَر مساحات سطوحها، على الرغم من ارتفاع درجات حرارة سطوحها.

خامسًا: دورة حياة النجوم وتطوّرها

تُعدّ وفرة النجوم بأنواعها وخصائصها المختلفة في مخطّط (H–R) مؤشّرًا على أن النجوم تمرّ بمراحل عمرية مختلفة وطويلة جدًّا قد تبلغ مليارات السنين اعتمادًا على كتلة النجم الأوّلي.

فما مراحل دورة حياة النجوم؟ وكيف تتغيّر خصائصها في أثناء دورة حياتها؟

ادرس الشكل (١–٩)، الذي يوضّح مراحل دورة حياة النجوم، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (١–٩): مراحل دورة حياة النجوم.

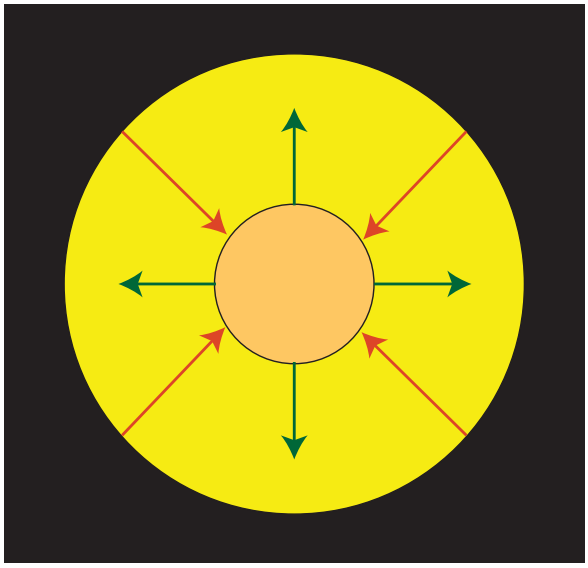
- من أين تبدأ دورة حياة النجم؟ وما اسم النجم في أول مرحلة من مراحل حياته؟
- رتّب مراحل حياة نجم تتابع رئيس متوسط.
- رتّب مراحل حياة نجم تتابع رئيس كبير.
- اذكر أشكال الموت التي قد تنتهي إليها النجوم.

تمرّ النجوم بمراحل حياة ستدرسها بإيجاز، وهي:

١– مرحلة النجم الأوّلي (Protostar): تبدأ حياة النجم من **السديم** (Nebula)؛ إذ ينشأ النجم الأوّلي من انكماش مادة السديم باتجاه مركزه بسبب قوى الجاذبية بين مكوّناته، فيؤدي ذلك إلى زيادة طاقة الجزيئات الحركية، وتزداد التصادمات بين جزيئات السديم؛ فينتج ضغط

حراري يعاكس قوى الجاذبية بين مكوّنات النجم، تعمل على رفع درجة حرارة السديم بشكل بطيء. يستمر هذا التسخين البطيء للسديم بفعل الانكماش، إلى أن يصل السديم إلى حالة الإعتام (Opacity) عند ارتفاع كثافة قلبه إلى الحدّ الذي يُعيق نفاذ الإشعاع إلى الخارج، الأمر الذي يؤدي إلى رفع درجة حرارة قلب السديم، وعندها يُصبح السديم **نجمًا أوّليًا**. في هذه المرحلة، يتفوّق الضغط الانكماشي الجاذبي باتجاه المركز الناشئ عن قوة الجاذبية، على الضغط الحراري الناشئ عن طاقة الجزيئات الحركية باتجاه الخارج، انظر الشكل (١–١٠).

٢– مرحلة التتابع الرئيس (Main Sequence Stage): يتواصل تسخين النجم الأوّلي بفعل الانكماش

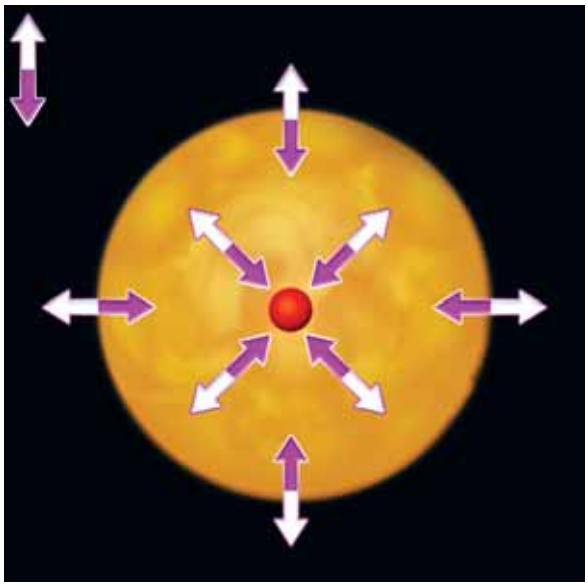


الشكل (١–١٠): انكماش النجم الأوّلي بسبب تفوّق الضغط الانكماشي الجاذبي نحو المركز، على الضغط الحراري باتجاه الخارج.

إلى أن تصل درجة حرارة القلب إلى ١,٥ مليون درجة كلفن، فيبدأ اندماج نوى الهيدروجين لإنتاج الهيليوم وينتج من الاندماج طاقة هائلة ليُصبح الاندماج النووي هو مصدر الطاقة الرئيس في النجم، وعندها تبدأ مرحلة جديدة في حياة النجم هي **مرحلة التتابع الرئيس**. تؤدي الطاقة الحرارية الهائلة التي تنتج من اندماج الهيدروجين إلى تزايد كبير في قيمة الضغط الحراري باتجاه الخارج، حتى تتساوى مع قيمة الضغط الانكماشي الجاذبي، فيَصِل النجم إلى اتزان دينامي يتوقّف عنده انكماشه، انظر الشكل (١–١١). وباستمرار اندماج

الهيدروجين ترتفع درجة حرارة القلب كثيرًا وتتعاظم قيمة الضغط الحراري، فيتفوّق على الضغط الانكماشي الجاذبي ويبدأ النجم بالتمدّد.

إن مرحلة التتابع الرئيس، هي المرحلة الأطول في حياة النجم؛ إذ يقضي النجم جُلّ حياته



الشكل (١-١١): اتزان ديناميي في نجم تتابع رئيس؛ بسبب تساوي قيم الضغط الحراري باتجاه الخارج والضغط الانكماشي الجاذبي نحو المركز.

في هذه المرحلة. ويتناسب مدّة بقاء النجم عكسيًّا مع كتلته؛ فالنجم ذو الكتلة الأكبر يطوي مراحله سريعًا بسبب عِظَم قوة الجاذبية في مراحله الأولى وارتفاع معدّل اندماج الهيدروجين في مرحلة التتابع الرئيس.

٣- **مرحلة العملاق الأحمر** (Red Giant Stage): في نهاية مرحلة التتابع الرئيس يكون النجم قد تمدّد كثيرًا فيزداد سطوعه بسبب الزيادة الهائلة في مساحة سطحه، الأمر الذي يُسرّع في نفاذ الإشعاع إلى الخارج، فتنخفض درجة حرارة سطحه ويميل لونه إلى الحُمرة، فيُسمّى **عملاقًا أحمرَ**. أما نجم التتابع الرئيس ذو الكتلة الأكبر من الشمس، فيُكوّن نجمًا **فوق عملاقٍ أحمر** (Supergiant).

عند وصول النجم إلى مرحلة العملاق الأحمر أو فوق العملاق الأحمر، يكون الهيدروجين قد نضُب من قلب النجم فيتوقّف الاندماج النووي هناك، ولكن قد يستمر اندماج الهيدروجين في الغلاف المحيط بقلب النجم إن توافرت درجة الحرارة المناسبة، والبالغة ١,٥ مليون

درجة كلفن كما تعلّمت سابقًا.

٤- مرحلة موت النجم (Star Death Stage): يتطوّر العملاق الأحمر فيتمدد غلافه الخارجي مكوّنًا **سديمًا كوكبيًّا** (Planetary Nebula) وهو سديم كروي الشكل، في حين تُكوّن مادة القلب المتبقية **قزمًا أبيض** (White Dwarf) حجمه مساوٍ لحجم الأرض تقريبًا وكثافته كبيرة جدًّا. وتُمثّل مرحلة القزم الأبيض إحدى مراحل موت النجم.

أما فوق العملاق الأحمر، فيتطوّر لينفجر انفجارًا هائلًا، ويُشعّ طاقة كبيرة جدًّا في مُدد زمنية قصيرة، ويُدعى حينئذٍ **فوق المستعر** (Supernova)، حيث تُكوّن مادة القلب المتبقية، اعتمادًا على كتلتها؛ نجمًا نيوترونيًّا قُطره في المتوسط ٢٠كم، وكثافته ١٤١٠ غم/ سم^{٣} تقريبًا؛ أي أكثر بمليون مرّة من كثافة القزم الأبيض. أما إذا زادت كتلة مادة القلب المتبقية على كتلة الشمس بنحو ٣ مرّات، فإنه ينتهي على صورة **ثقب أسود** (Black Hole)؛ وهو جِرم تبلغ شدّة جاذبيته حدًّا هائلًا لا يسمح لأي شكل من أشكال المادة أو الطاقة بالإفلات منه، فلا يصل حتى ضوءه؛ لذلك يُدعى ثقبًا أسود.

اختبر معلوماتك

فسّر سبب زيادة الكثافة في القزم الأبيض، على الرغم من أن مادة السديم الكوني تتناقص مع الزمن.

١- نجم (س) قَدْره الظاهري ٤، شدّة إضاءته الظاهرية أكبر ١٠ مرّات من شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم (ص)، والنجم (ص) شدّة إضاءته الظاهرية أكبر ١٠٠ مرّة من شدّة الإضاءة الظاهرية للنجم (ع). احسب القَدْر الظاهري للنجم (ع).

٢- نجمان (س، ص)؛ إذا وُضع النجم (س) على بُعد ١٠ فراسخ فلكية يتغيّر قَدْره الظاهري من -٧ ليصبح +٣، وإذا وُضع النجم (ص) على بُعد ١٠ فراسخ فلكية تزداد شدّة إضاءته بمقدار ٦٢٥ ضعفًا. أجب عما يأتي:

أ - أي النجمين (س) أم (ص) أبعد عن الأرض؟ لماذا؟

ب- ما القَدْر المطلق للنجم (س)؟

جـ - احسب نسبة التغيّر في شدّة إضاءة النجم (س).

٣- نجمان (س، ص)؛ القَدْر الظاهري للنجم (س) يساوي ضعف القَدْر الظاهري للنجم (ص)، وشدّة إضاءة النجم (س) تعدِل ٠,٠١ من شدّة إضاءة النجم (ص)، احسب:

أ - القَدْر الظاهري لكل منهما.

ب- بُعد النجم (ص) إذا كان الفرق بين القَدْر المطلق والقَدْر الظاهري لهذا النجم يساوي ٥.

٤- أ - من دراستك لمخطّط (H-R) قارن بين مجموعتَي النجوم الحُمر العملاقة وفوق العملاقة والأقزام البيض من حيث: موقعها على المخطّط، وسطوعها، ودرجات حرارة سطوحها، ومساحتها، نظّم إجابتك في جدول.

ب- متى يصبح النجم الأوّلي نجم تتابع رئيس؟

٥- صنّف العلماء النجوم اعتمادًا على درجات حرارتها السطحية إلى مجموعة من الأصناف الطيفية:

أ - قارن بين نجوم الصنف الطيفي (M) ونجوم الصنف الطيفي (B) من حيث: اللون ودرجة الحرارة.

ب- ما الصنف الطيفي الذي تتبع له الشمس؟

جـ – يفيد تحليل أطياف النجوم في معرفة مكوّناتها، وضّح ذلك.

٦– فسّر ما يأتي تفسيرًا علميًّا دقيقًا:

أ – تتناسب مدّة حياة النجم عكسيًّا مع كتلته.

ب– لا نرى الثقوب السوداء في السماء.

٧– نجمان؛ الأول يد الجوزاء طول موجة الذروة لإشعاعه (١٠٠٠) أنغستروم، والثاني الشمس وتبلغ درجة حرارة سطحها (٦٠٠٠) كلفن، ثابت فين = ٢,٩ × ١٠$^{-٣}$ ك.م. احسب ما يأتي:

أ – درجة حرارة نجم يد الجوزاء السطحية.

ب– سطوع نجم يد الجوزاء نسبة إلى سطوع الشمس، إذا علمت أن مساحة سطح نجم يد الجوزاء تعدِل (٤٠٠) ضعف مساحة سطح الشمس.

٨– ادرس الجدول (١–٦)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

الجدول (١–٦): السؤال (٨).

رقم النجم	الصنف الطيفي	القَدْر المطلق	نوع النجم
١	G	+٤,٩	تتابع رئيس
٢	K	–٢	عملاق أحمر
٣	B	صفر	تتابع رئيس
٤	M	–٨	فوق عملاق أحمر
٥	G	+٤	تتابع رئيس

أ – أيُّ النجمين أكبر حجمًا (١) أم (٥)؟

ب– ما رقم النجم الذي له أعلى درجة حرارة؟

جـ – ما رقم النجم الذي يُمثّل الشمس؟

د – درجة حرارة سطح النجم (٣) أعلى من درجة حرارة سطح النجم (٤)، إلا أن سطوع النجم (٤) أكبر، فسّر سبب ذلك.

هـ – هَبْ أن النجمين (٥) و (٢) متساويان في شدّة إضاءتيهما الظاهرية. فأيّ منهما سيكون الأبعد عن سطح الأرض؟

الفصل الثاني

المجرات
(Galaxies)

توجد النجوم في هذا الكون ضمن تجمّعات هائلة تُسمّى مجرات، يمكن مشاهدة القليل منها بالعين المجرّدة خارج مجرتنا درب التبّانة. ويرجع الفضل إلى العالم العربي المسلم عبد الرحمن الصوفي في كونه أول من أشار إلى وجود المجرات، وميّز بينها وبين النجوم، حيث نبّه إلى وجود لطخة سديمية تبيّن في ما بعد أنها مجرة المرأة المسلسلة (أندروميدا)، (انظر الشكل (١-١٢/أ))، إلا أنه لم يُسمّها مجرة لعدم تمكّنه من تمييز نجومها لعدم وجود المقاريب في ذاك الوقت. كما تمكّن من رصد مجرة (ماجلان) الكبرى، (انظر الشكل (١-١٢/ ب)). وأشار إليها في كتابه (صور الكواكب الثمانية والأربعين). فما المجرات؟ وما أبعادها؟ وما أشكالها؟ وما مكوّناتها؟ وكم أعمارها؟

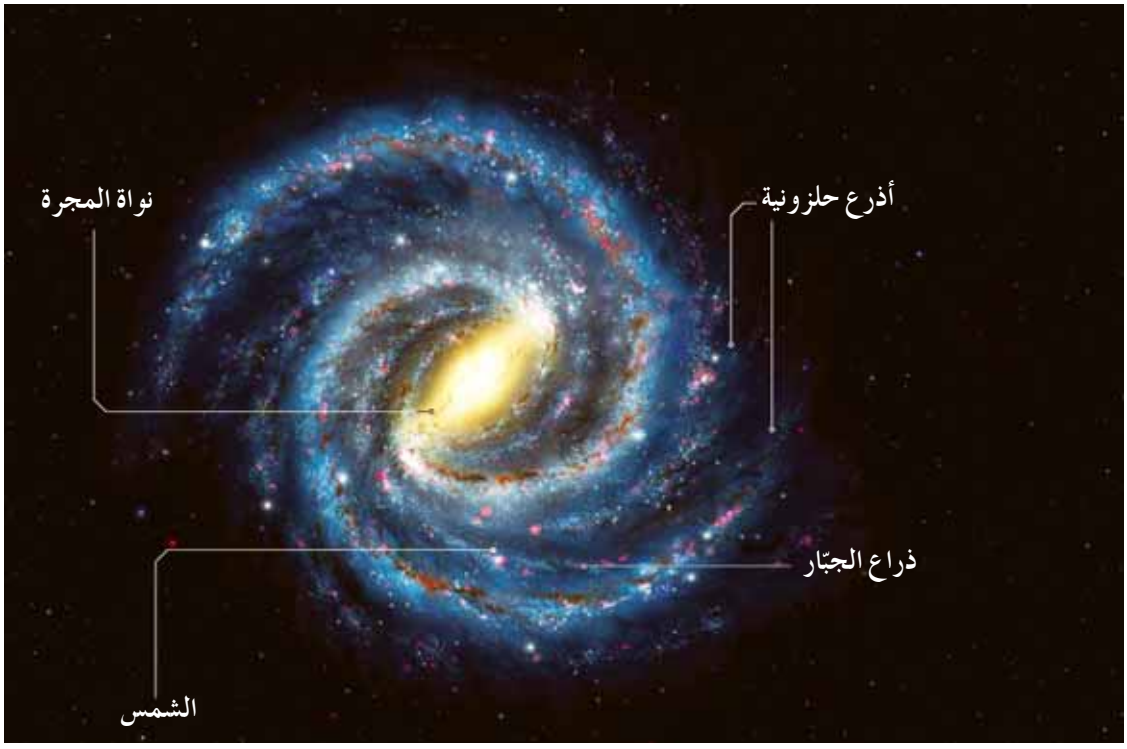
(أ) مجرة المرأة المسلسلة (أندروميدا). (ب) مجرة (ماجلان) الكبرى.

الشكل (١-١٢): مجرتا المرأة المسلسلة (أندروميدا) و (ماجلان) الكبرى.

أولًا: المجرات

تُعرف **المجرة** (Galaxy) بأنها بِنية كونيّة مكوّنة من أعداد هائلة من النجوم وما قد يتبعها من كواكب وأقمار وكويكبات ونيازك وسُدُم، تدور جميعها حول مركز المجرة. وتُعدّ المجرة اللبنة الأساسية في بناء الكون، حيث ترتبط مكوّناتها جذبيًّا مع بعضها بعضًا، وتتحرّك بوصفها وَحْدة

واحدة في هذا الكون. ويحتوي الكون على مليارات المجرات، التي تختلف في أشكالها، وحجومها، وأعمارها، وشدّة إضاءاتها، وأقدارها وسطوعها. ولمعرفة شكل مجرة درب التبّانة، المجرة التي تنتمي إليها شمسُنا، والأجزاء التي تتكوّن منها، ادرس الشكل (١–١٣).



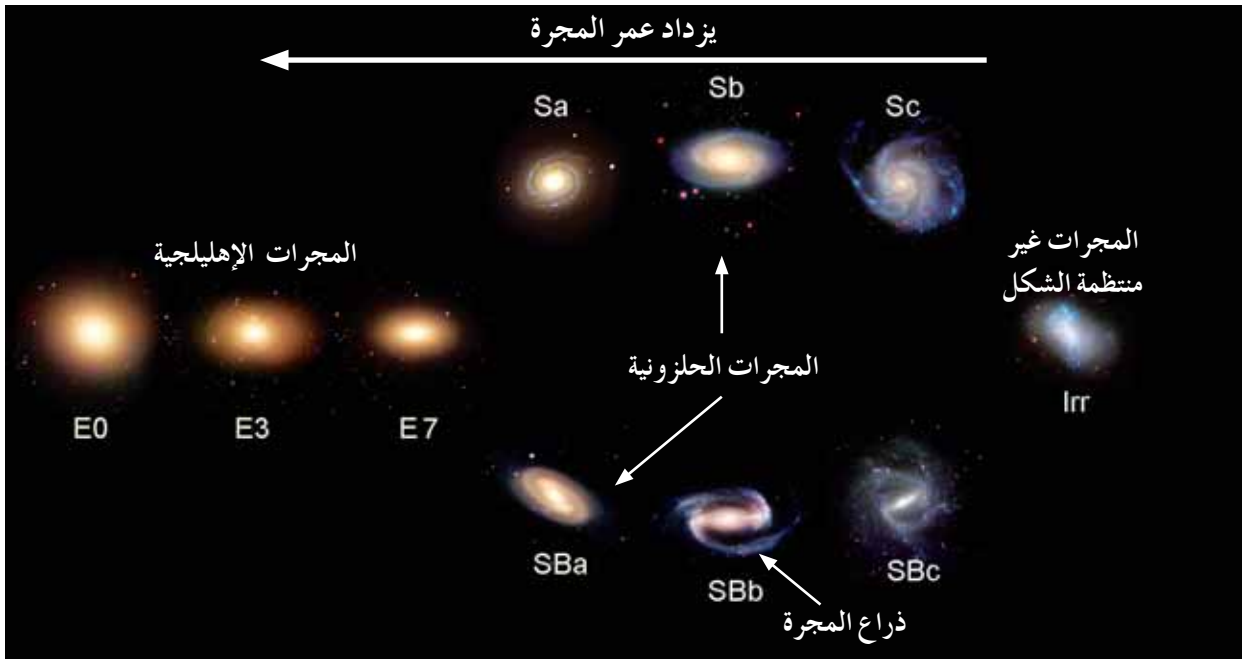
الشكل (١–١٣): مجرة درب التبّانة؛ أجزاؤها وأذرعها وموقع الشمس فيها.

تمتاز مجرة درب التبّانة بأنها **مجرة خطية النواة** (Barr Spirals)، تتكوّن **نواتها** (Bulge) من انتفاخ مضيء ضلعي مستقيم الشكل، وفيها تجمّع هائل للنجوم والغازات والغبار الكوني. ويمتدّ من نواة المجرة عدّة أذرع عملاقة حلزونية الشكل تدور حولها من الغرب إلى الشرق. ومن هذه الأذرع **ذراع الجبّار** (Orion Arm)، الذي يضمّ مجموعتنا الشمسية.

يبلغ قطر مجرة درب التبّانة ١٠٠,٠٠٠ سنة ضوئية تقريبًا، وسمكها ١٠,٠٠٠ سنة ضوئية تقريبًا. وتضمّ مجرة درب التبّانة ٢٠٠ مليار نجم تقريبًا، وتنتشر في أطرافها سحابات هائلة من الغبار الكوني والغازات. ونحن نعيش قريبًا من حافّة تلك المجرة، حيث تدور مجموعتنا الشمسية حول نواة المجرة وتبعد عنها ٢٨ ألف سنة ضوئية تقريبًا.

ثانيًا: أنواع المجرات

تعلّمت في الفصل الأول أنواعًا مختلفة من النجوم، فهل تختلف المجرات كذلك في أنواعها؟ اتّضح للفلكي إدوين هابل (Edwin Hubble) وجود الكثير من المجرات المختلفة في الخصائص، وقد صنّفها حسب أشكالها إلى ثلاثة أنواع، ورتّبها في مخطّط يُسمّى **مخطّط الشوكة الرنّانة** (Hubble's Tuning Fork Diagram). انظر الشكل (١-١٤)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (١-١٤): مخطّط الشوكة الرنّانة لتصنيف المجرات.

- عدّد أنواع المجرات التي تظهر في الشكل.
- أعطِ وصفًا للمجرات (Sa، Sb، Sc)، وللمجرات (SBa، SBb، SBc) من حيث الشكل.
- كيف يتغيّر عمر المجرات بالانتقال من المجرات غير منتظمة الشكل، إلى المجرات الإهليلجية؟

لعلك توصلت من إجاباتك عن الأسئلة السابقة، إلى وجود ثلاثة أنواع من المجرات التي تختلف في أشكالها وأعمارها، وهي:

١- المجرات غير المنتظمة

تمتاز **المجرات غير المنتظمة** (Irregular Galaxies) بأنها مجرات ليس لها شكل منتظم، ويُرمز لها بالرمز (**Irr**)، وهو اختصار لكلمة (Irregular) الإنجليزية التي تعني غير منتظم. تحوي

هذه المجرات كميات كبيرة من الغاز والغبار الكوني، وتمتاز بصِغَر حجومها وقلّة أعدادها مقارنة بالأنواع الأخرى، وتمتاز المجرات غير المنتظمة بأنها المجرات الأصغر عمرًا. ومن الأمثلة عليها (ماجلان) الكبرى و (ماجلان) الصغرى، انظر الشكل (١–١٥).

الشكل (١–١٥): سحابة (ماجلان) الصغرى (سُمّيت سحابة على الرغم من أنها مجرة).

٢– المجرات الحلزونية

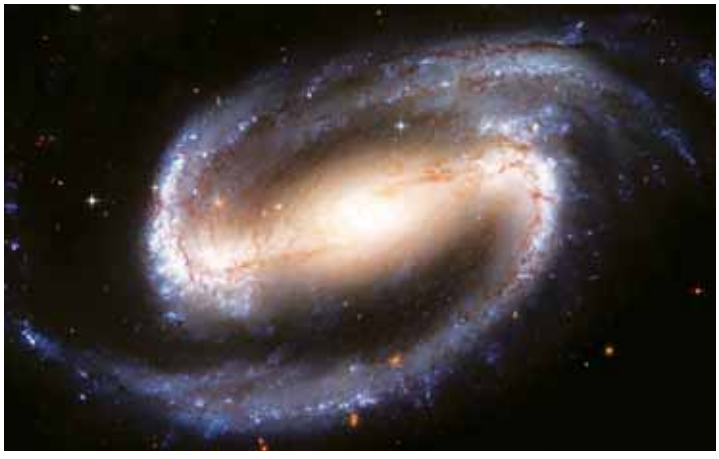
يُرمز **للمجرات الحلزونية** (Spiral Galaxies) بالرمز (S) اختصارًا للحرف الأول من اسمها الإنجليزي (Spiral). تمتاز هذه المجرات بأن لها أذرعًا تلتفّ حول نواتها بشكل حلزوني، وتحوي كميات متوسطة من الغاز والغبار الكوني بين نجومها، وهي مجرات متوسطة العمر. ويُعدّ هذا النوع من المجرات مرحلة انتقالية بين المجرات غير المنتظمة والإهليلجية، وهي أكثر المجرات انتشارًا في الكون. وتُصنّف المجرات الحلزونية اعتمادًا على شكل نواة المجرة إلى قسمين، انظر الشكل (١–١٦).

أ – **المجرات الحلزونية كروية النواة:** يُرمز **للمجرات الحلزونية كروية النواة** (Normal Spirals) بالرمز (S)؛ وذلك بسبب وجود أذرع تلتفّ بصورة حلزونية حول نواة المجرة الكروية، انظر الشكل (١–١٦/ أ). وتُصنّف هذه المجرات وَفْق شدّة انفتاح الأذرع إلى ثلاثة أنواع هي (Sa ،Sb ،Sc)، حيث يُمثّل الرمز (a) المجرات الحلزونية الأكبر عمرًا ذات

الأذرع الأقل انفتاحًا، والأقل غازًا وغبارًا كونيًّا، بينما يُمثّل الرمز (c) المجرات الأصغر عمرًا، ذات الأذرع الأكثر انفتاحًا والأكثر غازًا وغبارًا كونيًّا.

ب- المجرات الحلزونية خطّية النواة: يُرمز **للمجرات الحلزونية خطّية النواة** (Barred Spirals) بالرمز (**SB**) لأن الرمز (B) هو الحرف الأول من كلمة (Bar) التي تعني خط أو قطعة مستقيمة لتدلّ على أن شكل النواة يُظهر استطالة واضحة، وتلتفّ حوله أذرع حلزونية. أما الرموز (a) و (b) و (c) فلها الدلالات نفسها التي ذُكرت في المجرات الحلزونية كروية النواة. وتنتمي مجرتنا درب التبّانة إلى النوع (SBb). انظر الشكل (١-١٦/ ب) الذي يعرض مجرة درب التبّانة ولاحظ استطالة نواة المجرة فيها.

(أ) مجرة حلزونية كروية النواة.



(ب) مجرة حلزونية خطّية النواة (مجرة درب التبّانة).

الشكل (١-١٦): نوعا المجرات الحلزونية.

٣- المجرات الإهليلجية

يُرمز **للمجرات الإهليلجية** (Elliptical Galaxies) بالرمز (**E**)، اختصارًا للحرف الأول من اسمها الإنجليزي (Ellipse)، الذي يعني إهليلجي الشكل. يتراوح عدد نجوم هذه المجرات من عشرات الملايين إلى أكثر من تريليون نجم. وهي أقدم أنواع المجرات في الكون (أكبرها عمرًا)، وكمية الغاز والغبار فيها قليلة، وتُصنّف وَفْق شدّة استطالتها (تفلطحها) إلى ثمانية أنواع من (E0) إلى (E7)، حيث إن الرمز (E0) يدلّ على أن المجرة قريبة من الشكل الكروي وهي الأكبر عمرًا، انظر الشكل (١-١٧/ أ). أما الرمز (E7)؛ فيدلّ على أن المجرة هي الأكثر استطالة والأصغر عمرًا، انظر الشكل (١-١٧/ ب).

(أ) مجرة إهليلجية من النوع (E0).

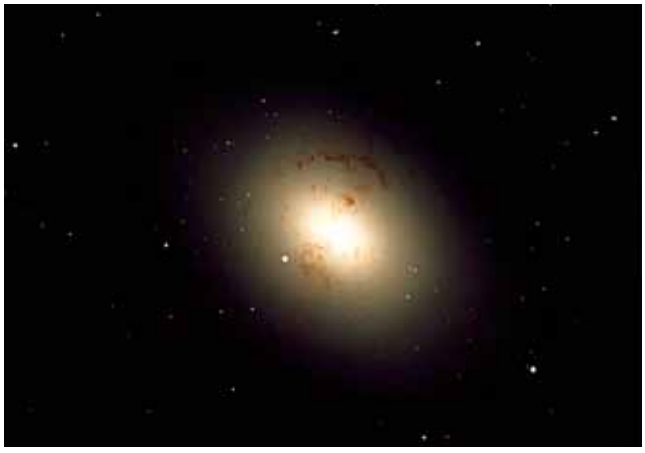
(ب) مجرة إهليلجية من النوع (E7).

الشكل (١-١٧): نوعان من المجرات الإهليليجة.

١– وضّح المقصود بكل من: المجرة، ومخطّط الشوكة الرنّانة، والمجرات غير المنتظمة.

٢– صنّف المجرات الواردة في الشكل (١–١٨) إلى الأنواع التي درستها، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

(أ)



(ب)

(جـ)

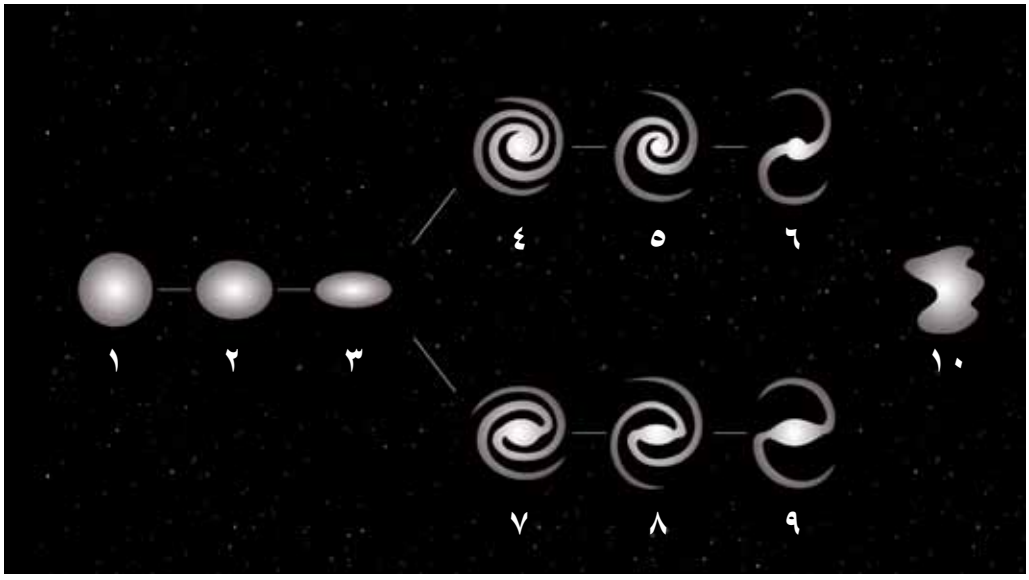
(د)

الشكل (١–١٨): السؤال (٢).

أ – ما الفرق بين المجرات (أ و د)، (ب و جـ) من حيث الشكل؟

ب– قارن بين المجرات الواردة في الشكل (١–١٨) من حيث: العمر، وكمية الغاز والغبار الكوني. نظّم إجابتك في جدول.

٣- يوضّح الشكل (١-١٩) مخطّط الشوكة الرنّانة لتصنيف المجرات، ادرسه جيدًا ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (١-١٩): السؤال (٣).

أ - ما رقم المجرة:

- الأصغر عمرًا؟
- التي تحوي أقل كمية من الغاز والغبار الكوني بين نجومها؟
- الأكثر استطالة؟
- الحلزونية الخطّية النواة، ذات الأذرع الأقل انفتاحًا؟
- التي تنتمي إليها الشمس؟
- التي تحوي أقدم النجوم؟

ب- قارن بين المجرة رقم (٦) والمجرة رقم (٧) من حيث: شكل نواة المجرة، وانفتاح الأذرع والعمر.

جـ- اكتب رموز المجرات ذات الأرقام (٤، ٦، ٨، ٩، ١٠).

الوَحْدة الثانية

٢

تسخين سطح الأرض وغلافها الجوي

(Warming Earth Surface and Atmosphere)

النتاجات

يُتوقّع منك في نهاية هذه الوَحْدة، أن تكون قادرًا على أن:

- توضّح مفهوم كل من: الإشعاع، والتدفّق، والنظام الإشعاعي، والإشعاعية، والتشتّت، والألبيدو.
- تُصنّف الأشعة وَفْق مصادرها وأطوالها الموجية.
- تصف العوامل المؤثّرة في تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على الأرض.
- تُفسّر التغيّرات اليومية والسنوية لدرجات الحرارة، وتأثيرها في الطقس.
- تستخدم المبادئ والقوانين الفيزيائية (جيب التمام، والتدفّق، ...)، لحلّ مسائل تتعلّق بالغلاف الجوي.
- تحسب كمية الطاقة الشمسية التي تكتسبها مساحة معيّنة من سطح الأرض، في مدّة زمنية معيّنة.
- تُفسّر ظهور السماء بألوان مختلفة.
- تُقدّر أهمية الطاقة الشمسية، بوصفِها مصدر إشعاع لا ينضب.

قال الله تعالى:

﴿ قُلْ أَرَءَيْتُمْ إِن جَعَلَ ٱللَّهُ عَلَيْكُمُ ٱلَّيْلَ سَرْمَدًا إِلَىٰ يَوْمِ ٱلْقِيَٰمَةِ مَنْ إِلَٰهٌ غَيْرُ ٱللَّهِ يَأْتِيكُم بِضِيَآءٍ ۖ أَفَلَا تَسْمَعُونَ ﴾

(سورة القصص، الآية ٧١).

الشمس هي المصدر الرئيس الذي يُمدّ الأرض بالطاقة، مرسلًا إيّاها على شكل إشعاعات كهرمغناطيسية ذات طيف واسع من الأطوال الموجية. يعكس الغلاف الجوي جزءًا من الإشعاع الشمسي القادم، في حين يسمح لمعظمه بالنفاذ كليًّا أو جزئيًّا إلى سطح الأرض. ويقوم الغلاف الجوي بإعاقة نفاذ الإشعاع الذي تنتجه الأرض (الإشعاع الأرضي) إلى الفضاء.

- لماذا يُعدّ الغلاف الجوي جسمًا شفّافًا للأشعة المرئية؟
- ما دور الإشعاع الأرضي في تبريد سطح الأرض وتسخينه؟

الفصل الأول

تسخين الغلاف الجوي
(Warming of the Atmosphere)

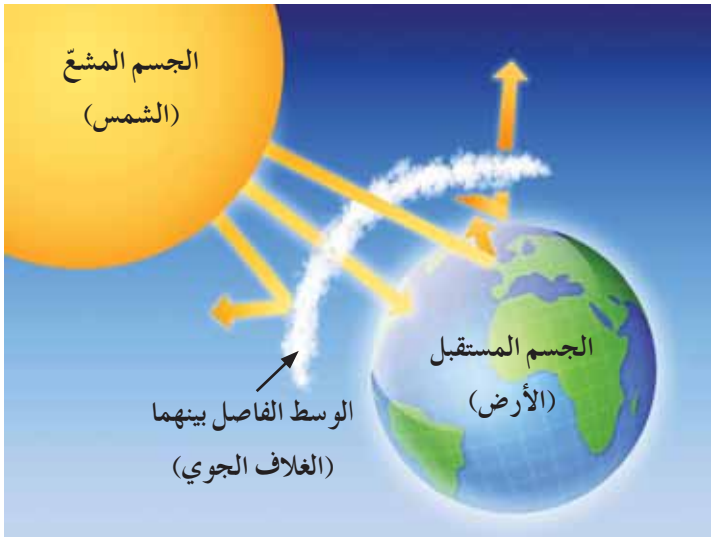
خلق الله تعالى الشمس والقمر آيتين دالّتين على كمال قدرته وعظيم سلطانه، وجعل الشمس مصدرًا للضياء والطاقة على الأرض، حيث تُعدّ الشمس المصدر الرئيس لحرارة كوكب الأرض، كما جعل الإشعاع المنعكس من سطح القمر نورًا يُنير الأرض ليلًا، وعندما يكون بدرًا خاصّة.

أولًا: الإشعاع

١- مفهوم الإشعاع، والطيف الكهرمغناطيسي

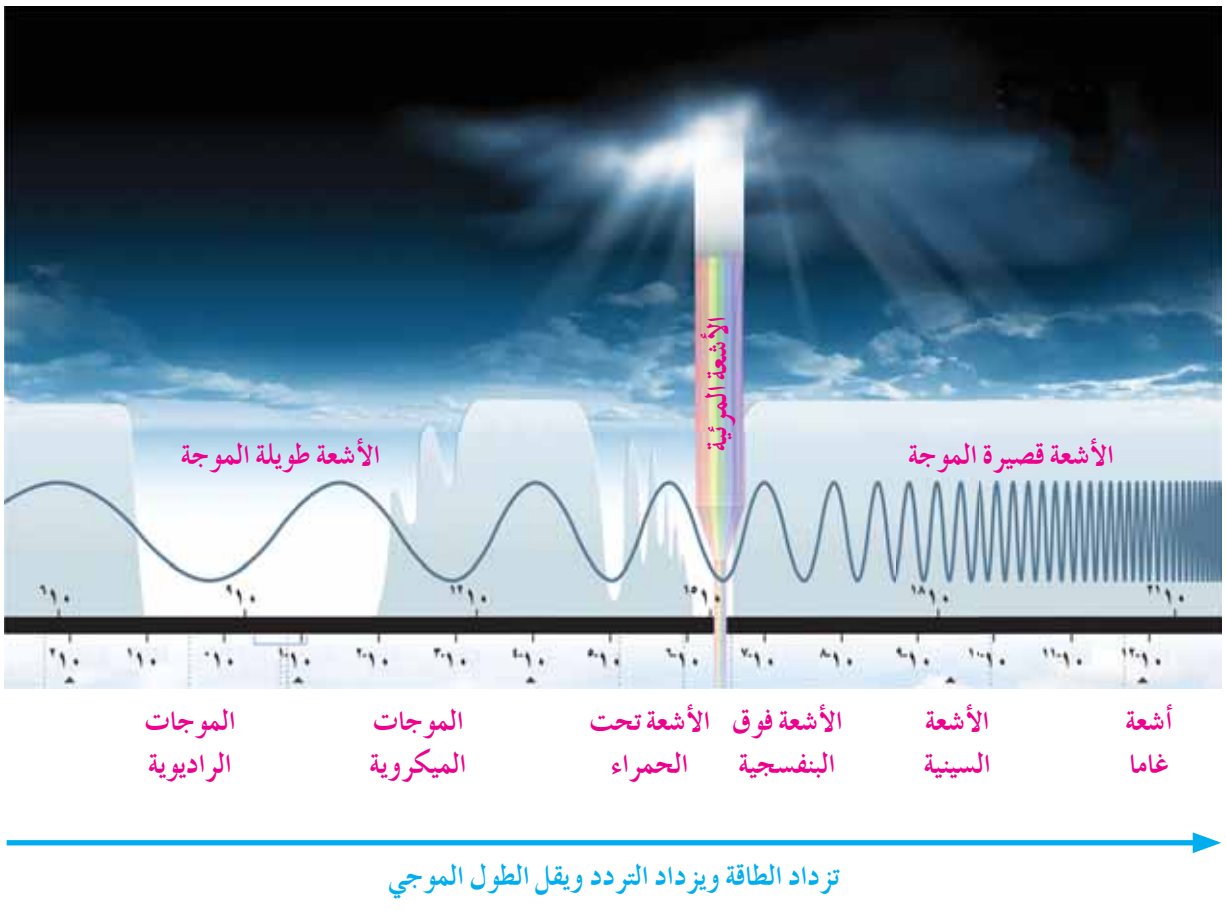
يُعرف **الإشعاع** (Radiation) بأنه عملية انتقال الطاقة على شكل فوتونات تحمل طاقة محدّدة، أو على شكل موجات كهرمغناطيسية لها أطوال موجية معيّنة. وتُسمّى المسارات التي تسلكها الطاقة في أثناء انتقالها **الأشعة**.

ويُعرف **الطيف الكهرمغناطيسي** (Electromagnetic Spectrum) بأنه حزمة من الموجات الكهرمغناطيسية تختلف في أطوالها الموجية وترددتها. وتحدث عملية الإشعاع ضمن نظام يُعرف **بالنظام الإشعاعي** (Radiation System)، الذي يتكوّن من ثلاثة عناصر رئيسة: الجسم المشعّ، والجسم المستقبِل، والوسط الفاصل بينهما، كما هو موضّح في الشكل (٢-١).



الشكل (٢-١): عناصر النظام الإشعاعي، وهي جسم مشعّ وآخر مستقبِل ووسط فاصل بينهما.

يمتاز الطيف الكهرمغناطيسي المنبعث من الشمس، بأنه طيف متّصل يضمّ مدًى واسعًا من الأطوال الموجية، انظر الشكل (٢-٢).



الشكل (٢-٢): الطيف الكهرمغناطيسي الشمسي؛ حيث تظهر فيه الأطوال الموجية (في الأسفل) مَقيسة بوَحْدة المتر، والترددات المناظرة (في الأعلى) مَقيسة بوَحْدة هيرتز.

يوضّح الشكل (٢-٢)، أن الطيف الكهرمغناطيسي يتكوّن من مجموعة واسعة من الموجات الكهرمغناطيسية التي تشترك في ما بينها في الكثير من الخصائص، إلا أنها تتميّز باختلاف أطوالها الموجية وتردداتها، والطاقة التي تحملها. ويمكن تقسيم الإشعاع الكهرمغناطيسي وَفْقًا للطول الموجي إلى ثلاث حُزم، وذلك كما هو موضّح في الجدول (٢-١).

الجدول (٢–١): مقارنة بين أجزاء الإشعاع الكهرمغناطيسي وَفْق أطوالها الموجية والأشعة المكوّنة لها.

نوع الأشعة / المقارنة	الأشعة القصيرة غير المرئية	الأشعة القصيرة المرئية	الأشعة الطويلة غير المرئية
الطول الموجي (بوَحْدة المتر)	أقل من ٤ × ١٠$^{-٧}$	٤ × ١٠$^{-٧}$ – ٧ × ١٠$^{-٧}$	أكبر من ٧ × ١٠$^{-٧}$
الأشعة المكوّنة لها	– الأشعة فوق البنفسجية. – الأشعة السينية. – أشعة غاما. – موجات ذات طاقة مرتفعة.	– الضوء المرئي (يتكوّن من ألوان الطيف).	– الأشعة تحت الحمراء. – الموجات الميكروية. – الموجات الراديوية. – موجات ذات طاقة منخفضة.

كما يُقسّم الإشعاع الكهرمغناطيسي وَفْق مصدره إلى:

١– الإشعاع الشمسي (Solar Radiation): مصدره الشمس، ويشمل الأطوال الموجية جميعها بنسب مختلفة، ويمتاز بأن طاقته الإشعاعية مرتفعة، ويؤثّر في سطح الأرض المواجه للشمس في ساعات النهار من شروق الشمس إلى غروبها. ويُبيّن الجدول (٢–٢) الأطوال الموجية للطيف الشمسي ونسب الطاقة التي يحملها كل طول موجي من مجمل طاقة الإشعاع.

الجدول (٢–٢): الطيف الشمسي*.

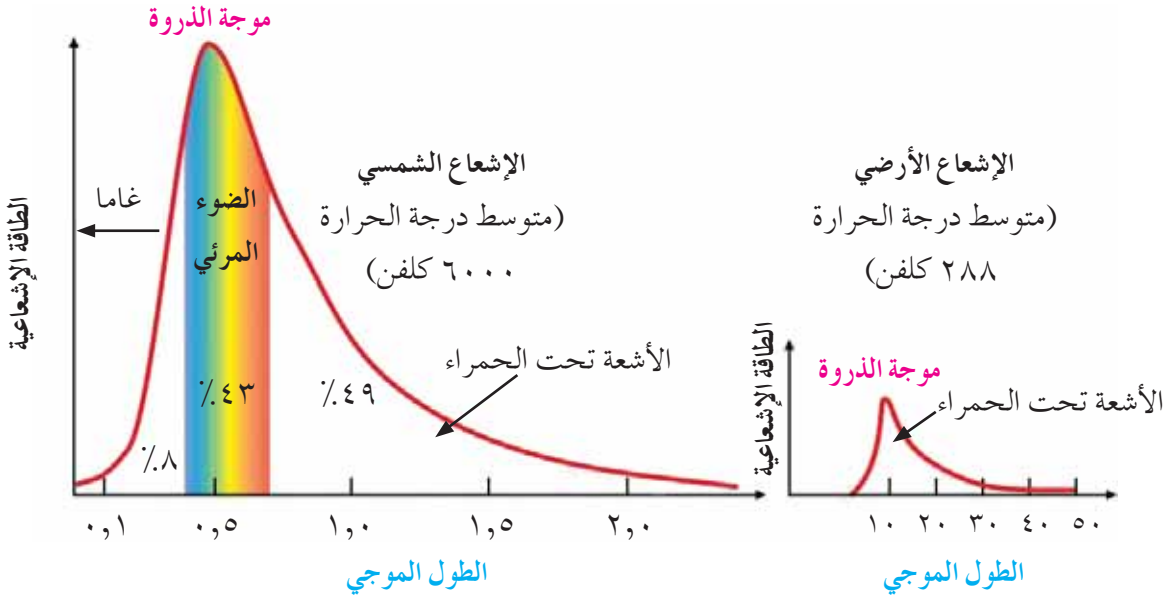
الطول الموجي	نسبة الطاقة (٪)
قصيرة غير مرئية	٨
قصيرة مرئية	٤٣
طويلة غير مرئية	٤٩

* البيانات الواردة في الجدول ليست للحفظ.

٢– الإشعاع الأرضي (Terrestrial Radiation): يقع ضمن الطول الموجي للأشعة تحت الحمراء التي تمتاز بانخفاض طاقتها الإشعاعية، وينبعث الإشعاع الأرضي من سطح اليابسة والمحيطات والغلاف الجوي وأجسام الكائنات الحية وغيرها.

حيث تُحوِّل هذه المصادر الأشعة الشمسية التي تم امتصاصها في أثناء النهار، إلى موجات طويلة تشعّها الأجسام الأرضية ليل نهار، اعتمادًا على درجات حرارتها وَفْق قانون (فين)

الذي تعلّمته سابقًا. والأجسام الباردة جميعها تشعّ أشعة أرضية، غير أننا لا نحسّ بمعظمها بسبب انخفاض طاقتها الإشعاعية. والآن، ادرس الشكل (٢–٣) الذي يبيّن المنحنى الإشعاعي الأرضي والمنحنى الإشعاعي الشمسي، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٢–٣): الأطوال الموجية (بوَحْدة ميكرومتر) والطاقة الإشعاعية لكل من الإشعاع الأرضي والإشعاع الشمسي.

- قارن بين الإشعاع الأرضي والإشعاع الشمسي من حيث:

  أ – الطول الموجي.

  ب– الطاقة الإشعاعية.

  جـ– نوع الأشعة المكوّنة لكل منهما.
- أين تقع موجة ذروة الإشعاع الأرضي على الطيف الكهرمغناطيسي الموضّح في الشكل (٢–٣)؟
- أين يُرسَم الضوء المرئي بالنسبة إلى الإشعاع الأرضي؟

ثانيًا: التدفّق

١ – مفهوم التدفّق

يُعرف **التدفّق** (Flux) بأنه معدّل مرور الطاقة عبر وَحْدة المساحة في وَحْدة الزمن. وعليه فيمكن التعبير عن الطاقة الشمسية المنبعثة في الثانية الواحدة من المتر المربع الواحد من

وَحْدة المساحة في سطح الشمس، أو الساقطة على وَحْدة المساحة في سطح الأرض بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{التدفّق } (\Phi) = \frac{\text{القدرة الإشعاعية}}{\text{مساحة سطح الشمس}}$$

حيث:

- يُقاس **التدفّق** بوَحْدة (واط/ م^{٢}) وتساوي (جول/ ث. م^{٢}).
- **القدرة الإشعاعية للشمس** هي المعدّل الزمني لانتقال الطاقة من كامل مساحة سطح الشمس، وتساوي (٤×١٠^{٢٦}) واط تقريبًا.
- **مساحة سطح الشمس** $= ٤ \times \frac{٢٢}{٧} \times$ (نصف قطر الشمس)^{٢}، وتُقاس بوحدة المتر المربع.

مثال (١)

إذا كانت مساحة سطح الشمس تساوي (٦١٦×١٠^{١٠})كم^{٢}، وقدرتها الإشعاعية تساوي (٤×١٠^{٢٦}) واط. احسب تدفّق الطاقة الإشعاعية المنبعثة من الشمس.

الحل:

$$\text{تدفّق الأشعة المنبعثة} = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}}$$

$$= \frac{(٤ \times ١٠^{٢٦}) \text{ واط}}{(٦١٦ \times ١٠^{١٠} \times ١٠^{٦}) \text{ م}^{٢}}$$

$$= ٦,٥ \times ١٠^{٧} \text{ واط/ م}^{٢}.$$

٢- العوامل المؤثّرة في تدفّق الطاقة الشمسية الساقطة

يعتمد مقدار الطاقة الشمسية الساقطة على سطح كوكب ما على عدّة عوامل، أهمها: بُعد السطح عن الشمس، وزاوية سقوط أشعة الشمس على السطح، والوسط الفاصل بين سطح الكوكب والشمس (مكوّنات الغلاف الجوي للكوكب).

أ – **البُعد عن الشمس:** تعلّمت في الوَحْدة السابقة أن شدّة إضاءة النجوم تتناسب تناسبًا عكسيًّا مع مربع بُعدها عن المصدر حسب قانون التربيع العكسي، وبما أن أبعاد الكواكب عن الشمس مختلفة، فإن تدفّق الطاقة الشمسية يختلف بين كوكب وآخر. وبالنسبة إلى الأرض فيُطلق على كمية الطاقة الشمسية الساقطة عموديًّا على المتر المربع الواحد من السطح الخارجي للغلاف الجوي في الثانية الواحدة **الثابت الشمسي للأرض** (Solar Constant)، ويبلغ متوسطه للأرض ١٣٧٢ واط/ م^{٢} تقريبًا.

ويمكن حساب الثابت الشمسي لأي كوكب بقسمة القدرة الإشعاعية للشمس على المساحة الداخلية لسطح كروي تقع الشمس في مركزه في حين يدور الكوكب على سطحه، وبذلك يكون نصف قطر الكرة هو متوسط بُعد الكوكب عن الشمس كما في المثال الآتي:

مثال (٢)

احسب متوسط الثابت الشمسي لكوكب عطارد الذي يبلغ متوسط بُعده عن الشمس ٥٨ مليون كم، علمًا بأن قدرة الشمس الإشعاعية ٤ × ١٠^{٢٦} واط.

الحل:

نق = ٥٨ × ١٠^{٦} × ١٠^{٣} = ٥٨ × ١٠^{٩} م.

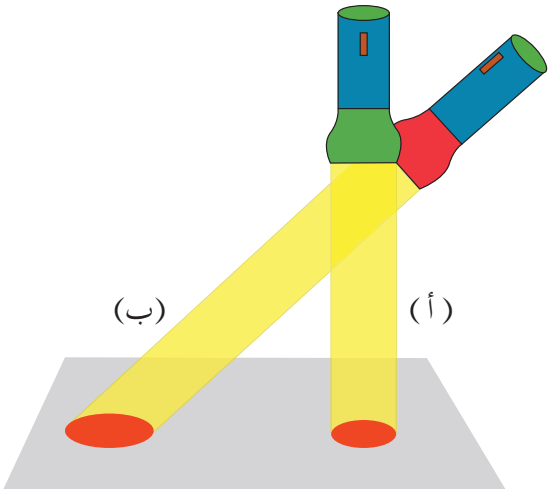
$$\text{الثابت الشمسي لعطارد} = \text{تدفّق الإشعاع } (\Phi^*) = \frac{\text{قدرة الشمس الإشعاعية}}{\text{مساحة سطح الكرة الداخلي}}$$

$$\text{(لكن مساحة سطح الكرة} = ٤ \times \frac{٢٢}{٧} \times \text{(متوسط المسافة بين الشمس وعطارد)}^{٢}\text{).}$$

$$\Phi^* = \frac{٤ \times ١٠^{٢٦}}{٤ \times \frac{٢٢}{٧} \times (٥٨ \times ١٠^{٩})^{٢}} = ٩٤٥٨ \text{ واط/ م}^{٢}.$$

إذن: متوسط الثابت الشمسي لكوكب عطارد = ٩٤٥٨ واط/ م^{٢}.

ب– زاوية سقوط الأشعة: تُعرف **زاوية سقوط الأشعة** بأنها الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والعمود المقام على السطح عند نقطة السقوط. ويمكن معرفة أثر اختلاف زاوية سقوط الأشعة الشمسية في التدفّق؛ بدراسة الشكل (٢–٤).



الشكل (٢–٤): العلاقة بين قيمة تدفّق الأشعة الساقطة وتغيّر زاوية سقوطها. لاحظ أن الأشعة التي تسقط عمودية على السطح تتوزّع على مساحة صغيرة فيكون التدفّق كبيرًا (الشعاع أ)، أما الأشعة التي تسقط بشكل مائل، فإنها تتوزّع على مساحة كبيرة فيكون التدفّق صغيرًا (الشعاع ب)، مع تساوي مقدار الأشعة الساقطة في كلتا الحالتين.

وقد وُجد حسابيًّا، أن التدفّق الساقط يتناسب تناسبًا طرديًّا مع جيب تمام زاوية السقوط ويمكن حساب قيمته بدلالة زاوية السقوط باستخدام العلاقة الرياضية الآتية:

$$\Phi = \Phi^* \times \text{جتاهـ}$$

حيث:

Φ : تدفّق الأشعة الساقطة على السطح الخارجي للغلاف الجوي.

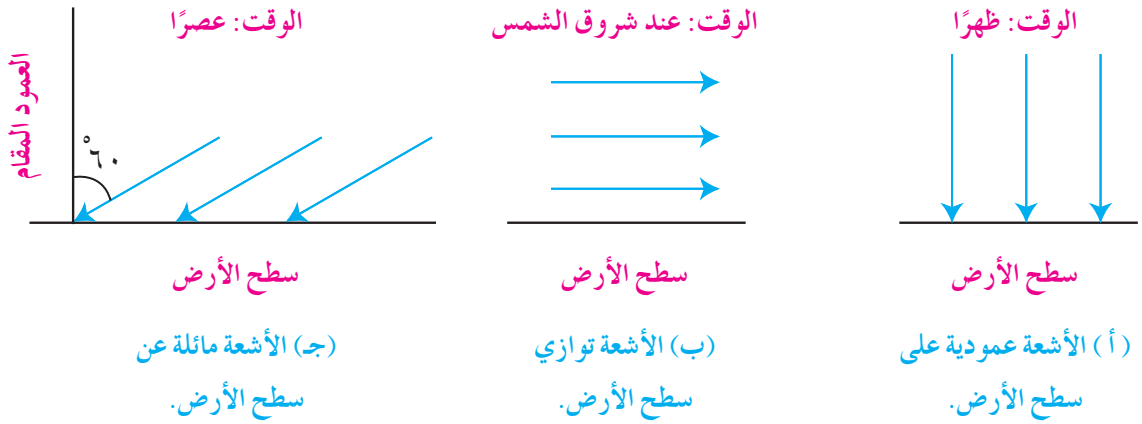
Φ^*: تدفّق الأشعة المنبعثة من الشمس إلى الأرض (الثابت الشمسي للأرض).

هـ : زاوية سقوط الأشعة.

مع إهمال تأثير المسافة بين الشمس والسطح الخارجي للغلاف الجوي.

اختبر معلوماتك

١- احسب تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على دائرة الاستواء يوم الاعتدال الربيعي (٣/٢١) في كل من الحالات الآتية:



(أ) الأشعة عمودية على سطح الأرض.

(ب) الأشعة توازي سطح الأرض.

(جـ) الأشعة مائلة عن سطح الأرض.

الشكل (٢-٥): اختبر معلوماتك: السؤال (١).

٢- مصباح قدرته (١٠٠) واط يبعد (١م) عن سطح حُرّ الحركة بحيث تتغيّر زوايا سقوط الأشعة على السطح بين (٣٠°) و (٦٠°)، احسب:

أ - تدفّق الأشعة المنبعثة من المصباح، والساقطة عموديًا على السطح.

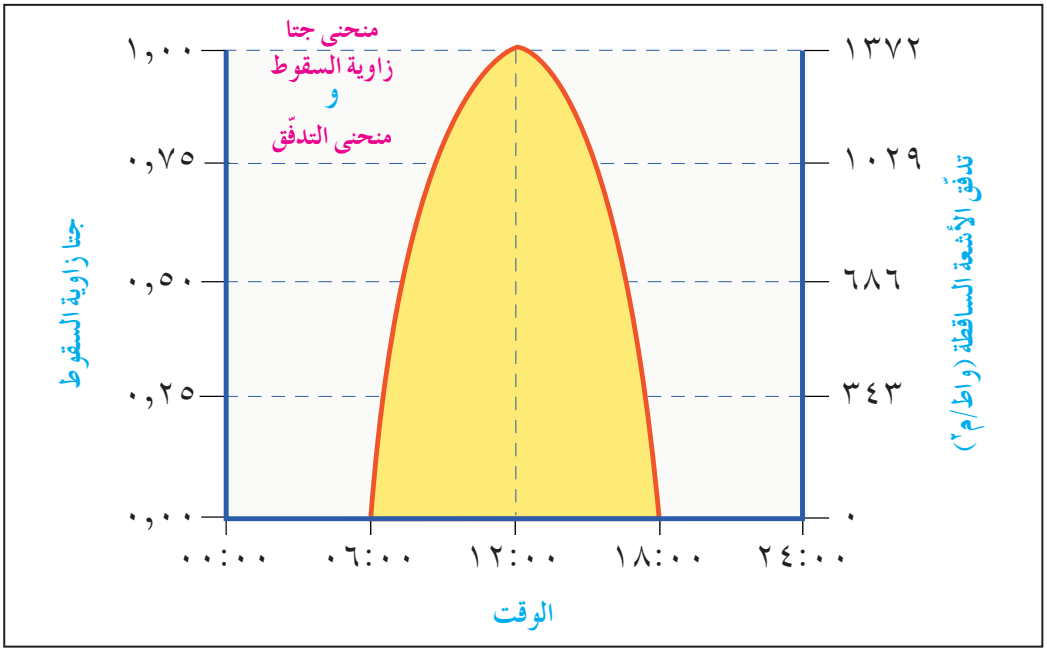
ب- تدفّق الأشعة الساقطة على السطح عندما تكون زاوية السقوط ٣٠° و ٦٠°، والنسبة بينهما.

من الظواهر التي يمكن تفسيرها بناءً على اختلاف زاوية السقوط: التغيّر اليومي في درجات الحرارة، والتغيّر الفصلي في درجات الحرارة، وتغيّر متوسط تدفّق الأشعة الساقطة بتغيّر دوائر العرض.

١- التغيّر اليومي في درجات الحرارة: يُبيّن الشكل (٢-٦) تغيّر تدفّق الأشعة الساقطة على سطح الأرض بتغيّر زاوية السقوط على مدار اليوم كما يأتي:

- **تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على السطح الخارجي للغلاف الجوي يساوي صفرًا** تقريبًا لحظتَي الشروق والغروب؛ لأن الأشعة الشمسية تكون موازية لسطح الأرض.

- **تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على السطح الخارجي للغلاف الجوي وقت الظهيرة يساوي (١٣٧٢) واط/ م٢**، حيث تكون الشمس عمودية على سطح الأرض.
- **متوسط تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على الكرة الأرضية نهارًا يساوي (٦٨٦) واط/ م٢**، وذلك بقسمة الثابت الشمسي على (٢). لماذا؟
- **متوسط تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على مدار اليوم يساوي (٣٤٣) واط/ م٢**، وذلك بقسمة الثابت الشمسي على (٤).



الشكل (٢-٦): تغيّر تدفّق الأشعة الساقطة على السطح، بتغيّر زاوية السقوط على مدار اليوم.

اعتمادًا على الشكل (٢-٦)، أجب عن الأسئلة الآتية:

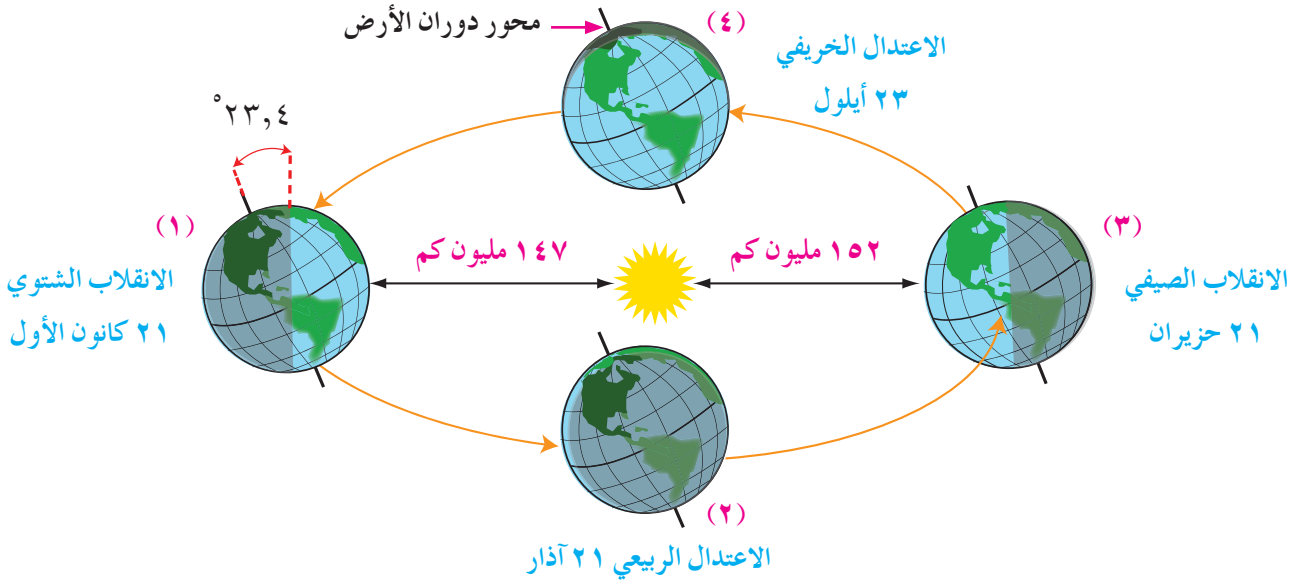
أ - ما متوسط تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على السطح الخارجي لغلاف الأرض الجوي، من منتصف النهار إلى منتصف الليل (١٢ظهرًا - ١٢ليلًا) ؟

ب- احسب متوسط تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على السطح الخارجي لغلاف الأرض الجوي في أثناء اليوم كاملًا.

جـ- احسب تدفّق الطاقة الشمسية الساقطة فوق الغلاف الجوي عند دائرة الاستواء، في الأوقات الآتية: (الساعة ١٢ظهرًا، الساعة ٦صباحًا، الساعة ١٢ليلًا).

د - ما العلاقة بين جتا زاوية سقوط الأشعة والتدفّق؟

٢- التغيّر الفصلي في درجات الحرارة: يُبيّن الشكل (٢-٧) موقع الأرض بالنسبة إلى الشمس في أوقات مختلفة من السنة، مع المحافظة على ثبات الاتجاه الذي يُشير إليه محور دوران الأرض طوال العام. ادرس الشكل، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



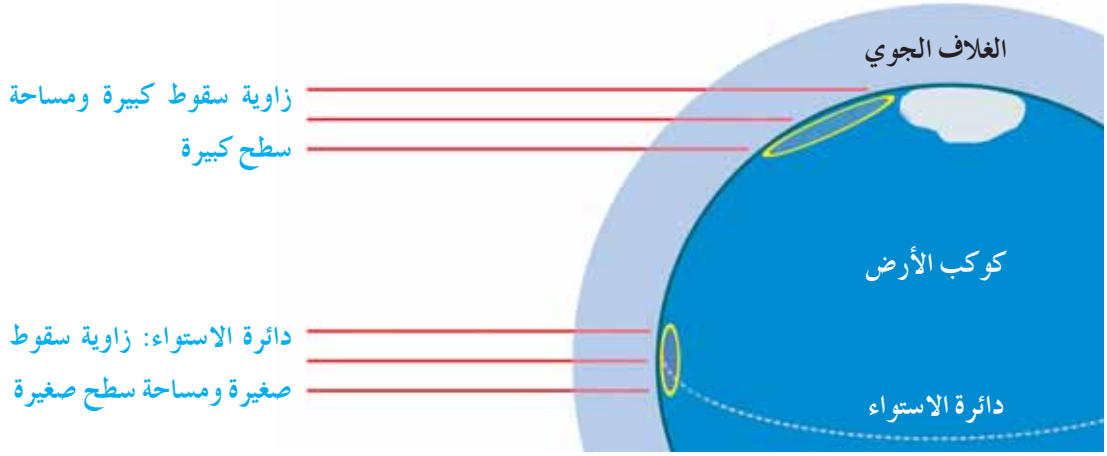
الشكل (٢-٧): موقع الأرض بالنسبة إلى الشمس واتجاه ميل محورها في أوقات مختلفة من السنة. التسميات في الشكل هي لنصف الكرة الشمالي.

- ما قيمة ميل محور دوران الأرض عن العمود المقام على المستوى الذي تدور فيه حول الشمس؟
- هل يتغيّر اتجاه ميل محور الأرض في أثناء دورانها حول الشمس مع تغيّر الفصول؟
- أيّ فصول السنة يكون سائدًا في نصف الكرة الشمالي، عندما تكون الأرض في الموقع (١) وفي الموقع (٣)؟
- في أيّ فصول السنة في نصف الكرة الشمالي، تكون الأرض أقرب إلى الشمس؟

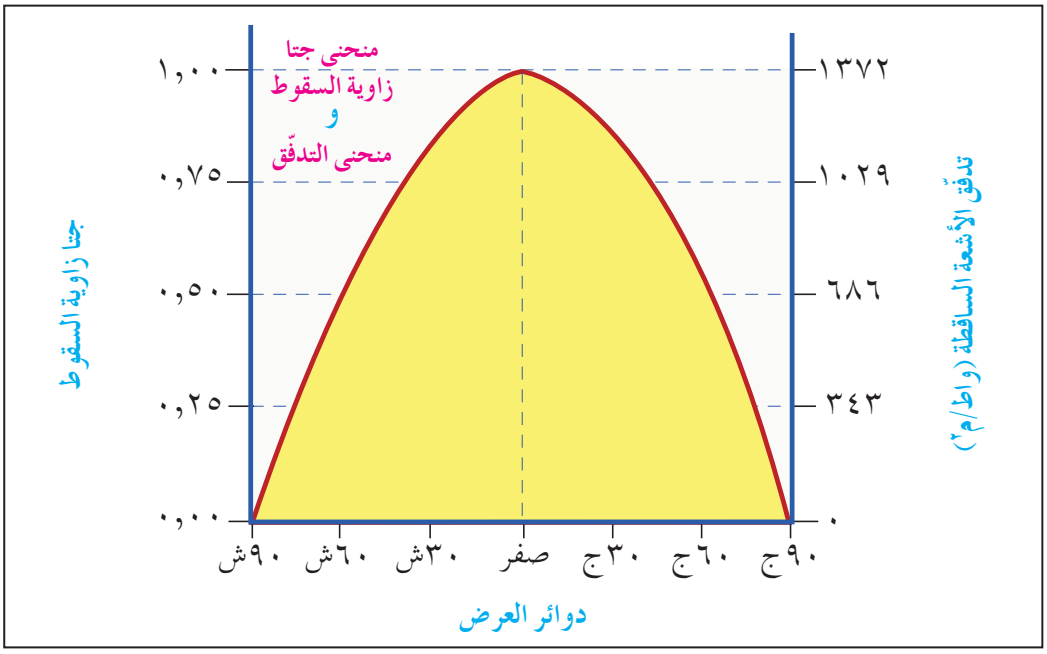
نستنتج من الشكل (٢-٧)، أن تغيّر زوايا سقوط أشعة الشمس على سطح الأرض باختلاف موقعها الفصلي من الشمس، هو الذي يغيّر تدفّق الطاقة الشمسية على سطح الأرض. ومن ثمّ، فهو يحدّد الفصل السائد من السنة. حيث نلاحظ في **الموقع (١)**، أن وجه الأرض المقابل للشمس في نصف الكرة الشمالي يكون مائلًا بعيدًا عن الشمس؛ لذا، تكون زاوية سقوط الأشعة الشمسية كبيرة، ويكون التدفّق قليلًا، ويكون الفصل شتاءً في النصف الشمالي من الكرة

الأرضية، ويحدث العكس في **الموقع (٣)**. أما في **الموقعين (٢) و(٤)**، فتكون الشمس عمودية على دائرة الاستواء حيث تتوزّع الحرارة بالتساوي على نصفَي الكرة الشمالي والجنوبي ويحدث الاعتدالين الربيعي والخريفي.

٣- تغيّر متوسط تدفّق الأشعة الساقطة بتغيّر دوائر العرض: لتعرّف كيف يتغيّر متوسط تدفّق الأشعة الساقطة بتغيّر دوائر العرض، ادرس الشكلين (٢-٨) و (٢-٩)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليهما.



الشكل (٢-٨): تغيّر متوسط تدفّق الأشعة الشمسية بتغيّر دوائر العرض الساقطة عليها.



الشكل (٢-٩): تغيّر تدفّق الأشعة الساقطة بتغيّر دوائر العرض؛ الرمز (ش) يُمثّل دائرة العرض شمال دائرة الاستواء، والرمز (ج) يُمثّل دائرة العرض جنوب دائرة الاستواء.

- على أيّ دائرة عرض تكون زاوية سقوط أشعة الشمس أكبر؟
- ما دوائر العرض التي تتلقّى أكبر تدفّق للطاقة الشمسية الساقطة؟
- ما دوائر العرض التي تتلقّى أقل تدفّق للطاقة الشمسية الساقطة؟
- ماذا ينتج من اختلاف تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على دوائر العرض المختلفة؟
- ما أساس اختلاف توزيع المناخ في العالم؟

نستنتج من الشكل (٢–٨)، أن تدفّق الأشعة الشمسية يتناسب تناسبًا عكسيًّا مع زاوية سقوط الأشعة؛ لذا، يكون تدفّق أشعة الشمس أكبر ما يمكن عند دائرة الاستواء؛ لأن الأشعة تسقط عموديةً على سطح الأرض (زاوية السقوط تساوي صفر في هذه الحالة). فتتوزّع على مساحة صغيرة، أما دوائر العرض الأعلى فيكون تدفّق الأشعة الواصل إليها أقل؛ لأن أشعة الشمس تسقط بشكل مائل؛ فتتوزّع على مساحات كبيرة.

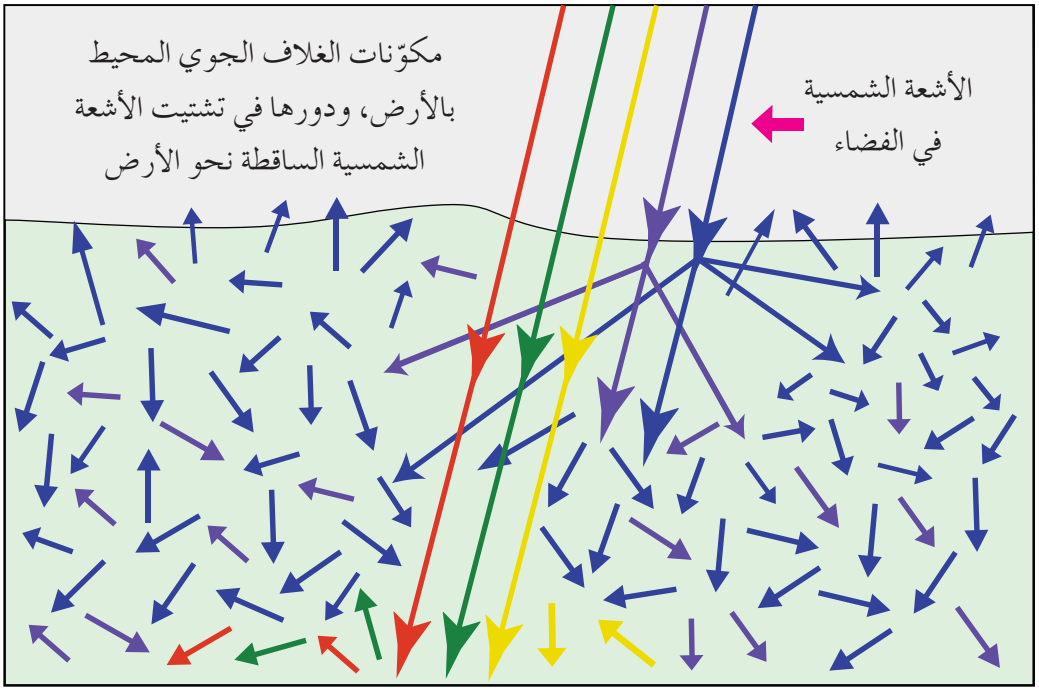
ويبيّن الشكل (٢–٩)، التباين الكبير في كمية الطاقة الشمسية الساقطة على دوائر العرض المختلفة، ويُعدّ هذا التباين أساسًا لاختلاف توزيع المناخ في العالم الذي يرتبط بزاوية سقوط الأشعة، فيكون المناخ في المناطق القطبية باردًا؛ لأن زاوية سقوط الأشعة تكون أكبر ما يمكن، أما عند دائرة الاستواء فيكون المناخ حارًّا؛ إذ تكون زاوية السقوط حول الصفر.

جـ– مكوّنات الغلاف الجوي للأرض (الوسط الفاصل بين الشمس والأرض): تحدث في الغلاف الجوي مجموعة من العمليات التي تؤثّر في مقدار الطاقة التي تصل إلى سطح الأرض. وفي ما يأتي إيجاز لبعض هذه العمليات:

١. امتصاص الأشعة في الغلاف الجوي (Absorption): تمتصّ مجموعة الغازات المكوّنة للغلاف الجوي ممثّلة بغازات الدفيئة وأهمها (CO_2، CH_4، O_3، N_2O، H_2O) جزءًا كبيرًا من الأشعة الشمسية التي تصل إلى الأرض من الأطوال الموجية القصيرة والطويلة. وتعتمد امتصاصية الغازات على **معامل الإشعاع** أو **الإشعاعية** (Emissivity) التي تصف كفاية امتصاص الجسم للأشعة وقدرته على إعادة إشعاعها. وتُعرف **الإشعاعية** بأنها نسبة كمية الطاقة الفعلية التي يشعّها الجسم عند درجة حرارة معيّنة، إلى كمية الطاقة التي يشعّها الجسم الأسود على تلك الدرجة.

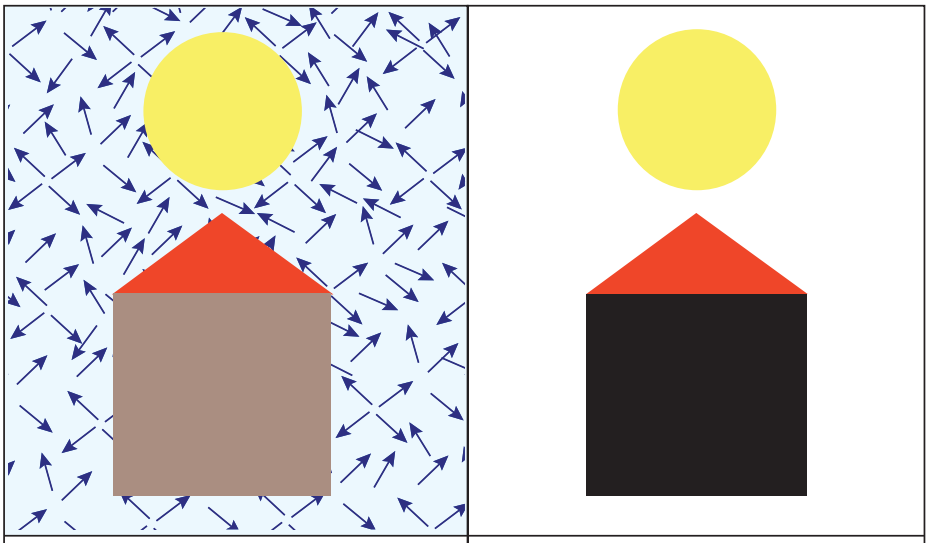
٢ . تشتّت الضوء

أ . **مفهوم تشتّت الضوء:** عندما تخترق أشعة الشمس الغلاف الجوي، فإنها تتعرّض لعمليات انكسار وانعكاس مختلفة بفعل جزيئات الهواء، مثل الأكسجين والنيتروجين والدقائق المادية العالقة في الهواء، حارفة إيّاها عن مساراتها المستقيمة الأصلية، ما يؤدي إلى تشتيت الضوء في الاتجاهات كافة. وتُعرف هذه الظاهرة **بتشتّت الضوء** (Light Scattering) وهي موضّحة في الشكل (٢–١٠).



الشكل (٢–١٠): تشتّت الضوء في الغلاف الجوي.

وتشتّت الضوء هو إحدى النعم العظيمة التي أنعم الله تعالى بها علينا، فلولا تشتّت الضوء لما عمّ الضياء ولما تمكّن الانسان من رؤية الأجسام التي لا تتعرّض مباشرة لأشعة الشمس، أو غيرها من مصادر الضوء. تأمّل الشكل (٢–١١)، ولاحظ كيف تعمل مكوّنات الغلاف الجوي على نقل الضوء في الشكل (٢–١١/ ب) إلى داخل البيت.

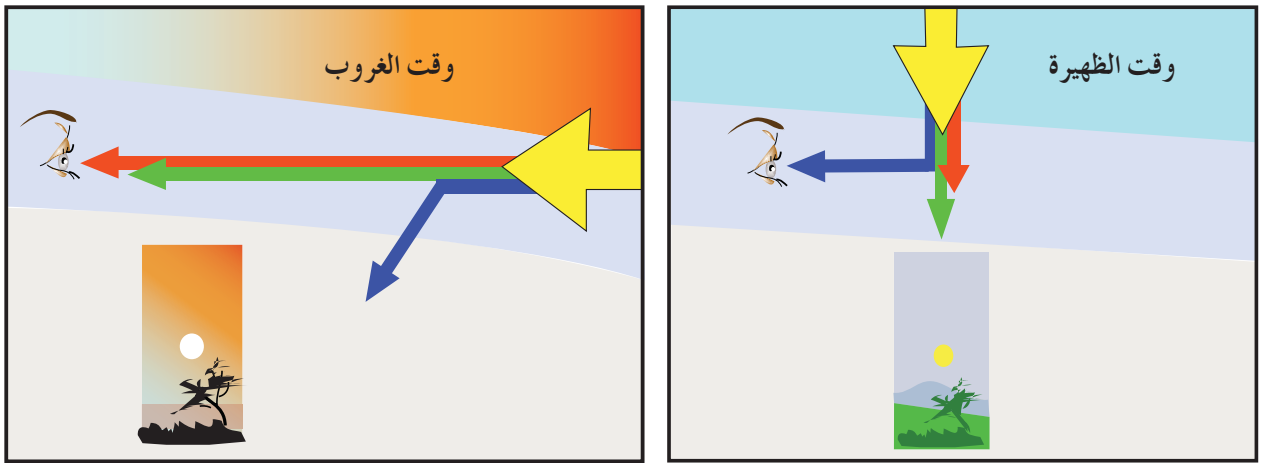


(أ) بيت افتراضي محاط بفراغ خالٍ من التشتّت فيستحيل دخول الضوء من النوافذ؛ لأنه يسير في خطوط مستقيمة.	(ب) بيت ذو نوافذ محاط بجزيئات الهواء التي تشتّت الضوء؛ فتنقل بعضه إلى داخل البيت.

الشكل (٢–١١): فائدة التشتّت في توزيع الضوء في السماء، ونقله إلى داخل المباني.

بالإضافة إلى أهمية التشتّت في توزيع الضوء في الغلاف الجوي بحيث يعمّ الضياء، ونقل الضوء إلى داخل المباني والكهوف وتحت الأشجار؛ فإنه المسبّب بظهور السماء باللونين الأزرق والأحمر. إذ تتناسب شدّة الضوء المتشتّت بفعل جزيئات الهواء تناسبًا عكسيًّا مع القوة الرابعة لطول موجة الضوء الساقط (λ^{-4}). أي أن الضوء ذا الطول الموجي الأقصر، يتشتّت أكثر من الضوء ذي الطول الموجي الأطول. وعليه، فإن الأشعة ذات اللونين البنفسجي والأزرق من الطيف الشمسي المرئي تتشتّت أكثر من الأشعة البرتقالية أو الحمراء. وبما أن الضوء الأزرق هو الأكثر وفرة في طيف الشمس، فإنه يغلب على الضوء البنفسجي فتظهر السماء باللون الأزرق. وهكذا، فإن الأشعة الضوئية الزرقاء المتشتّتة هي المسؤولة عن زُرقة السماء في أثناء النهار.

ولكن، لماذا تبدو السماء بلون أحمر عند شروق الشمس أو عند غروبها؟ للإجابة عن هذا السؤال انظر الشكل (٢–١٢)، وقارن بين طول المسار الذي يقطعه الضوء وقت الظهيرة ووقتَي الشروق والغروب.



الشكل (٢–١٢): العلاقة بين لون السماء وطول المسار الذي يسلكه الضوء وقت الظهيرة ووقت الغروب.

يعبر ضوء الشمس مسافاتٍ أطول داخل الغلاف الجوي عند الشروق والغروب بالمقارنة مع وقت الظهيرة؛ الأمر الذي يجعله يعاني تشتّتًا أكثر بسبب كثرة جزيئات الهواء التي تعترض مساره. وعليه، فإن الأشعة الضوئية الزرقاء جميعها تتشتّت (تنضب) تقريبًا ولا يصل إلى الأرض إلا الأشعة ذات اللونين البرتقالي والأحمر.

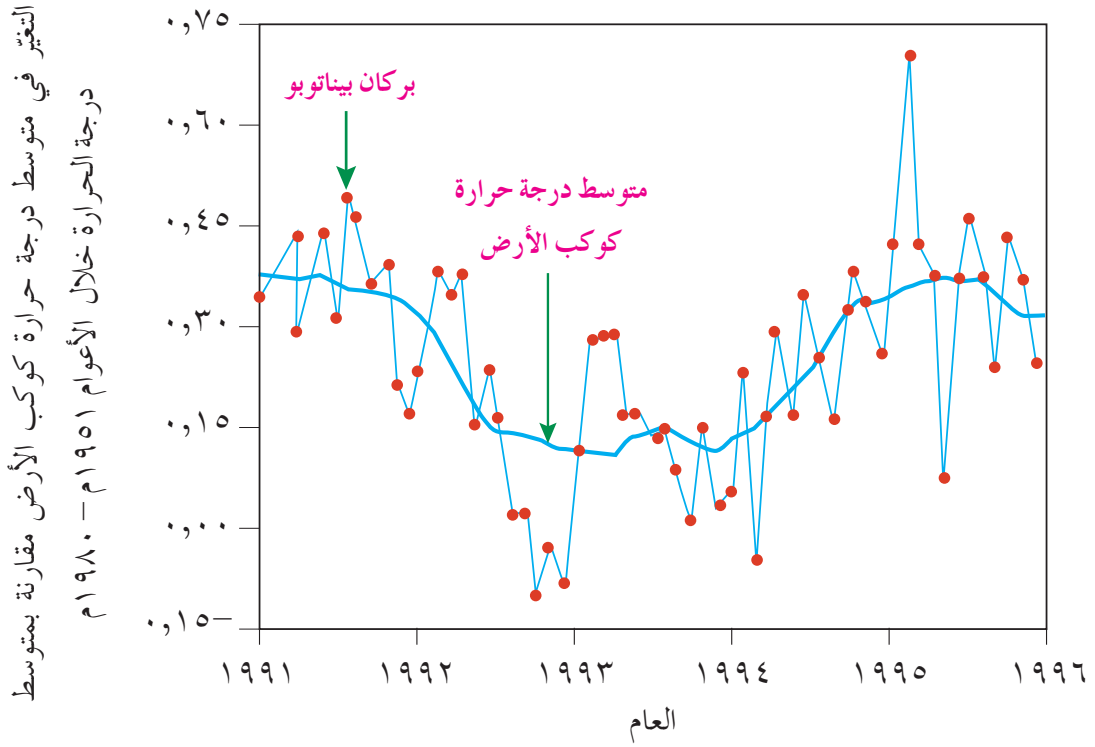
رأيت آنفًا أن جزيئات الهواء هي المسؤولة عن ظهور السماء باللونين الأزرق والأحمر: فهل للدقائق المادية العالقة كقطرات الماء وبلورات الثلج وحبيبات الغبار أي دور في تشتّت الضوء؟

تمتاز الدقائق المادية بكِبَر حجومها مقارنة بالأطوال الموجية للضوء المرئي، ولذلك فهي تشتت الضوء من دون أن تحلّله إلى ألوان الطيف السبعة المعروفة؛ فينتج من ذلك تدنّي مدى الرؤية بسبب الضباب أو العواصف الرملية، وعندها تظهر السماء باللون الأبيض.

ب. تأثير تشتّت الضوء في المناخ: يُعرف (**الألبيدو**) أو **البياضيّة** (Albedo) لسطحٍ ما بأنه نسبة الأشعة المنعكسة عن السطح إلى الأشعة المباشرة الساقطة عليه؛ لذا، فإن تشتّت الضوء بفعل الدقائق المادية العالقة يعمل على زيادة قيمة الألبيدو لكوكب الأرض؛ لأن بعض الإشعاع الشمسي المتشتّت ينعكس إلى

الفضاء الخارجي فتقلّ بذلك كمية الطاقة الشمسية التي يمتصها سطح الأرض أو غلافها الجوي فتنخفض درجة حرارة الكوكب. وهذه ملاحظة تعزّزها قراءات محطات الرصد الجوي إذ يُلاحظ انخفاض قيم درجات حرارة الجو في أعقاب الثورانات البركانية الضخمة. ومن الأمثلة المعاصرة على ذلك، انخفاض متوسط درجة حرارة كوكب الأرض نتيجةً لثوران بركان بيناتوبو (Pinatubo) في الفلبين عام ١٩٩١م.

ويستمر تأثير الرماد البركاني بضعة أعوام، إلى أن يترسّب على سطح الأرض، ثمّ تعود درجات الحرارة تدريجيًّا إلى قيمها التي سبقت ثوران البركان. ادرس الشكل (٢–١٣)*، ولاحظ انخفاض قيم درجات حرارة الجو في الأعوام التي تلت ثوران بركان بيناتوبو.



* الشكل (٢–١٣) للاطلاع فقط: التغيّر في متوسط درجة حرارة كوكب الأرض خلال الأعوام ١٩٩١م – ١٩٩٦م (يظهر بالخط الأزرق المتصل السميك)، مقارنة بمتوسط درجة الحرارة خلال الأعوام ١٩٥١م – ١٩٨٠م، ويظهر تأثير بركان بيناتوبو بوضوح (بالخط الأزرق المتعرج الذي يحمل النقاط الحمراء الصغيرة).

١- نجم يُصدر طاقته الإشعاعية العظمى عند طول موجة (٣٠٠×١٠^{-٧}) متر، وقدرته الإشعاعية ($٥,٦ \times ١٠^{٢٠}$) واط، ومساحة سطحه (١٠٠) م^{٢}، احسب:

أ - تدفّق الأشعة المنبعثة من هذا النجم.

ب- درجة حرارة النجم، علمًا بأن ثابت فين = $٢,٩ \times ١٠^{-٣}$ ك.م.

٢- نجم قدرته الإشعاعية (١٨٠×١٠^{٢٢}) واط ومساحة سطحه (١٠٠٠٠) م^{٢}، احسب تدفّق الأشعة المنبعثة من هذا النجم.

٣- فسّر الظواهر الآتية تفسيرًا علميًّا دقيقًا:

أ - تغيّر درجات الحرارة على سطح الأرض في أثناء فصول السنة.

ب- ظهور السماء باللون الأحمر وقتَي الشروق والغروب.

جـ- اختلاف قيمة الثابت الشمسي من كوكب إلى آخر.

٤- احسب متوسط الثابت الشمسي لكوكب الزُّهَرة، إذا كان متوسط بُعده عن الشمس ١٠٨مليون كم، علمًا بأن قدرة الشمس الإشعاعية (٤×١٠^{٢٦}) واط.

٥- أ - ما المقصود بالتشتّت؟

ب- لماذا يزيد تشتيت الدقائق المادية من قيمة الألبيدو لكوكب الأرض؟

جـ- ما تأثير الرماد البركاني في درجة حرارة الغلاف الجوي؟

د - وضّح العلاقة بين شدّة الضوء المتشتّت بفعل جزيئات الهواء وطول موجة الضوء الساقط.

٦- احسب طول موجة الذروة المنبعثة من الإشعاع الأرضي، إذا كان متوسط درجة حرارة الإشعاع = ٢٨٨ كلفن، وثابت فين = $٢,٩ \times ١٠^{-٣}$ ك.م.

٧- ما الخصيصة التي تميّز الأجسام عن بعضها، وتعمل على اختلاف قدرة غازات الغلاف الجوي على امتصاص الأشعة الشمسية؟ وماذا تصف هذه الخصيصة؟

الفصل الثاني

الطاقة الحرارية على سطح الأرض
(Thermal Energy on Earth Surface)

تُعدّ الشمس مصدر الطاقة الحرارية الرئيس للأرض، وتتوزّع هذه الطاقة على الأجزاء المختلفة من الأرض؛ فعند تعرّض اليابسة أو المسطحات المائية لأشعة الشمس؛ فإنها تمتص الطاقة الحرارية، ويقوم الغلاف الجوي بدور مهم في اتزان الطاقة الحرارية وتوزيعها على سطح الأرض. ولكن، هل تختلف سطوح الأجسام في قدرتها على امتصاص الطاقة الشمسية الساقطة عليها؟ وكيف يمكن حساب كمية الطاقة الشمسية التي تمتصها مساحة معيّنة من الأرض؟ وكيف يُسهم الغلاف الجوي في اتزان الطاقة الحرارية وتوزيعها على سطح الأرض؟

أولًا: امتصاص الطاقة الشمسية من سطح الأرض

يؤدي اختلاف قدرة بعض السطوح الطبيعية على عكس الأشعة الساقطة، إلى اختلاف قدرتها على امتصاص الطاقة الشمسية الساقطة عليها، ويوضّح الجدول (٢–٣) انعكاسية بعض السطوح الطبيعية، حيث يمكن توظيف الانعكاسية في تفسير بعض الظواهر الجوية ورصدها والتنبؤ بها، فالمناطق المغطاة بالثلوج تعكس معظم الأشعة الساقطة عليها؛ لذا، فإن إسهام الأشعة الشمسية في رفع درجة حرارة هذه السطوح تكون محدودة.

الجدول (٢–٣): انعكاسية بعض السطوح الطبيعية*.

السطح	الانعكاسية (٪)
التربة	١٠ – ٢٥
رمال الصحراء	٢٥ – ٤٠
مناطق عشبية	١٥ – ٢٥
الغابات	١٠ – ٢٠
ثلج نقي	٧٥ – ٩٥
ثلج رطب أو ملوث	٢٥ – ٧٥
البحار والمحيطات	< ١٠

*البيانات الواردة في الجدول ليست للحفظ.

ومن العوامل التي تؤثّر في مقدار الطاقة التي تمتصها مساحة معيّنة من الأرض؛ مساحة السطح وزمن التدفّق، حيث تزداد الطاقة الممتصة بزيادتهما؛ لذا، يكون مقدار الطاقة الشمسية الممتصة في فصل الصيف أكثر منها في فصل الشتاء بسبب طول ساعات النهار، بالإضافة إلى اختلاف زاوية سقوط الأشعة الشمسية.

ويمكن حساب مقدار الطاقة التي تمتصها مساحة معيّنة من الأرض؛ باستخدام العلاقة الرياضية الآتية:

الطاقة الممتصة = التدفّق الممتص × المساحة × الزمن

حيث تُقاس كمية الطاقة الشمسية الممتصة من سطح ما بوحدة (الجول)، ويُقاس التدفّق الممتص بوحدة (واط/ م^{٢})، وتُقاس مساحة المنطقة التي تسقط عليها الطاقة الشمسية وتمتصها بوحدة (م^{٢})، ويُقاس زمن التدفّق بوحدة (ث).

مثال (١)

إذا شتّت الغلاف الجوي (٣٠٪) من الطاقة الشمسية الساقطة عليه، احسب كمية الطاقة التي تمتصها قطعة أرض صحراوية مساحتها (٣) دونمات في يوم واحد، (علمًا بأن متوسط انعكاسية الصحراء (٤٠٪) والثابت الشمسي (١٣٧٢) واط/ م^{٢}، والدونم الواحد يساوي (١٠٠٠) م^{٢}).

الحل:

١- المطلوب في السؤال هو حساب كمية الطاقة الممتصة في يوم كامل؛ لذا، تكون زاوية سقوط الأشعة الشمسية متغيّرة، ويمكن حساب متوسط التدفّق بقسمة الثابت الشمسي على (٤)، فتكون قيمته ٣٤٣ واط/ م^{٢}.

٢- تدفّق الأشعة الساقطة على الصحراء = ٣٤٣ × ٧٠٪ = ٢٤٠,١ واط/ م^{٢}.

٣- تدفّق الأشعة الممتصة من الصحراء = ٢٤٠,١ × ٦٠٪ = ١٤٤,٠٦ واط/ م^{٢}.

٤- كمية الطاقة الممتصة = التدفّق الممتص × المساحة × الزمن

= ١٤٤,٠٦ × (٣ × ١٠^{٣}) × (٢٤ × ٦٠ × ٦٠)

= ٣,٧ × ١٠^{١٠} جول.

مثال (٢)

إذا تسبّب الغلاف الجوي في تشتيت (٣٠٪) من الطاقة الشمسية الساقطة عليه وكان الثابت الشمسي (١٣٧٢) واط/ م^{٢}. احسب:

١- تدفّق الأشعة الساقطة على السطح الخارجي للغلاف الجوي من الساعة (١٢) ظهرًا ولغاية الساعة (٦) مساءً، علمًا بأن معدّل تغيّر زاوية السقوط ١٥°/ ساعة.

٢- كمية الطاقة التي تمتصها بحيرة مساحتها (١٠) كم^{٢} خلال (٥) دقائق، علمًا بأن زاوية السقوط ٦٠°، ومتوسط انعكاسية الماء (١٠٪).

الحل:

١- تدفّق الأشعة الساقطة على السطح الخارجي للغلاف الجوي الساعة (١٢) ظهرًا $= \Phi^{*} \times$ جتاهـ

$= ١٣٧٢ \times ١ = ١٣٧٢$ واط/ م^{٢}.

- تدفّق الأشعة الساقطة على السطح الخارجي $= \Phi^{*} \times$ جتاهـ

للغلاف الجوي الساعة (٦) مساءً

$= ١٣٧٢ \times$ صفر $=$ صفر واط/ م^{٢}.

- ولحساب تدفّق الأشعة الساقطة على السطح الخارجي للغلاف الجوي من الساعة (١٢) ظهرًا ولغاية الساعة (٦) مساءً، نأخذ المتوسط الحسابي للقيمتين السابقتين كالآتي:

$$\frac{١٣٧٢ + \text{صفر}}{٢} = ٦٨٦ \text{ واط/ م}^{٢}.$$

٢- $\Phi = \Phi^{*} \times$ جتا هـ

$= ١٣٧٢ \times ٠,٥ = ٦٨٦$ واط/ م^{٢}.

- تدفّق الأشعة الساقطة على سطح الأرض $= ٦٨٦ \times ٧٠٪ = ٤٨٠,٢$ واط/ م^{٢}.

- تدفّق الأشعة الممتصة $= ٤٨٠,٢ \times ٩٠٪ = ٤٣٢,١٨$ واط/ م^{٢}.

- كمية الطاقة الممتصة = التدفّق الممتص × المساحة × الزمن

$= ٤٣٢,١٨ \times (١٠ \times ١٠^{٦}) \times (٥ \times ٦٠)$

$\cong ١٢,٩٧ \times ١٠^{١١}$ جول.

اختبر معلوماتك

قطعة أرض مساحتها (٢٠٠) م٢، سقطت عليها أشعة الشمس بزاوية سقوط ٦٠°، إذا علمت أن الغلاف الجوي تسبّب في تشتيت وامتصاص (٢٥٪) من الأشعة المارّة فيه. وأن الثابت الشمسي (١٣٧٢) واط/ م٢، ومتوسط انعكاسية السطح (١٥٪)، وجتا ٦٠° = ٠,٥ .

احسب ما يأتي:

أ – تدفّق الأشعة الشمسية المفقودة في الغلاف الجوي بفعل التشتّت والامتصاص.

ب– تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على سطح قطعة الأرض.

جـ– كمية الطاقة التي تمتصها قطعة الأرض خلال دقيقة.

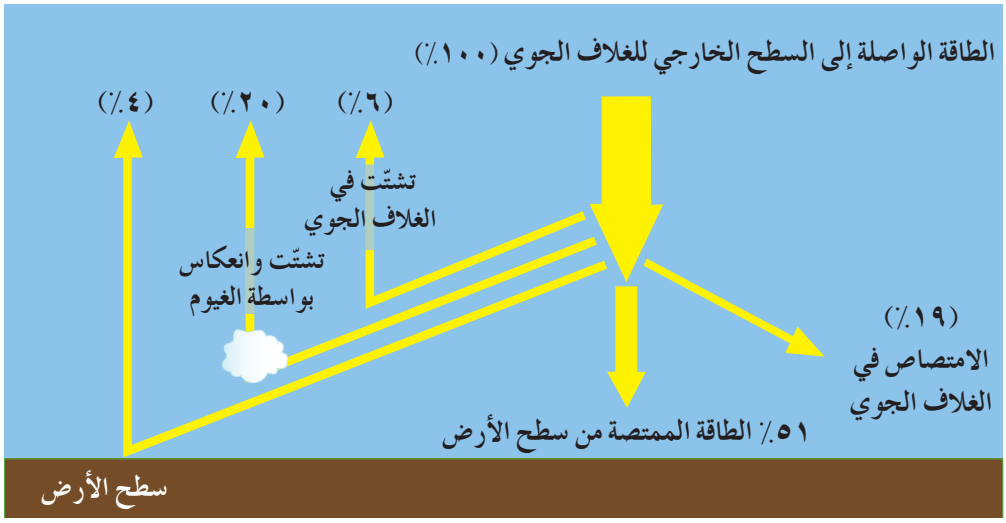
ثانيًا: الاتزان الحراري على سطح الأرض

يُقصد **بالاتزان الحراري** (Energy Balance) لسطح الأرض، أن تبقى درجة حرارة سطح الأرض وغلافها الجوي في الحدود الطبيعية التي هي عليها منذ أزمنة بعيدة وحتى الآن. ومن المعروف علميًّا أن درجة حرارة سطح الأرض لم تخرج عن حدودها الطبيعية منذ أكثر من ٥٤٢ مليون سنة، أي منذ بداية العصر الكامبري (ستدرسه لاحقًا).

وللحفاظ على حالة الاتزان الحراري على سطح الأرض، فلا بد من المحافظة على مكوّنات الغلاف الجوي من دون تغيير كبير في نِسَبها. فالغلاف الجوي هو المسؤول الأول عن تغيّر الاتزان الحراري. والتغيّر في الاتزان الحراري للأرض قد يحدث طبيعيًّا، ومثال ذلك، ما مرّت به الأرض من تبريد وتسخين في العصور الجليدية وبين الجليدية، التي تعاقبت على مناخ الأرض آخر مليونَي عام من عمر الأرض. وقد يختلّ الاتزان الحراري نتيجة لتغيّر تركيز غازات الدفيئة في الجو بسبب عوامل طبيعية مثل البراكين والحرائق أو بسبب عمليات الاحتراق التي يقوم بها البشر. ومن أمثلة ذلك مشكلة الاحترار العالمي الحاليّة الناجمة عن زيادة تركيز غازات الدفيئة ومنها ثاني أكسيد الكربون الذي ارتفع من ٢٨٠ جزء من المليون عام ١٨٥٠م، إلى ما يُقارب ٤٠٠ جزء من المليون عام ٢٠١٦م بسبب المبالغة في حرق الوقود الأحفوري.

ويُلخّص الشكل (٢–١٤)، العمليات التي تُنقل بها الطاقة الشمسية إلى سطح الأرض، إذ تشعّ الشمس يوميًّا، ومنذ ملايين السنين، مقدارًا هائلًا من الطاقة نحو سطح الأرض، ولو لم

يتخلّص سطح الأرض من تلك الطاقة؛ لارتفعت درجة الحرارة إلى درجة يستحيل معها الحياة عليه. فكيف يتخلّص سطح الأرض من الطاقة الإشعاعية الزائدة؟



الشكل (٢–١٤): ميزانية الطاقة الشمسية التي ترسلها الشمس إلى سطح الأرض وامتصاصها (الأرقام التي تظهر في الشكل ليست للحفظ).

وتُسهم الطرائق الآتية في تخليص سطح الأرض من الطاقة الإشعاعية الزائدة:

١– **التوصيل** (Conduction): تنتقل الطاقة الحرارية من سطح الأرض إلى الهواء الملامس عن طريق التوصيل، وتُعدّ هذه الطريقة بطيئة نسبيًّا في نقل الطاقة.

٢– **الحمل** (Convection): يمتص الهواء الملامس لسطح الأرض الطاقة من السطح فيسخن، وتقلّ كثافته، ويرتفع إلى الأعلى ويحلّ محلّه هواء بارد، وباستمرار هذه العملية تخسر الأرض كمية كبيرة من الطاقة الحرارية تفوق مئة ألف ضعف ما تخسره بطريقة التوصيل.

٣– **الإشعاع الأرضي** (Terrestrial Radiation): يسخن سطح الأرض نتيجة امتصاصه الأشعة الشمسية الساقطة عليه، فيشعّ طاقته على شكل أمواج طويلة (الأشعة تحت الحمراء) إلى الفضاء الخارجي ما يُسهم في تخليص الأرض من معظم الطاقة التي تصلها من الشمس.

٤– **التبخر** (Evaporation): تعلّمت سابقًا كيف تُسهم الحرارة الكامنة في نقل كميات كبيرة من الطاقة الحرارية إلى طبقات الجو العليا، فيمتص الماء الموجود على سطح الأرض جزءًا كبيرًا من الطاقة الساقطة عليه كي يتحوّل إلى بخار ماء، ويختزنها على صورة طاقة كامنة يفقدها في الغلاف الجوي عندما يتكاثف عائدًا إلى حالته السائلة. وتُسهم البحار والمحيطات بالقدر الأكبر في هذه العملية؛ نظرًا لاتساع مساحتها، وانخفاض انعكاسيتها مقارنة باليابسة.

١- سطحان متجاوران ومستويان وانعكاستيهما واحدة، أحدهما مساحته (١)كم^{٢} والآخر مساحته (٢)كم^{٢} معرّضان للإشعاع الشمسي نفسه، أيُّ السطحين يكون مقدار تدفّق الإشعاع الشمسي الممتص فيه أكبر؟ فسّر إجابتك.

٢- يُمثّل الجدول (٢-٤) ثلاثة سطوح (س، ص، ع) مختلفة في مساحتها وانعكاسيتها، تعرّضت جميعها لزاوية سقوط الأشعة الشمسية نفسها، ادرس البيانات الموضّحة في الجدول جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

الجدول (٢-٤): السؤال (٢).

السطح	المساحة (م^{٢})	الانعكاسية (٪)
س	٢٠٠	٢٥
ص	١٠٠	١٥
ع	٣٠٠	٧٥

أ - ما رمز السطح الذي له أكثر امتصاصية؟

ب- هل يتغيّر تدفّق الأشعة الشمسية الساقطة على السطوح (س، ص، ع)؟ لماذا؟

جـ- احسب كمية الطاقة الشمسية الممتصة للسطح (ص)، علمًا بأن زاوية سقوط الأشعة الشمسية (٦٠°) وأن الثابت الشمسي للأرض يساوي (١٣٧٢) واط/م^{٢}، وأن الغلاف الجوي يشتّت (٣٠ ٪) من قيمة الطاقة الشمسية الساقطة عليه، خلال زمن مقداره (١٠) دقائق.

٣- سقطت أشعة الشمس وبزاوية مقدارها (٦٠°) ولمدّة (١٠) ثوانٍ على سطح ما، مساحته تساوي (٢) م^{٢}، إذا شتّت الغلاف الجوي (٢٠٪) من قيمة الطاقة الشمسية الساقطة عليه، وكانت انعكاسية السطح (٢٥٪)، علمًا بأن الثابت الشمسي للأرض يساوي (١٣٧٢) واط/م^{٢}، احسب:

أ - تدفّق الأشعة الساقطة على السطح.

ب- كمية الطاقة الممتصة من السطح.

٤- ثلاثة سطوح متجاورة، إذا كانت مساحة الأول (٥٠٠) م^{٢} والثاني (٧٥٠) م^{٢} والثالث (٣٥٠) م^{٢} وكانت انعكاسيتها (١٠٪)، (٩٠٪)، (٢٥٪) على الترتيب، رتّب السطوح الثلاثة تنازليًا حسب كمية الطاقة الممتصة لكل منها، إذا تعرّضت السطوح جميعها للإشعاع نفسه وللمدّة الزمنية نفسها.

٥- فسّر ما يأتي تفسيرًا علميًا دقيقًا:

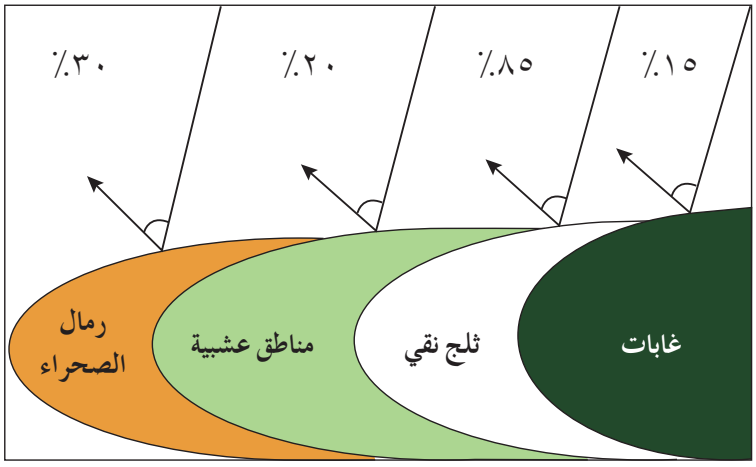
أ - يكون التدفّق الإشعاعي الساقط على سطح الأرض صيفًا، أكبر منه شتاءً.

ب- تُعدّ طريقة التبخّر من أهم الطرائق التي تُسهم في تخليص سطح الأرض من القدر الأكبر من الطاقة الإشعاعية الزائدة.

٦- أ - وضّح كيف يضطرب الاتزان الحراري بفعل تأثير العوامل الطبيعية.

ب- إذا علمت أن انعكاسية الثلج النقي تساوي (٩٠٪) وانعكاسية الثلج الملوّث تساوي (٦٠٪)، فأيهما يمكن أن ينصهر أسرع إذا تعرّضا معًا لأشعة الشمس؟ لماذا؟

٧- يوضّح الشكل (٢-١٥) انعكاسية بعض السطوح الطبيعية للأشعة الشمسية في مناطق مختلفة. ادرسه ثمّ أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٢-١٥): السؤال (٧).

أ - ما المقصود بالانعكاسية؟

ب- رتّب السطوح في الشكل تنازليًا حسب امتصاصيتها للأشعة الشمسية.

جـ- احسب كمية الطاقة التي تمتصها أرض صحراوية مساحتها (١٠٠٠) م^{٢} خلال زمن مقداره (١٠) دقائق.

(علمًا بأن الثابت الشمسي للأرض يساوي (١٣٧٢) واط/م^{٢}، الغلاف الجوي يشتّت (٢٠٪) من قيمة الطاقة الشمسية الساقطة عليه، جتا زاوية سقوط الأشعة = ٠,٥).

٣

الوَحْدة الثالثة

تاريخ الأرض

(Earth History)

النتاجات

يُتوقّع منك في نهاية هذه الوَحْدة، أن تكون قادرًا على أن:

- تتعرّف مفهوم كل من: الأحفورة، والتحفُّر، والجيولوجيا التاريخية، والطبقة، وعلم الطبقات، وسطوح التوافق وعدم التوافق، والتعاقب الطبقي والنشاط الإشعاعي، وعمر النصف.
- تتعرّف أهمية وجود الأحافير في الصخور الرسوبية.
- تصف طرائق التحفُّر المختلفة.
- تستنتج أسس بناء سلّم الزمن الجيولوجي.
- تُميّز الطبقات الصخرية وَفْق خصائصها الفيزيائية والكيميائية.
- تتعرّف أنواع سطوح عدم التوافق، وآلية تكوّنها.
- توظّف مبادئ التأريخ النسبي والمطلق، في ترتيب الأحداث الجيولوجية.
- تتعرّف أهم شروط استخدام الاضمحلال الإشعاعي، في حساب الأعمار المطلقة للمعادن والصخور.
- تتعرّف مفهوم المضاهاة وأنواعها، وأهمّيّتها في استنتاج أعمار الصخور في منطقة ما.
- تتعرّف أهم التطوّرات الجيولوجية والحيوية المميّزة لكل حقب جيولوجي.
- تستشعر عظمة الخالق عن طريق دراستك تاريخ الأرض.

قال الله تعالى:

﴿ قُلْ سِيرُوا فِي الْأَرْضِ فَانظُرُوا كَيْفَ بَدَأَ الْخَلْقَ ثُمَّ اللَّهُ يُنشِئُ النَّشْأَةَ الْآخِرَةَ إِنَّ اللَّهَ عَلَىٰ كُلِّ شَيْءٍ قَدِيرٌ ﴾

(سورة العنكبوت، الآية ٢٠).

تُسهم صخور القشرة الأرضية وأحافيرها في معرفة الأحداث الجيولوجية التي مرّت بها الأرض، وأشكال الحياة المختلفة التي عاشت على سطحها في أثناء الزمن الجيولوجي، ما يعطي معلومات عن تاريخها:

- فكيف تمكّن العلماء من معرفة التغيّرات التي حدثت في أثناء تاريخ الأرض؟
- وكيف استطاع العلماء معرفة أعمار الصخور وترتيبها زمنيًّا؟

الفصل الأول

الأحافير والجيولوجيا التاريخية
(Fossils and Historical Geology)

تُقدّم الأحافير معلومات وافرة ومفصّلة عن تاريخ الأرض. فهي تُعدّ شواهد ملموسة نستطيع من دراستها التعرّف إلى التغيّرات التي طرأت على أشكال الحياة عبر تاريخ الأرض، وإلى البيئات التي كانت سائدة في أثناء ذلك. فما المقصود بالأحافير؟ وما عملية التحفُّر؟ وما الشروط الرئيسة لحدوث عملية التحفُّر؟ وما طرائق تكوّنها؟ ولماذا تُعدّ الأحافير أساسًا في معرفة تاريخ الأرض؟ يمكنك الإجابة عن هذه الأسئلة بعد دراستك هذا الفصل.

أولًا: مفهوما الأحافير وعلم الأحافير

تُعرف **الأحافير** أو **المستحاثّات** (Fossils) بأنها بقايا وآثار لكائنات حية نباتية أو حيوانية مجهرية أو مرئية، عاشت في بيئات رسوبية قديمة، وبعد موتها حُفظت في الصخور الرسوبية. ويُعرف العلم الذي يهتم بدراسة أشكال الحياة القديمة التي تتابعت على سطح الأرض عبر العصور الجيولوجية المختلفة **بعلم الأحافير** (Paleontology).

ثانيًا: شروط التحفُّر

تمكّن العلماء من معرفة الكثير من أنواع الأحافير، وهي تُمثِّل جزءًا بسيطًا من أنواع الحياة التي كانت سائدة في الماضي. ولكن، لماذا لم تُحفظ الكائنات الحية القديمة جميعها على شكل أحافير؟ لمعرفة السبب؛ نفّذ النشاط (٣–١).

٣-١ نشاط تحليلي: الهيكل الصُّلب وحفظ الكائن الحي على شكل أحفورة

تأمّل الشكل (٣-١)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

(أ) قنديل البحر.

(ب) الحلزون.

الشكل (٣-١): يظهر قنديل البحر، وهو كائن حي لا يحتوي على هيكل صُلب في الصورة (أ). ويظهر الحلزون، وهو كائن حي يحتوي على هيكل صُلب في الصورة (ب).

١- أيُّ الكائنين في الشكل، تتوقّع أن يُحفظ في الصخور الرسوبية على شكل أحفورة؟

٢- ما العلاقة بين وجود هيكل صُلب للكائن الحي، وعملية حفظه على شكل أحفورة؟

٣- هل يُعدّ الهيكل الصُّلب للكائن الحي الشرط الوحيد لعملية حفظه على شكل أحفورة؟ فسّر إجابتك.

يظهر في الشكل (٣-١) نوعان من الكائنات الحية: قنديل البحر الذي يتكوّن من مادة رخوة فقط، والحلزون الذي يتكوّن من مادة رخوة وهيكل صُلب (قوقعة صُلبة)، يعيش الكائن الحي في داخلها. والكائنات الحية لا تخرج عن هذين النوعين من حيث امتلاكها هيكلًا صُلبًا. وعند موت الكائن الحي، تتحلّل المادة الرخوة أو أجزاء منها بسرعة بسبب عوامل التحلّل الموجودة في بيئته كالأكسجين والبكتيريا والفطريات. فإن كان من النوع الأول، فإنه يتحلّل بالكامل ولا يبقى جزء منه يمكن حفظه على شكل أحفورة. أما الكائن الحي الذي يمتلك جزءًا صُلبًا، فلديه فرصة وافرة في الحفظ على شكل أحفورة؛ لأن تحلّله يستغرق وقتًا أطول، ما يتيح المجال لطمره وعزله عن عوامل التحلّل. ومن الأمثلة على الأجزاء الصُّلبة المفيدة في تكوُّن الأحافير؛ أصداف الرخويات، وعظام الفقاريات، ومادة السليلوز في النبات، ومادة الكيتين في الحشرات.

ويُعدّ الدفن السريع للكائنات الحية بعد موتها، شرطًا أساسيًّا في عملية حفظها في الصخور؛ فهو يقلّل من فرصة تعرّضها لعوامل التحلّل. وتُعدّ البيئات البحرية الضحلة من أهم البيئات الرسوبية التي تُحفظ فيها الأحافير، حيث تزدهر فيها الكائنات الحية ويرتفع فيها معدّل الترسيب، وتكون عوامل التحلّل فيها بطيئة، إذا قورنت ببيئات الترسيب على اليابسة.

لماذا تُعدّ أحافير البيئات البحرية، أكثر شيوعًا وانتشارًا من أحافير البيئات القارّيّة؟

ثالثًا: طرائق التحفُّر

تُحفظ الكائنات الحية في الصخور الرسوبية بطرائق مختلفة. وتُسمّى عملية حفظ الكائنات الحية الحيوانية أو النباتية أو بقاياها أو آثارها على شكل أحفورة **عملية التحفُّر** (Fossilization). فكيف يتحوّل الكائن الحي، أو أجزاء منه، إلى أحفورة؟ وما طرائق التحفُّر المختلفة؟

١- حفظ الكائن الحي كُلّه أو بعضِه

يمكن أن يتم حفظ الكائن الحي كُلّه أو بعض أجزائه من دون تغيير في مكوّناته. فكيف تحدث عملية الحفظ بهذه الطريقة؟ ولماذا تُعدّ هذه الطريقة نادرة الحدوث في التاريخ الجيولوجي؟ لمعرفة ذلك، نفّذ النشاط (٣-٢).

٣-٢ نشاط تحليلي: حفظ الكائن الحي كُلّه أو بعضِه

تأمّل الشكل (٣-٢)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

(أ) حشرة محفوظة في الكهرمان.

(ب) أسنان محفوظة لسمكة قرش.

الشكل (٣-٢): طريقتا الحفظ الكامل وحفظ الأجزاء الصُّلبة الأصلية للكائن الحي.

١– في أيِّ الحالتين؛ (أ) أم (ب) حُفظَ الكائن الحي بأجزائه كاملة؟

٢– في أيِّ الحالتين؛ (أ) أم (ب) يمكن أن يكون معدّل الدفن فيها أسرع؟

٣– هل يحدث تغيّر في المكوّنات المعدِنية والكيميائية في كلتا الحالتين؟

٤– هل يُشترط أن يحتوي الكائن الحي الذي يُحفظ بالطريقة (أ) على هيكل صُلب؟

٥– ما الشروط اللازم توافرها لحفظ بقايا الكائن الحي كما في الشكل (ب)؟

٦– ما الفرق بين حفظ الكائن الحي بالطريقة (أ) وحفظه بالطريقة (ب)؟

يتم الحفظ الكامل للكائن الحي، عندما يُدفن بعد موته مباشرة أو في أثناء حياته في وسط يحول بينه وبين عوامل التحلّل، وتُعدّ الانهيارات الثلجية والبرك النفطية والكهرمان – الذي هو صمغ الأشجار – من أهم البيئات التي يحدث فيها الحفظ بهذه الطريقة. ومن الأمثلة على ذلك، حفظ الماموث في ثلوج سيبيريا، وحفظ النمور السيفية في البرك النفطية، وحفظ الحشرات في الكهرمان.

أما إن تأخر دفن الكائن الحي بعد موته مدّة من الزمن، فيؤدي ذلك إلى تحلّل المادة العضوية الرخوة مع بقاء الهيكل الصُّلب. وإذا احتوى الهيكل الصُّلب للكائن الحي على معادن أكثر استقرارًا وأقل ذائبية في المحاليل المائية (وهي محاليل غنيّة بأيونات المعادن مثل السليكا وكربونات الكالسيوم) فلا تتمكّن تلك المحاليل من إذابة الهيكل الصُّلب أو استبداله، فيُحفظ الهيكل الصُّلب بمكوّناته الأصلية دونما تغيير. ومثال ذلك: حفظ العظام وأسنان الفقاريات، كتلك الموجودة في صخور الفوسفات الأردني.

٢– تصخُّر الأجزاء الصُّلبة الأصلية للكائنات الحية

يُعدّ تصخُّر الأجزاء الصُّلبة الأصلية للكائنات الحية، طريقة شائعة الحدوث عبر التاريخ الجيولوجي، حيث وُجِد الكثير من الأحافير التي حُفظت بهذه الطريقة. ويمكن أن يحدث هذا النوع من التحفُّر بأكثر من طريقة ومنها طريقة **الاستبدال** (Replacement). ولكن كيف تحدث عملية الاستبدال؟

بعد موت الكائن الحي ودفنه في الرسوبيات، قد يتعرّض هيكله الصُّلب للمحاليل المائية المُشبعة، فتعمل على إذابة أجزائه تدريجيًّا وتحُل أيونات المعادن الذائبة التي تحملها المحاليل المائية المُشبعة محلّ المادة الأصلية المكوّنة للهيكل الصُّلب؛ التي قد تكون مادة معدِنية أو عضوية. وتجري عملية الاستبدال ببطءٍ وانتظام حجمًا بحجم، فلا يحدث تغيُّر في شكل الهيكل الخارجي الصُّلب للكائن الحي أو حجمه. ويُشترط لحدوث عملية الإحلال هذه، أن يكون المعدِن الأصلي الذي يشكّل الهيكل الصُّلب للكائن الحي أقل استقرارًا وأكثر ذائبية من المعادن التي تحملها المحاليل المائية (المعادن الجديدة التي حلّت محلّه). ومن الأمثلة على هذا النوع من التحفُّر، إحلال السليكا (SiO_2) محلّ معدِن الأراغونيت، وهو الشكل الأقل استقرارًا لكربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) في أحفورة الأمونيت، أو إحلال السليكا محلّ مادة السليلوز العضوية في الخشب الذي يُعرف **بتصخُّر الخشب** (Petrification)، أو إحلال السليكا محل مادة الكيتين في الحشرات، انظر الشكل (٣–٣).

(أ) أحفورة أمونيت حيث حلّت فيها السليكا محلّ معدِن الأراغونيت.

(ب) أحفورة خشب متصخّرة من السليكا.

الشكل (٣–٣): أحافير تشكّلت بفعل عملية الاستبدال.

٣- الآثار الأحفورية

ما الآثار الأحفورية؟ وما أهميتها في الاستدلال على الكائنات الحية القديمة؟ لمعرفة ذلك، نفّذ النشاط (٣-٣).

٣-٣ نشاط تحليلي: الآثار الأحفورية

تأمّل الشكل (٣-٤)، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.

(أ) حُفَر عمودية للديدان في الصخر الرملي جنوب غرب الأردن.

(ب) آثار قدم ديناصور حُفِظت في الصخور الرسوبية.

الشكل (٣-٤): صور لآثار كائنات حية حُفظت في الصخور الرسوبية.

١- هل توجد بقايا صُلبة للكائن الحي في الشكلين؛ (أ) و (ب)؟

٢- هل يمكن الاستدلال على حجم الكائن الحي بالاستعانة بطَبْعات الأيدي والأقدام المحفوظة له في الصخور الرسوبية؟ وما أهمية ذلك؟

تُعدّ **الآثار الأحفورية** (Trace Fossils) طريقة التحفُّر الوحيدة التي لا وجود لبقايا أصداف أو عظام أو هياكل صُلبة للكائنات الحية فيها، وإنما مجرّد آثار لذلك الكائن الحي. ومن هذه الآثار: الممرّات، والجحور التي تتركها بعض أنواع الكائنات الحية من الرخويات والديدان، وآثار سير الحيوان مثل طَبْعات الأيدي والأقدام وأماكن عيشها والفضلات العضوية، التي تُعطي فكرة عن طبيعة غذاء الكائن الحي. وللآثار الأحفورية أهمية في معرفة حجم الكائنات الحية القديمة، والأنشطة التي قامت بها، وطريقة معيشتها وغذائها.

٤- القالب والنموذج

لمعرفة آلية حفظ الكائن الحي بهذه الطريقة؛ انظر الشكل (٣-٥)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

الشكل (٣-٥): القالب والنموذج لأحفورة الترايلوبيت.

- ما المراحل التي تتوقّع أن يتشكّل كل من القالب والنموذج خلالها؟
- هل توجد علاقة بين القالب والنموذج؟
- ما الفرق بين القالب والنموذج؟

بعد موت الكائن الحي ودفنه في الرسوبيات، تتحلّل المادة الرخوة في بادئ الأمر، ثمّ تعمل المياه المتخلّلة للصخور على إذابة الهيكل الصُّلب، فتتكوّن طبعة داخل الرسوبيات أو الصخر تعكس الشكل الخارجي للهيكل الصُّلب؛ **فالقالب** (Mold) هو الطبعة الخارجية للهيكل الصُّلب داخل الصخر التي تعكس الشكل الخارجي لهيكل الكائن الحي. ولو امتلأت أحفورة القالب بالرسوبيات أو المعادن الذائبة في المحاليل المائية، فإنها تأخذ شكل الهيكل الخارجي الأصلي، وعندما تتصلّب هذه الرسوبيات؛ فإنها تنفصل عن القالب مكوّنة أحفورة جديدة تُسمّى **نموذجًا** (Cast)، انظر الشكل (٣-٥).

٥- التفحّم

تُعدّ طريقة **التفحّم** (Carbonization) شائعة الحدوث في النبات، إلا أنها نادرة الحدوث في الحشرات والديدان. يحدث التفحّم عندما تتحلّل المادة العضوية لبقايا النباتات ببطء بعد دفنها في رسوبيات طينية أو جيرية، أو أي رسوبيات ناعمة الحبيبات قادرة على تكوين بيئة مختزلة تمنع وصول الأكسجين للنبات. وبمرور الزمن وتعرّضها للضغط والحرارة، فإنها تفقد بعضًا من مكوّناتها؛ كالنيتروجين والأكسجين والهيدروجين تدريجيًّا، فلا يبقى إلا طبقة رقيقة لونها أسود تتكوّن من الكربون، وهي صورة طبق الأصل للورقة الأصلية أو الكائن الحي الأصلي، انظر الشكل (٣-٦).

(أ) ورقة شجرة متفحّمة.

(ب) حشرة تعرّضت للتفحّم.

الشكل (٣-٦): تفحّم بعض أنواع الكائنات الحية.

يُعدّ الدفن في الرواسب الطينية أكثر ملاءمة لعملية التفحّم منه في الرواسب الرملية، فسّر ذلك.

فوائد الأحافير

للأحافير أهمية كبيرة في تعرّف أنواع الكائنات الحية القديمة وأشكالها وتغيّرها عبر الزمن الجيولوجي، عن طريق وجودها ضمن الصخور الرسوبية. بالإضافة إلى أهميتها في تحديد الأعمار النسبية للصخور الرسوبية والمساعدة في ترتيبها زمنيًّا من الأقدم إلى الأحدث. كما تُفيد الأحافير في معرفة البيئات الرسوبية القديمة التي عاشت فيها كائنات الأحافير، بالإضافة إلى تعرّف طبيعة المُناخ في العصور الجيولوجية الماضية.

رابعًا: الجيولوجيا التاريخية

تُعرف **الجيولوجيا التاريخية** (Historical Geology) بأنها العلم الذي يهتم بدراسة تاريخ الأرض، وتفسير الأحداث الجيولوجية التي حدثت في الماضي، وأسهمت في تشكيل سطح الأرض ومعالمه، والتغيّرات التي حدثت عليه، وترتيبها زمنيًّا. ويستمدّ علم الجيولوجيا التاريخية بياناته من المحتوى الأحفوري والأعمار النسبية والمطلقة للصخور، والتراكيب الداخلية المحفوظة في الصخور الرسوبية، والتراكيب الجيولوجية، والقواطع النارية.

وقد أُسّس علم الجيولوجيا التاريخية على مجموعة من المبادئ والنظريات لفهم الأحداث الجيولوجية وترتيبها زمنيًّا، وهي: مبادئ التأريخ النسبي والمطلق، والمضاهاة الأحفورية والصخرية (التي ستدرسها في الفصل اللاحق)، فضلًا عن مبدأ النسقية.

وضع العالم الأسكتلندي جيمس هاتون (James Hutton) **مبدأ النسقية** (Principle of Uniformitarianism) الذي ينص على أنّ "**القوانين الفيزيائية والكيميائية والحيوية التي تحكم وجود الأشياء والظواهر ثابتة لا تتغيّر**". أي أن العمليات التي شكّلت المظاهر الجيولوجية في الماضي تمّت بالآلية نفسها التي تشكّلت بها مثيلاتها في الوقت الحاضر، الأمر الذي يساعدنا على فهم ما حدث في الماضي قياسًا على ما يحدث في الحاضر؛ أي أن الحاضر مفتاح الماضي. ويُعدّ مبدأ النسقية حجر الأساس في بناء علم الجيولوجيا التاريخية.

ولمعرفة كيف استفاد العلماء من مبدأ النسقية؛ انظر الشكل (٣–٧)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

(أ) علامات نيم قديمة محفوظة في الصخور الطينية، تكوّنت قديمًا.

(ب) علامات نيم حديثة محفوظة في الصخور الطينية، تكوّنت في الوقت الحاضر.

الشكل (٣–٧): علامات نيم تكوّنت بفعل التيارات المائية في فترات زمنية مختلفة للمنطقة نفسها.

١– هل تتشابه علامات النيم في الشكلين؛ (أ) و (ب)؟ لماذا؟

٢– ما العامل المسؤول عن تشكّل علامات النيم في الشكلين؛ (أ) و (ب)؟

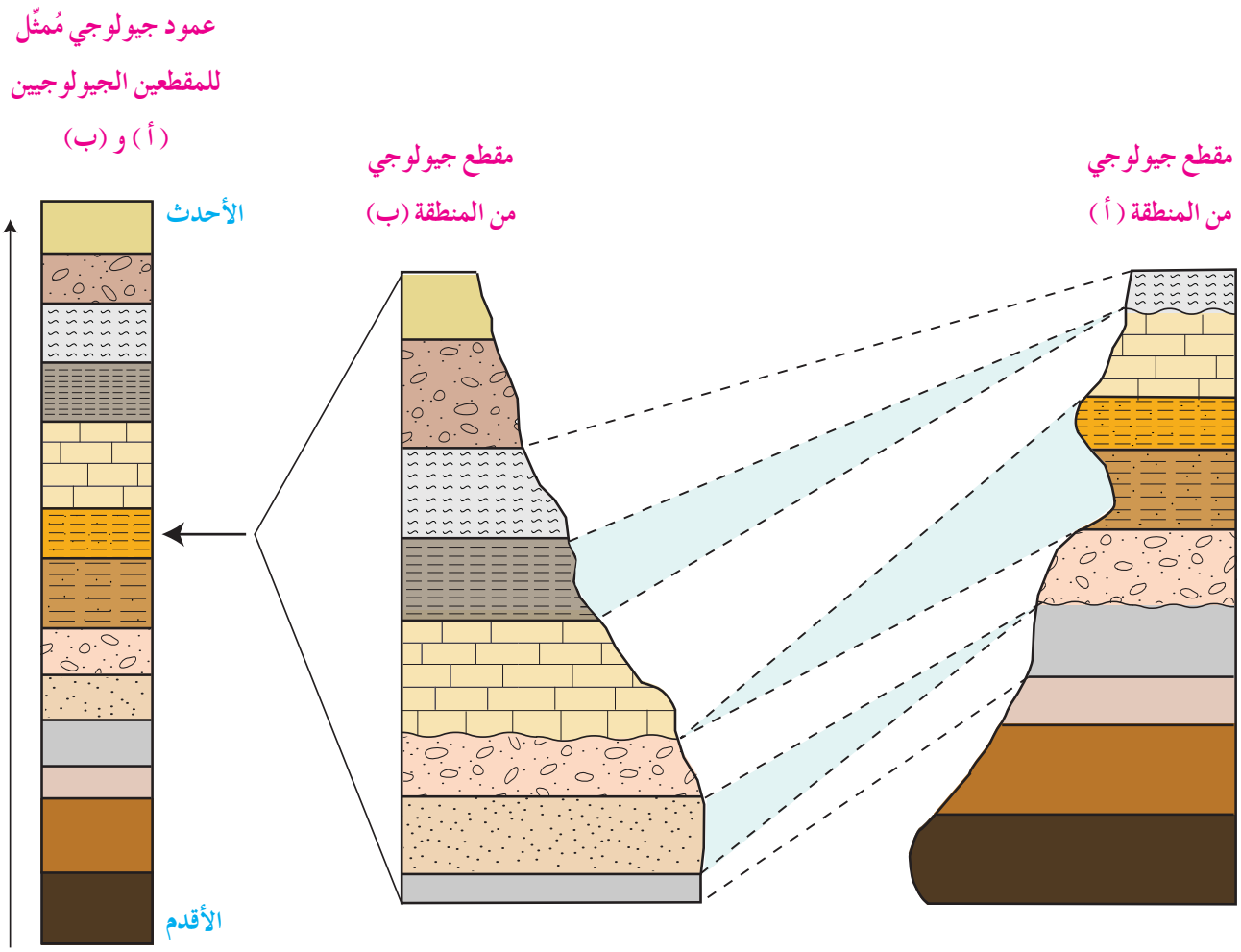
٣– كيف يمكن تفسير آلية حدوث علامات النيم التي تظهر في الشكلين؛ (أ) و (ب)؟ وما المبدأ الذي ارتكزت عليه؟

وَفْق مبدأ النسقية، فإن علامات النيم الموضّحة في الشكل (٣–٧/ أ) التي تشكّلت منذ ملايين السنين، تكوّنت بالطريقة نفسها التي تتكوّن بها في الوقت الحاضر (انظر الشكل ٣–٧/ب)، وهذا يعني أن معالم سطح الأرض تغيّرت وما زالت تتغيّر، ولكن القوانين التي تتحكّم في هذا التغيّر، والتي تسيّره قد بقيت كما هي، غير أن معدّلاتها قد تتفاوت. وقد استفاد العلماء من الجيولوجيا التاريخية في تقسيم تاريخ الأرض إلى فترات زمنية مختلفة، ومعرفة الأحداث الجيولوجية التي مرّت عبر تاريخها، فكيف تمّ ذلك؟

١– العمود الجيولوجي

أعدّ العلماء عمودًا جيولوجيًّا ممثِّلًا لمعظم صخور القشرة الأرضية، وذلك بمقارنة مجموعة من المقاطع العمودية في أماكن مختلفة من العالم ومطابقتها معًا؛ اعتمادًا على نوع الصخور ومحتواها الأحفوري ذات الأعمار المتشابهة.

ويوضّح الشكل (٣–٨)، مقطعين جيولوجيين لمنطقتين مختلفتين، حيث إن الطبقات الموجودة في الأسفل هي الأقدم والطبقات الموجودة في الأعلى هي الأحدث في كل مقطع جيولوجي. وقد تم توصيل خطوط بين سطوح الطبقات ذات الخصائص الفيزيائية المتشابهة من حيث المكوّنات المعدِنية واللون. وتوصيل السطح العلوي للطبقة مع السطح العلوي للطبقة المماثلة لها في المقطع الآخر، والسطح السفلي مع السطح السفلي بعملية تُسمّى المضاهاة، التي ستدرسها لاحقًا. ومن ثم، بُنِيَ عمود جيولوجي واحد ممثِّل لكلا المقطعين الجيولوجيين يحتوي على الطبقات الموجودة جميعها والضائعة في كلا المقطعين.



الشكل (٣–٨): كيفية بناء العمود الجيولوجي.

فما المقصود بالعمود الجيولوجي؟ وما أهميته في بناء سلّم الزمن الجيولوجي؟

يُعرف **العمود الجيولوجي** (Geologic Column) بأنه وصف التسلسل في الطبقات الصخرية المختلفة في منطقة ما، التي ترسّبت عبر ملايين السنوات مرتّبة من الأقدم إلى الأحدث؛ اعتمادًا على مبادئ التأريخ النسبي والمطلق التي ستدرسها لاحقًا. وبمعرفة أعمار الصخور في العمود الجيولوجي، استطاع العلماء تقسيمه إلى فترات زمنية سُمّيت سلّم الزمن الجيولوجي.

٢- سلّم الزمن الجيولوجي

يُعرف **سلّم الزمن الجيولوجي** (Geologic Time Scale) بأنه ترتيب زمني تصاعدي للوَحْدات الزمنية التي مرّت بها الأرض، يعرض الأحداث الجيولوجية التي تعاقبت في أثناء تاريخ الأرض الطويل، ويُقدّم وصفًا لتغيّر أنواع الكائنات الحية وأشكالها.

ولمعرفة التغيّرات التي حدثت في أثناء تاريخ الأرض، فإنه يلزمنا آلية لتحديد الزمن الذي تمّت فيه. هذا من ناحية؛ ومن ناحية أخرى لا بد أيضًا من وضع تقسيمات محدّدة للزمن. لذا، وضع الجيولوجيون وَحْدات زمنية للتعامل مع الفترات الزمنية المختلفة، كما في تقسيم الزمن إلى سنوات، وأشهر، وأيام، وساعات، ودقائق، وثوانٍ. فقُسّم عمر الأرض الذي يبلغ ٤,٦ مليار سنة (**١ مليار سنة = ١ بليون سنة = ١٠٠٠ مليون سنة**) إلى فترتين هما: **ما قبل الكامبري** (Precambrian)، و**دهر الحياة الظاهرة** (Phanerozoic).

وقُسّم دهر الحياة الظاهرة إلى ثلاثة **أحقاب** (Eras)، هي حقب الحياة القديمة، وحقب الحياة المتوسطة، وحقب الحياة الحديثة. ثمّ قُسِّم الحقب إلى عدد من **العصور** (Periods)؛ فقُسِّم حقب الحياة القديمة إلى ستة عصور، والمتوسطة إلى ثلاثة عصور، والحديثة إلى عصرين كما في الشكل (٣-٩). وقُسّم العصر إلى **أحيان** جمع حين (Epochs). والآن، ادرس الشكل (٣-٩)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

الدهر	الحقب	العصر	العمر (ملايين السنين)	أمثلة على التطوّر الجيولوجي والتغيّر الحيوي
عمر الأرض ٤,٦ مليار سنة	دهر الحياة الظاهرة (يُمثّل ١٢٪ من عمر الأرض)	حقب الحياة الحديثة	الآن	ـ ظهور الإنسان في العصر الرباعي. ـ سيادة الثدييات. ـ سيادة النباتات المغطاة البذور.
		الرباعي	٢,٦	ـ انفصال الصفيحة العربية عن الصفيحة الإفريقية وانفتاح البحر الأحمر. ـ تكوّن سلاسل جبال الألب والهيملايا وزاغروس وطوروس واستمرار ارتفاع جبال الأنديز.
		الثلاثي*	٦٥,٥	ـ انتشار الكائنات الحية التي تُشبِه الكائنات المنتشرة حاليًا.
		حقب الحياة المتوسطة		
		الكريتاسي	١٤٦	ـ انقراض الديناصورات والأمونيت. ـ ظهور الطيور الحديثة. ـ بداية ظهور النباتات الزهرية المغطاة البذور.
		الجوراسي	٢٠٠	ـ بداية ظهور الثدييات الصغيرة. ـ تغيّر أنواع الديناصورات وانتشارها. ـ ظهور الطيور الأولى.
		الترياسي	٢٥١	ـ انقسام قارة بنغايا إلى كتلتين قاريتين، هما: غوندوانا ولوراسيا. ـ بداية الحركة الأنديزية وتشكّل جبال الأنديز. ـ ظهور الديناصورات الأولى.
		حقب الحياة القديمة		
		البيرمي	٢٩٩	ـ تكوّن قارة بنغايا.
		الكربوني	٣٥٩	ـ حركة بناء الجبال الهرسينية، وتشكّل الجبال الهرسينية.
		الديفوني	٤١٦	ـ ظهور النباتات الوعائية اللازهرية (السرخسيات) المسؤولة عن تكوّن الفحم الحجري.
		السيلوري	٤٤٤	ـ ظهور الزواحف.
		الأوردوفيشي	٤٨٨	ـ ظهور البرمائيات. ـ ظهور الأسماك البدائية (الغضروفية)، مثل القرش.
		الكامبري	٥٤٢	ـ طفرة في ظهور الكائنات ذات الهيكل الصُّلب مثل الترايلوبيت وبداية ظهور النباتات.
	ما قبل الكامبري (يُمثّل ٨٨٪ من عمر الأرض)		٦٠٠ ٢٠٠٠ ٣٥٠٠ ٤٠٠٠	ـ انتشار أشكال من الكائنات العديدة الخلايا ليس لها هيكل صُلب. ـ أول ظهور للأكسجين الحر في الغلاف الجوي. ـ أول ظهور للكائنات الحية التي تُشبِه البكتيريا اللاهوائية. ـ انتشار أشكال بسيطة من الكائنات الحية الوحيدة الخلية مثل: البكتيريا والطحالب. ـ نشأة الأرض، وتكوّن غُلُف الأرض.

الشكل (٣–٩): سلّم الزمن الجيولوجي (المعلومات الواردة في الشكل جميعها ليست للحفظ).

* قُسّم العصر الثلاثي حديثًا إلى عصرين؛ هما: الباليوجين (يمتدّ من ٦٥,٥–٢٣ مليون سنة)، والنيوجين (يمتدّ من ٢٣–٢,٦ مليون سنة).

أ – إلى أي الأحقاب تتبع العصور الآتية: الثلاثي، والديفوني، والكريتاسي، والكامبري؟

ب– ما أكبر الوحدات الزمنية الرئيسة التي قُسّم سلّم الزمن الجيولوجي بناءً عليها؟

جـ– ما الأسس التي تتوقّع أن يكون قد اعتمدها العلماء في بناء سلّم الزمن الجيولوجي؟

جرى تقسيم سلّم الزمن الجيولوجي اعتمادًا على الأحداث الرئيسة والشاملة التي حدثت في تاريخ الأرض وأثّرت تأثيرًا شموليًّا في القشرة الأرضية، مثل ظهور أنواع معيّنة من الكائنات الحية، وانقراض أنواع أخرى. ووضِعت الأقسام الزمنية الكبيرة بناءً على تلك الأحداث والتغيّرات العظيمة؛ مثل الدهر، والأحقاب. أما الأحداث الجيولوجية الأقل شمولًا مثل؛ حركات بناء الجبال، وطغيان المحيط على القارات وانحساره، فقد أسّس عليها حدود الأقسام الزمنية الصغيرة مثل العصر، والحين.

٣– نبذة عن تاريخ الأرض

قُسّم سلّم الزمن الجيولوجي إلى جزأين، هما:

أ – ما قبل الكامبري.

ب– دهر الحياة الظاهرة.

وفي ما يأتي أهم ما يميّز كل منها:

أ – ما قبل الكامبري؛ وهي أطول الوَحْدات الزمنية؛ إذ تشكّل (٨٨٪) تقريبًا من عمر الأرض وتُعدّ من أطول الوَحْدات الزمنية في تاريخها؛ وتمتاز بأحداث رئيسة هي: نشأة الأرض، ونشأة الحياة، وندرة الأحافير؛ لذا، فإن معلوماتنا عنها قليلة.

ب– دهر الحياة الظاهرة، وهو الأحدث، وفيه أصبحت أشكال الحياة واضحة مرئيّة محفوظة في الصخور. ويُقسم إلى ثلاثة أحقاب:

١. حقب الحياة القديمة (Paleozoic): قُسّم هذا الحقب إلى ستة عصور جيولوجية مرتّبة من الأقدم إلى الأحدث على النحو الآتي: الكامبري، والأوردوفيشي، والسيلوري، والديفوني، والكربوني، والبيرمي، انظر الشكل (٣–٩). ويتميّز هذا الحقب، منذ مطلعه أي في العصر الكامبري، بالظهور المفاجئ لأعداد كبيرة ومتنوّعة من الكائنات الحية ذات الهيكل الصُّلب، والأصداف وانتشارها وتطوّرها وأشهرها

الترايلوبيت. ويُعدّ العصر الكامبري حجر الأساس في بناء سلّم الزمن الجيولوجي؛ إذ يفصل بين الزمن الجيولوجي (ما قبل الكامبري) الذي كانت فيه الحياة بدائية تفتقر إلى الهياكل الصُّلبة، والزمن الجيولوجي الذي ظهرت فيه كائنات ذات هياكل صُلبة يمكنها تكوين أحافير. وقد ظهرت الأسماك البدائية (الغضروفية مثل سمك القرش) في العصر الأوردوفيشي، ثمّ البرمائيات، فالزواحف قُرب نهاية هذا الحقب. وتنوّعت النباتات اللازهرية مثل السرخسيات في العصر الكربوني خاصّة، حيث نتج منها كميات كبيرة من الفحم الحجري في غرب أوروبا وشرق أمريكا الشمالية. وتميّزت نهاية هذا الحقب بانقراض (٩٠٪) تقريبًا من أنواع الكائنات الحية التي كانت موجودة آنذاك.

٢. **حقب الحياة المتوسطة (Mesozoic)**: قُسّم هذا الحقب إلى ثلاثة عصور هي: الترياسي، والجوراسي، والكريتاسي، انظر الشكل (٣–٩). ويتميّز هذا الحقب بظهور كائنات حية متطوّرة وراقية. فظهرت الطيور أول مرّة بتاريخ الأرض في العصر الجوراسي، والنباتات المغطاة البذور في نهاية هذا الحقب، وسادت الديناصورات خلال هذا الحقب، بالإضافة إلى اللافقاريات مثل مجموعة الأمونيت، إلى أن حدث انقراض كبير في نهاية هذا الحقب لمجموعات من الحيوانات والنباتات مثل الديناصورات والأمونيتات.

٣. **حقب الحياة الحديثة (Cenozoic)**: قُسّم هذا الحقب إلى عصرين هما: الثلاثي والرباعي الذي ظهر فيه الإنسان، وما زال هذا العصر مستمرًّا، انظر الشكل (٣–٩). ويتميّز هذا الحقب بانتشار الكائنات الحية التي تُشبِه الكائنات الحية المنتشرة حاليًّا، كما حلّت الثدييات محلّ الديناصورات المنقرضة، وتطوّرت بسرعة كبيرة، وازدادت حجومها وأعدادها، وسادت النباتات المغطاة البذور.

١- وضّح المقصود بكل من: الأحفورة، والتفحّم، والقالب، والجيولوجيا التاريخية، وما قبل الكامبري.

٢- قارن بين طريقتَي التحفُّر الآتيتين؛ حفظ الأجزاء الصُّلبة الأصلية للكائن الحي، وتصخُّر الأجزاء الصُّلبة الأصلية من حيث: تغيُّر كتلة الهيكل الصُّلب، وتغيّر الشكل والحجم، وتغيُّر المكوّنات المَعْدِنية. نظم إجابتك في جدول.

٣- اذكر طريقة تحفُّر كل مما يأتي:

أ - حفظ العظام والأسنان في الفقاريات.

ب- قنوات تحفُرها أنواع من الديدان.

جـ- فقدان النباتات بعض مكوّناتها مثل (N_2، H_2، O_2) ويتركّز الكربون على شكل طبقة رقيقة نتيجة دفنها في رواسب طينية.

٤- فسِّر العبارات الآتية تفسيرًا علميًّا دقيقًا:

أ - الدفن السريع للكائن الحي، مهم جدًّا لعملية حفظه على شكل أحفورة.

ب- صعوبة تكوّن أحافير في الصخور النارية.

جـ- يرافق طريقة التفحّم نقصان في الكتلة.

د - كائنات الأحافير في صخور القشرة الأرضية على كثرتها، إلا أنها تُمثِّل جزءًا بسيطًا من أنواع الحياة التي كانت سائدة في الماضي.

هـ - تُعدّ طريقة حفظ الأجزاء الصُّلبة الأصلية، نادرة في التاريخ الجيولوجي.

٥- تُعدّ طريقة الاستبدال إحدى طرائق تصخُّر الأجزاء الصُّلبة الأصلية للكائنات الحية، وضّح آلية حدوثها.

الفصل الدراسي الثاني

الفصل الثاني

التأريخ وعلم الطبقات
(Age Dating and Stratigraphy)

كيف تمكّن العلماء من معرفة الأحداث الجيولوجية التي مرّت بها الأرض عبر تاريخها الطويل؟ وكيف تمكّنوا من تحديد أعمار هذه الأحداث وتحديد عمر الأرض؟ وما الأسس المتّبعة في معرفة هذه الأعمار؟

أولًا: علم الطبقات

يُعرف **علم الطبقات** (Stratigraphy) بأنه العلم الذي يهتم بدراسة طبقات الأرض وتتابعها وخصائصها، وكيفية تشكّلها ونشأتها والشواهد الجيولوجية التي تدل على أعمارها.

تتميّز الطبقات الصخرية عن بعضها بعضًا بخصائصها الفيزيائية والكيميائية والحيوية، ومن هذه الخصائص سمك الطبقات، ونسيجها، ولونها، والتراكيب الرسوبية الموجودة فيها، ومحتواها الأحفوري، ومكوّناتها الكيميائية والمعدِنية.

توجد الصخور الرسوبية في الطبيعة على هيئة طبقات يعلو بعضها بعضًا، وتُعرف **الطبقة الصخرية** (Stratum) بأنها وحدة مسطّحة من الصخور الرسوبية ذات سمك محدّد، ونسيج مميّز، ومكوّنات معدِنية مميّزة، ويمكن أن تحوي أحافير، أو تراكيب داخلية، انظر الشكل (٣–١٠)، ويفصل كل طبقة عن الطبقات الموجودة أعلاها وأسفلها سطح علوي وآخر سفلي.

(أ)

(ب)

الشكل (٣–١٠): طبقات رسوبية، إحداها يخلو من التراكيب الداخلية (أ) والأخرى تتميّز بوجود تراكيب داخلية (ب).

ثانيًا: التعاقب الطبقي

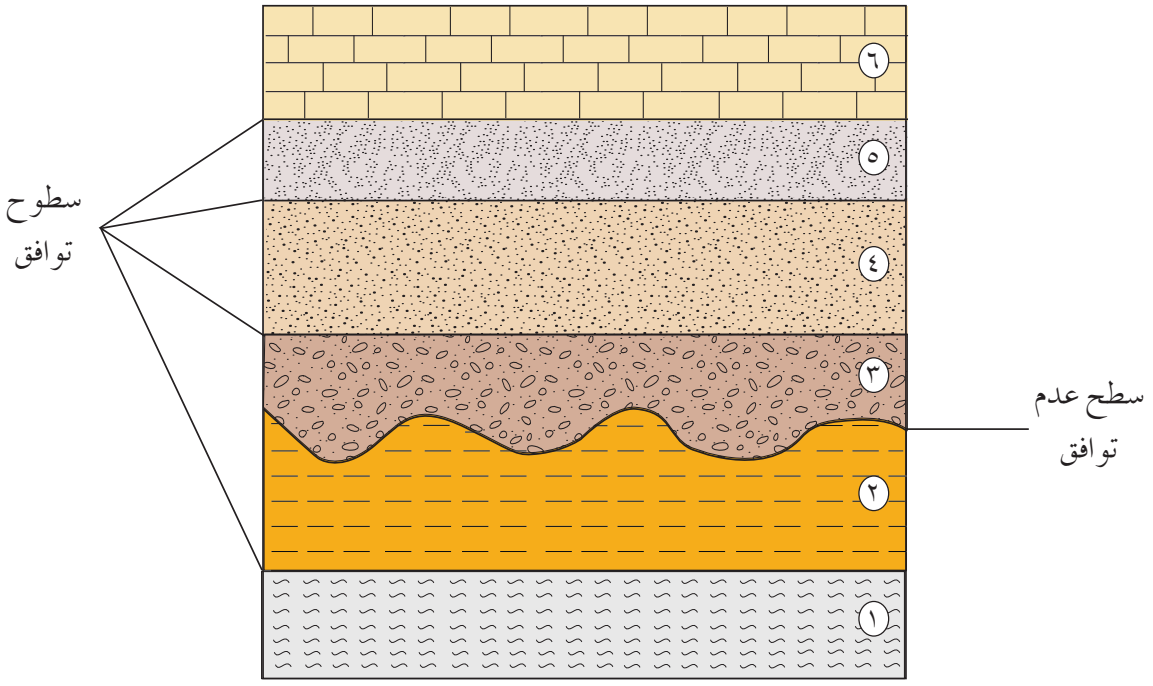
تترسّب الطبقة الواحدة في ظروف فيزيائية وكيميائية وحيوية محدّدة، وإذا اختلفت هذه الظروف أو أحدها، فيؤدي ذلك إلى انتهاء تكوين الطبقة وبدء تكوّن طبقة أخرى. ولتوضيح كيف يتكوّن التعاقب الطبقي، نعطي مثالًا على اختلاف الظروف الفيزيائية كما يأتي:

لو أخذنا الصخور الرسوبية الفتاتية التي تنشأ بفعل نواتج التجوية الفيزيائية وترسيبها في بيئة مائية، كمجاري الأنهار وضفافها وشواطئ البحار والمحيطات وقيعانها، فإننا نلاحظ أن حبّات المعادن أو فتات الصخور تستقر فوق السطح السفلي لبيئة الترسيب بفعل الجاذبية على شكل طبقة أفقية. وتتراكم لتبلغ سمكًا معيّنًا. وباختلاف الظروف الفيزيائية، كزيادة سرعة مياه النهر، يزداد حجم الحبّات التي ينقلها النهر؛ ثمّ تترسّب فوق الرسوبيات الناعمة السابقة التي أصبحت الآن على شكل طبقة يعلوها ويقع أسفل منها نوع آخر من الرسوبيات يختلف عنها في الحجم. ويؤدي استمرار تراكم طبقات من الصخور الرسوبية في أثناء الزمن الجيولوجي، إلى تكوين **التعاقب الطبقي** (Superposition). انظر الشكل (٣–١١).

الشكل (٣–١١): تعاقب طبقي.

ثالثًا: التوافق وعدم التوافق

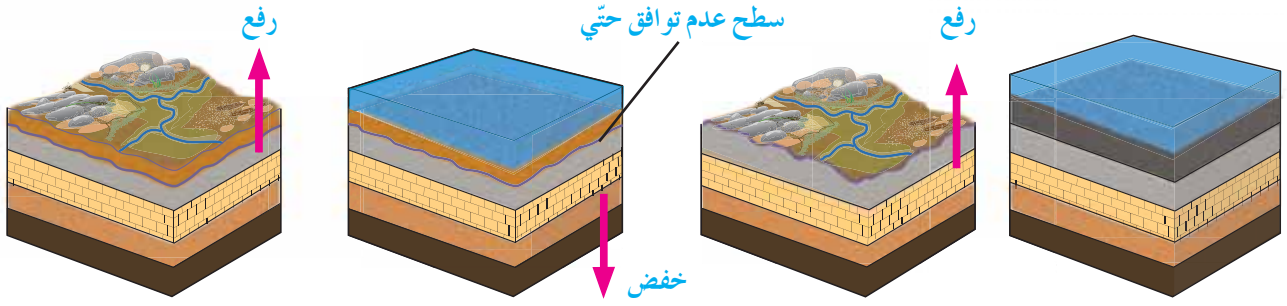
يتشكّل التعاقب الطبقي نتيجة لترسيب الطبقات الصخرية فوق بعضها بعضًا بشكلٍ متتالٍ، من دون حدوث انقطاع زمني في عملية الترسيب. وتكون هذه الطبقات متوازية ومتتالية زمنيًّا؛ أي **متوافقة** (Conformity) بسبب استمرار عملية الترسيب. إلا أننا لا نجد هذا في الطبيعة دائمًا، عندئذٍ تصبح العلاقة بين الطبقات علاقة **عدم توافق** (Unconformity)، انظر الشكل (٣–١٢). فما أنواع سطوح عدم التوافق؟ وكيف نشأت؟



الشكل (٣–١٢): تعاقبان طبقيان بينهما سطح عدم توافق.

١– عدم التوافق الحتّي

يفصل **سطح عدم التوافق الحتّي** (Disconformity) بين تعاقبين طبقيين متوازيين؛ السفلي (الأقدم) والعلوي (الأحدث). لكن كيف ينشأ سطح عدم التوافق الحتّي، وعلامَ يدلّ؟ انظر الشكل (٣–١٣)، ولخّص مراحل تكوّن سطح عدم التوافق الحتّي.



(أ) ترسّبت الطبقات بداية في قاع البحر بشكل أفقي.

(ب) تعرّضت الطبقات لعمليات رفع أدّت إلى انحسار البحر عنها. ومن ثمّ، سادت عمليات حتّ وتعرية أزالت جزءًا من التعاقب الطبقي.

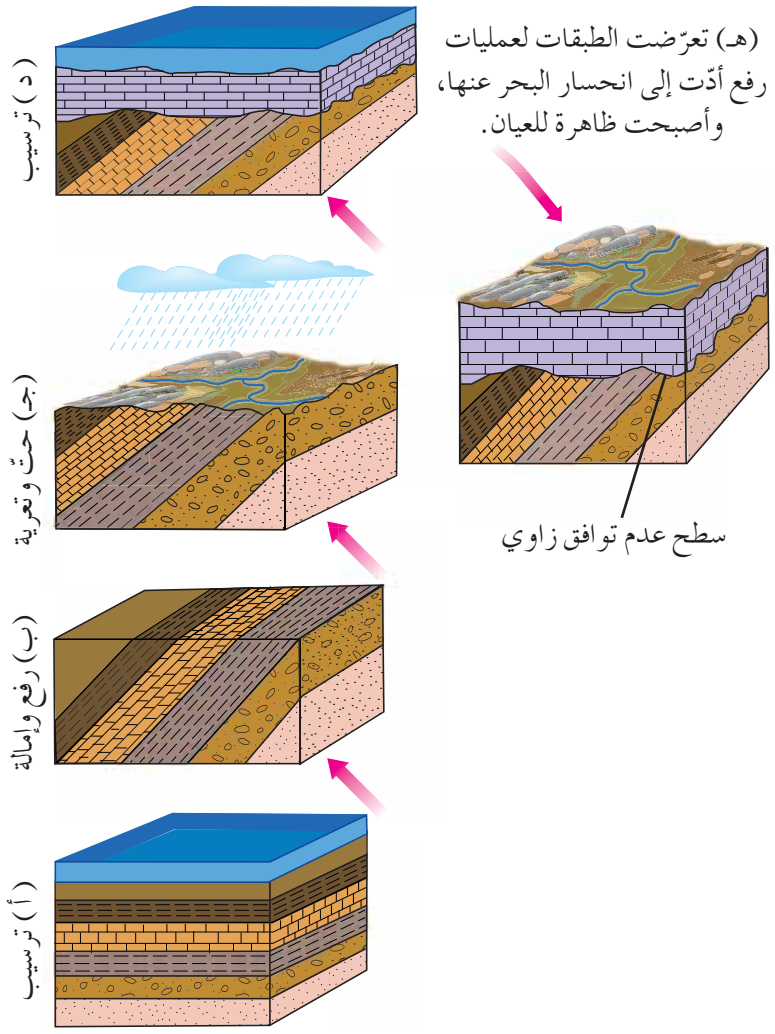
(جـ) تعرّضت الطبقات لعمليات خفض أدّت إلى طغيان البحر وعودة الترسيب من جديد، فتكوّن تعاقب طبقي جديد، وبذلك أصبح لدينا تعاقبان طبقيان يفصل بينهما سطح عدم توافق حتّي.

(د) تعرّضت الطبقات لعمليات رفع أدّت إلى انحسار البحر عنها؛ فانكشفت وأصبحت ظاهرة للعيان.

الشكل (٣–١٣): مراحل تكوّن سطح عدم التوافق الحتّي.

٢– عدم التوافق الزاوي

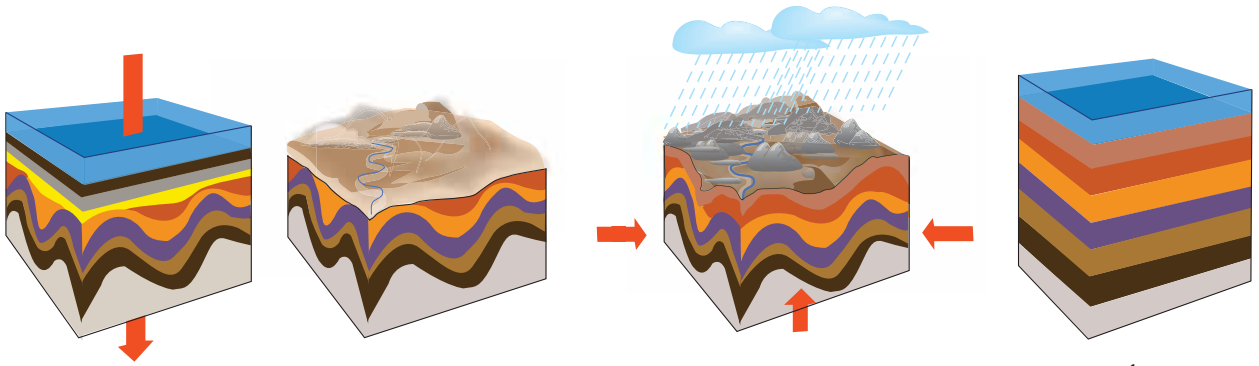
يفصل **سطح عدم التوافق الزاوي** (Angular Unconformity) بين تعاقبين غير متوازيين (بينهما زاوية)، ويتكوّن بالطريقة نفسها التي يتكوّن بها سطح عدم التوافق الحتّي، إلا أن الطبقات القديمة تعرّضت للرفع والإمالة أو الطيّ، بفعل إجهادات الضغط في أثناء رفعها، كما هو موضّح في الشكل (٣–١٤).



الشكل (٣–١٤): مراحل تكوّن سطح عدم التوافق الزاوي.

اختبر معلوماتك

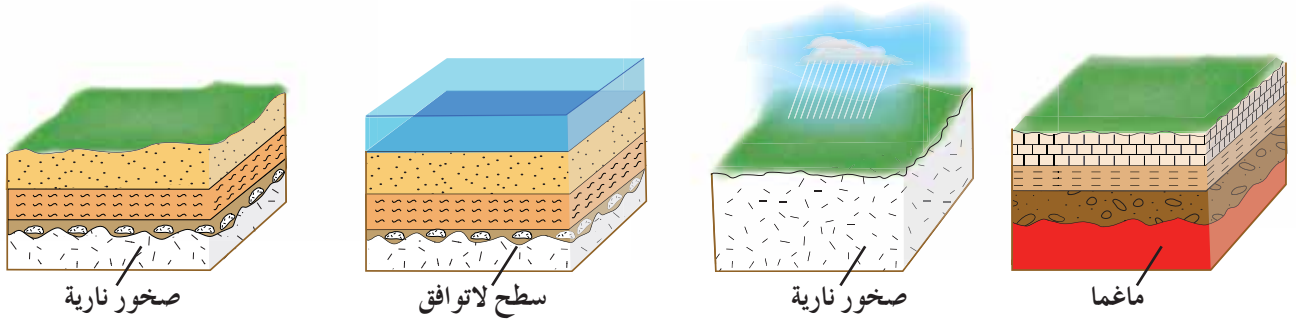
انظر الشكل (٣–١٥)، ثمّ لخّص مراحل تكوّن سطح عدم التوافق الزاوي الموضّح فيه، وبيّن العمليات التي يتضمّنها الشكلان (ب) و (د).



الشكل (٣–١٥): اختبر معلوماتك.

٣– سطح اللاتوافق

يفصل **سطح اللاتوافق** (Nonconformity) بين مجموعتين من الصخور القديمة (نارية أو متحولة) والحديثة (رسوبية)، ويُمثّل هذا السطح مدّة زمنية ضائعة في أثناء عمليات الحتّ والتعرية، قبل بدء ترسيب الطبقات الرسوبية التي تعلو الصخور النارية أو المتحوّلة. ويوضّح الشكل (٣–١٦) مراحل تكوّن سطح اللاتوافق.



(أ) اندفاع الماغما أسفل صخور رسوبية قديمة وتبلورها.

(ب) حدوث عمليات حتّ وتعرية أزالت الصخور الرسوبية وأجزاءً من الصخر الناري.

(جـ) تعرّضت المنطقة لعمليات خفض أدّت إلى حدوث عمليات ترسيب لصخور رسوبية حديثة، فتكوّن تعاقب طبقي فوق الصخور النارية القديمة يفصل بينهما سطح لاتوافق.

(د) تعرّضت المنطقة لعمليات رفع أدّت إلى انحسار البحر عنها، ومن ثمّ سادت عمليات الحتّ والتعرية.

الشكل (٣–١٦): مراحل تكوّن سطح اللاتوافق.

اعتمادًا على ما ذُكر، يمكن تعريف **سطح عدم التوافق** بأنه سطح يفصل بين تعاقبين طبقيين أحدهما قديم والآخر أحدث منه، ويدلّ على حدوث عمليات حتّ وتعرية، أو انقطاع في الترسيب، إضافة إلى تعرّض المنطقة لحركات أرضية رافعة ثمّ هابطة، ويُمثّل مدّة زمنية ضائعة بين التعاقبين الطبقيين.

رابعًا: التأريخ النسبي

يُعرف **التأريخ النسبي** (Relative Dating) بأنه ترتيب الأحداث الجيولوجية من الأقدم إلى الأحدث، اعتمادًا على الشواهد الجيولوجية المتوافرة، وباستخدام مجموعة من المبادئ.

ويمكن باستخدام التأريخ النسبي تأريخ الأحداث الجيولوجية نسبة إلى بعضها بعضًا؛ لكنه لا يعطينا عمرًا محدّدًا لهذه الأحداث بمعنى أنه لا يحدّد متى وقعت، وكم من الوقت انقضى على حدوثها. فعندما نقول إن محمدًا أكبر من أخيه عبد الله، وإن عبد الله أكبر من أخيه عمر، فإننا نتحدّث عن التأريخ النسبي لهؤلاء الأخوة. أما إن قلنا أن محمدًا عمره (٢٥) عامًا، وعبد الله (٢٢) عامًا وعمر (١٢) عامًا، فإننا نتحدث عن العمر المطلق.

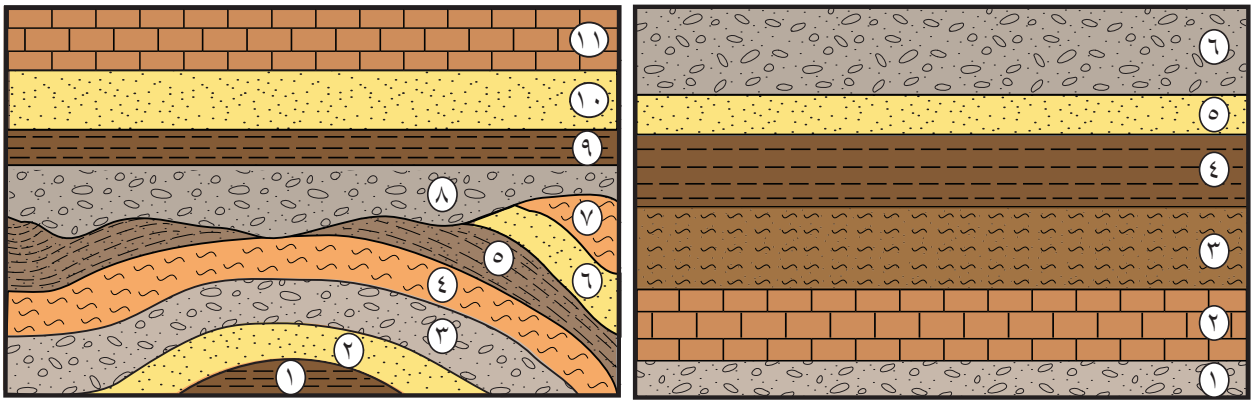
فكيف استطاع العلماء تحديد أعمار الأحداث الجيولوجية نسبة إلى بعضها بعضًا؟ وما المبادئ التي استُخدمت في ذلك؟

١- مبدأ الترسيب الأفقي ومبدأ تعاقب الطبقات

لمعرفة مبدأ الترسيب الأفقي ومبدأ تعاقب الطبقات، نفّذ النشاط (٣-٤)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

٣-٤ نشاط تحليلي: مبدأ الترسيب الأفقي ومبدأ تعاقب الطبقات

ادرس الشكل (٣-١٧)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



(ب) (أ)

الشكل (٣-١٧): مبدأ الترسيب الأفقي ومبدأ تعاقب الطبقات.

١- ما الذي تسبّب في أن يكون الترسيب أفقيًّا في الشكل (أ)؟

٢- أين يمكن أن توجد أقدم الطبقات وأحدثها في الشكل (أ)؟

٣- ما الذي تسبّب في طيّ الطبقات (١، ٢، ٣، ٤، ٥، ٦، ٧) في الشكل (ب)؟

٤- رتّب الطبقات الموضّحة في الشكل (ب) من الأقدم الى الأحدث.

٥- ما عدد التعاقبات الرسوبية في الشكلين: (أ) و (ب)؟

"تترسّب الصخور الرسوبية بشكل عام في وضع أفقي، اعتمادًا على أن معظم الترسيب الأفقي يحدث في قيعان البحار والمحيطات، أما ما يحدث من طيّ أو ميل أو تعرية فهو حدث جيولوجي لاحق للترسيب الأفقي لهذه الصخور"، وهذا هو نص **مبدأ الترسيب الأفقي** (Principle of Original Horizontality).

ولعلك لاحظت من النشاط السابق، أن الطبقات الرسوبية الأقدم تكون موجودة في أسفل التتابع الطبقي، والطبقات الرسوبية الأحدث توجد أعلاه، وهذا يُمثّل **مبدأ تعاقب الطبقات** (Principle of Superposition) الذي ينص على أنه **"في أي تعاقب طبقي للصخور الرسوبية تكون**

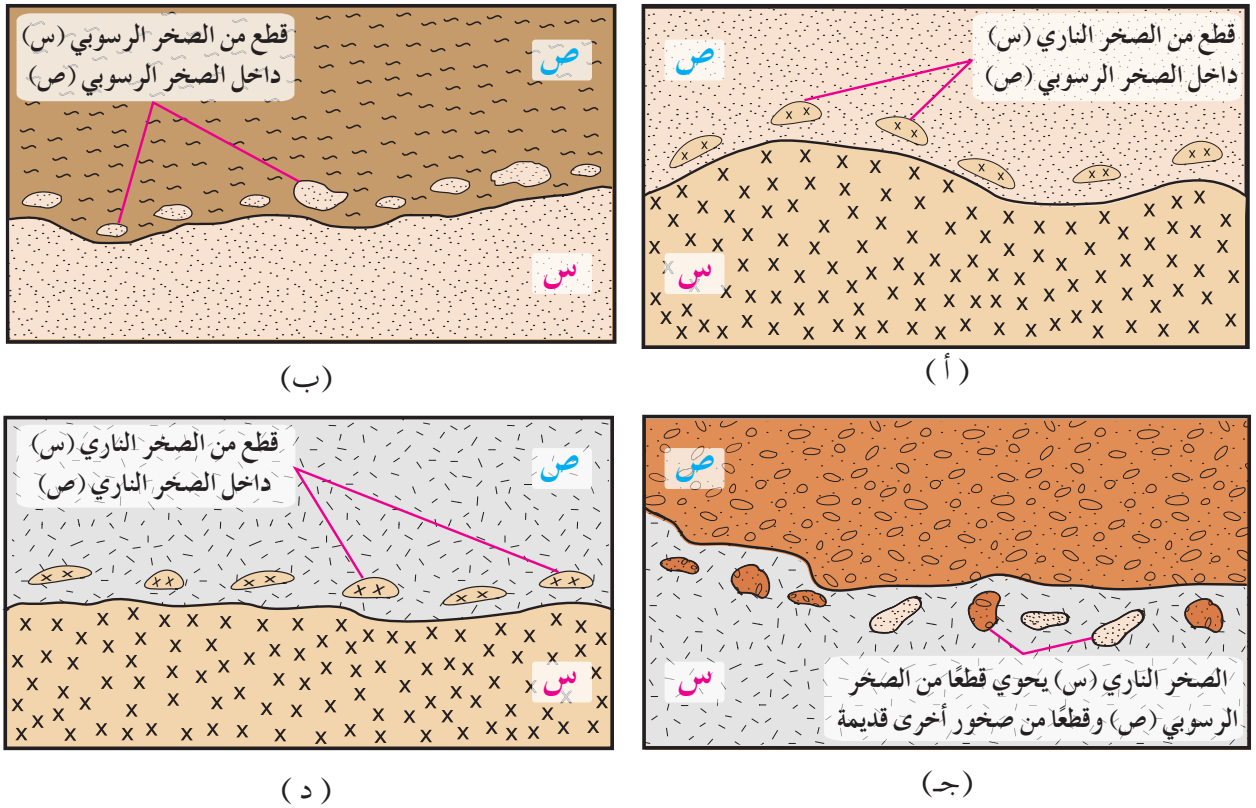
كل طبقة رسوبية فيه أحدث من الطبقة التي تقع تحتها، وأقدم من الطبقة التي فوقها، ما لم تتعرّض هذه الطبقات لقوى تؤدي إلى تغيير نظام تعاقبها الأصلي"، وينطبق ذلك على الصخور الرسوبية والطفوح البركانية.

٢- مبدأ الاحتواء

ينص **مبدأ الاحتواء** (Principle of Inclusions) على أنه **"إذا احتوى جسم صخري قِطعًا من جسم صخري آخر، يكون الجسم الصخري الحاوي أحدث من القطع التي يحتويها"**. وقد يحدث الاحتواء بين صخورٍ من النوع نفسه أو بين صخور من أنواع مختلفة، فقد يحدث بين صخور نارية وصخور رسوبية أو بين صخور رسوبية وصخور رسوبية أخرى، أو بين صخور نارية وصخور نارية أخرى. لتعرُّف ذلك، نفّذ النشاط (٣-٥).

٣-٥ نشاط تحليلي: مبدأ الاحتواء

ادرس الشكل (٣-١٨)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣-١٨): الاحتواء بين أنواع الصخور المختلفة.

١- حدّد الصخر الأقدم والصخر الأحدث في كل شكل من الأشكال السابقة.

٢- ما سبب حدوث الاحتواء في كل حالة من الحالات الأربعة؟

٣- هل توجد سطوح عدم توافق في الأشكال (أ، ب، جـ، د)؟ وما نوعها إن وُجدت؟

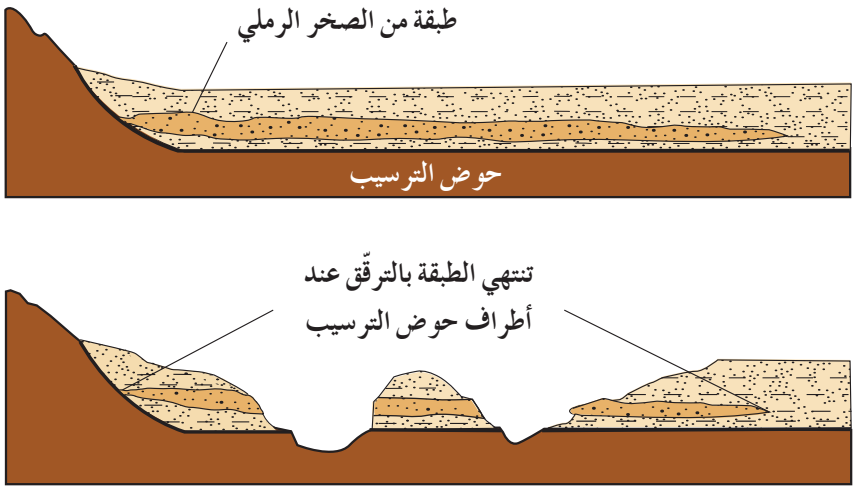
يمكن أن يحدث الاحتواء بين أنواع الصخور المختلفة. ففي الشكل (٣-١٨/ أ)، يظهر الصخر الرسوبي فوق الصخر الناري الأقدم؛ الذي تكشّف على سطح الأرض وتعرّضت أجزاؤه العليا للحتّ، واحتُبست قطع منه في الصخر الرسوبي الأحدث. وفي الشكل (٣-١٨/ب)، حدث احتواء بين صخرين رسوبيين، وغالبًا ما يحدث هذا النوع من الاحتواء في أثناء الترسيب؛ إذ تتعرّض الطبقة (س) بعد ترسّبها لتيارات مائية تُهشّم الأجزاء العلوية منها، فتتناثر القطع على سطحها، ثمّ تترسّب الطبقة (ص) فتُحتبس هذه القطع ضمنها.

أما في الشكل (٣-١٨/جـ) فقد حدث احتواء لقطع من الصخور الرسوبية في الصخور النارية؛ نتيجة اندفاع الماغما داخل الصخور الرسوبية، ما أدّى إلى تهشيم أطراف الصخور الرسوبية القديمة وتكسيرها، واحتباس قطع منها داخل الماغما المندفعة، التي سوف تتصلّب وتُصبح صخرًا ناريًّا في ما بعد، ومثال ذلك وجود قطع صخرية من الستار العلوي في براكين جبل الأرتين في البادية الشمالية في الأردن.

وقد يحدث احتواء صخور نارية لصخور نارية أخرى، مثل وجود قطع صخر البيرودوتيت ضمن البازلت الذي يُشاهد في صخور الدرع العربي في العقبة، ويوضّح الشكل (٣-١٨/ د) مثالًا على احتواء صخور نارية لصخور نارية أخرى.

٣- مبدأ الاستمرارية الجانبية

ينص **مبدأ الاستمرارية الجانبية** (Principle of Lateral Continuity) على أن "**الصخور الرسوبية تمتدّ جانبيًّا وفي الاتجاهات كلّها، وتقلّ سموكها تدريجيًّا عند أطراف حوض الترسيب، ولها عمر واحد في أي مكان وُجدت فيه ضمن الحوض الرسوبي**". ويُستخدم هذا المبدأ في تحديد فاعلية المضاهاة الصخرية، وفي تعرّف امتداد الطبقات عند تعرّضها لعمليات الحتّ والتعرية. ولتعرّف ذلك، انظر الشكل (٣-١٩).



الشكل (٣–١٩): طبقة من الصخر الرملي تمتدّ جانبيًّا ضمن حوض رسوبي، لاحظ الامتداد الجانبي لطبقة الصخر الرملي ضمن الحوض الرسوبي قبل تعرّضها لعمليات الحتّ والتعرية (أ) وبعد تعرّضها للحتّ والتعرية (ب).

٤– مبدأ القاطع والمقطوع

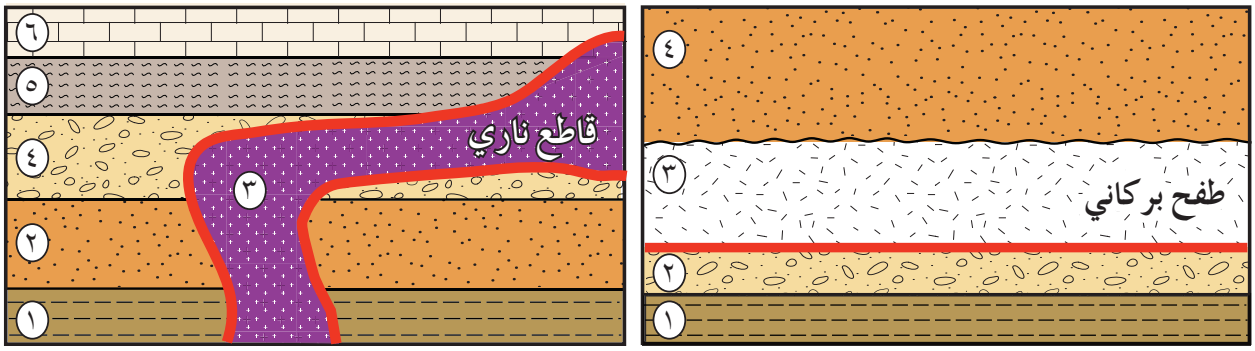
ينص **مبدأ القاطع والمقطوع** (Principle of Cross Cutting Relationships) على أن "**القاطع أحدث من المقطوع سواء أكان القاطع جسمًا ناريًّا أم صدعًا تكتونيًّا**". انظر الشكل (٣–٢٠).

الشكل (٣–٢٠): قاطع ناري يخترق صخورًا رسوبية.

تقطع الأجسام النارية بأنواعها المختلفة التي هي في الأصل ماغما ساخنة الصخور؛ أيًّا كان نوعها، فتؤدّي إلى تغيير في مكوّناتها المعدِنية وخصائصها الفيزيائية، فيتشكّل صخر متحوّل جديد في مكان التماس بين الصخر المقطوع والماغما الساخنة، مُحدثة ما يُعرف **بالتحوّل التماسي** أو **التحوّل الحراري** (Contact Metamorphism). ولمعرفة كيف يحدث ذلك، نفّذ النشاط (٣–٦).

٣-٦ نشاط تحليلي: مبدأ القاطع والمقطوع

يوضّح الشكل (٣-٢١) تعاقبات من صخور رسوبية (١، ٢، ٤، ٥، ٦) واندفاعات نارية (٣). ادرسه جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



(ب) (أ)

الشكل (٣-٢١): تأثير الطفح البركاني (أ) والقاطع الناري (ب) في الطبقات الرسوبية؛ حيث يشير الخط الأحمر السميك إلى منطقة حدوث تحوّل تماسي.

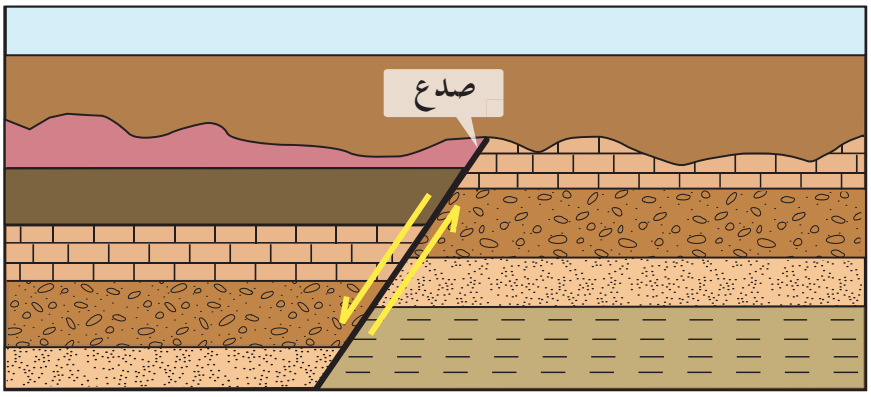
١- ما تأثير الطفح البركاني في الطبقات الرسوبية في الشكل (٣-٢١/ أ)؟ وما تأثير القاطع الناري في الطبقات الرسوبية في الشكل (٣-٢١/ ب)؟

٢- رتّب الأحداث الجيولوجية (١، ٤، ٢، ٥، ٣، ٦) الواردة في الشكل (٣-٢١/ ب) من الأقدم إلى الأحدث.

٣- ما عدد سطوح عدم التوافق في الشكل (٣-٢١/ أ) والشكل (٣-٢١/ب)؟

٤- حدّد التعاقبات الرسوبية الواردة في الشكل (٣-٢١/ أ) والشكل (٣-٢١/ب).

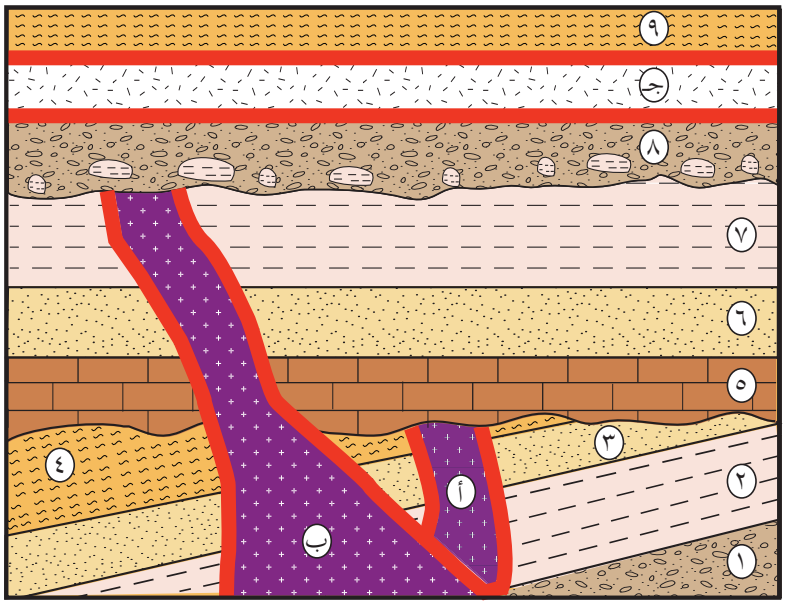
عندما تتعرّض الطبقات الصخرية إلى إجهادات الشد والضغط؛ فإن ذلك يؤدي إلى تشوّهها مشكّلة بذلك صدعًا يُزيح الكتل الصخرية على جانبَي الصدع، انظر الشكل (٣-٢٢).



الشكل (٣–٢٢): صدع عادي نتج من إجهاد الشد وأثره في الطبقات، ويشير السهمان باللون الأصفر إلى حركة الكتل الصخرية على جانبَي الصدع (القاطع).

مثال (١)

يوضّح الشكل (٣–٢٣) تعاقبات لصخور رسوبية (١، ٢، ٣، ٤، ٥، ٦، ٧، ٨، ٩) والقواطع النارية (أ، ب). والمندسة البركانية (جـ) وتشير الخطوط السميكة إلى مناطق حدوث تحوّل تماسي. ادرس الشكل جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣–٢٣): مثال (١).

١– رتّب الأحداث الجيولوجية الواردة في الشكل (٣–٢٣) من الأقدم الى الأحدث.

٢– ما المبادئ التي اعتمدت عليها في ترتيب الأحداث الجيولوجية؟

٣– ما عدد التعاقبات الرسوبية في الشكل؟

٤– حدّد سطوح عدم التوافق الواردة في الشكل.

٥– ما الدليل على أن المندسة البركانية (جـ) أحدث من الطبقة (٨) والطبقة (٩) أيضًا؟

الحل:

١– ترسّبت الطبقات (١، ٢، ٣، ٤) أولًا، ثمّ القاطع الناري (أ)، ثمّ ترسّبت الطبقات (٥، ٦، ٧)، ثمّ القاطع الناري (ب)، ثمّ ترسّبت الطبقتان (٨، ٩)، ثمّ المندسة البركانية (جـ).

٢– مبدأ الترسيب الأفقي، ومبدأ القاطع والمقطوع، ومبدأ الاحتواء.

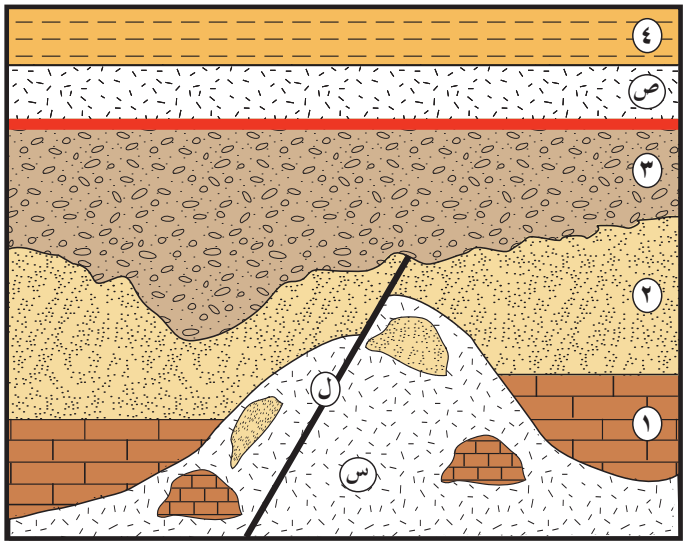
٣– ثلاثة تعاقبات رسوبية.

٤– سطح عدم توافق زاوي بين الطبقتين (٤ و٥)، وسطح عدم توافق حتّي بين الطبقتين (٧ و٨).

٥– لأنه أحدث تحوّلًا تماسيًّا مع كلتا الطبقتين (٨ و٩)، ما يدلّ على أن الطبقتين (٨ و٩) كانتا موجودتين.

اختبر معلوماتك

يوضّح الشكل (٣–٢٤) طبقات من الصخور الرسوبية (١، ٢، ٣، ٤) والصخر الناري (س)، والطفح البركاني (ص)، والصدع (ل). ادرس الشكل جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣–٢٤): اختبر معلوماتك .

١– رتّب الأحداث الجيولوجية (١، ٢، ٣، ص، ٤، س، ل) الواردة في الشكل من الأقدم إلى الأحدث ذاكرًا المبادئ التي اعتمدت عليها.

٢– ما عدد التعاقبات الرسوبية في الشكل؟

٣– حدّد سطوح عدم التوافق الواردة في الشكل.

٤– هل الحركة عبر الصدع (ل) حدثت قبل ترسيب الطبقة (٣) أم بعدها؟ لماذا؟

خامسًا: المضاهاة

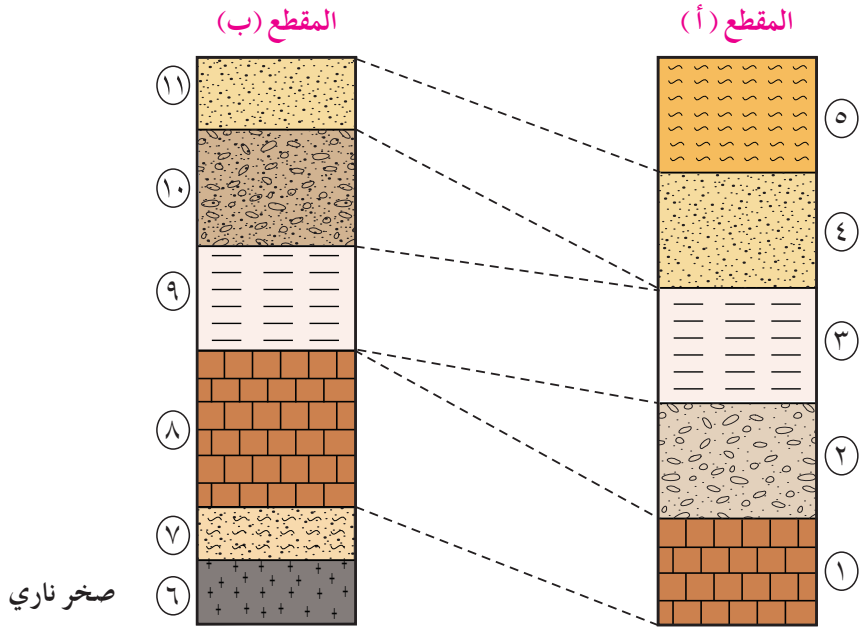
تعلّمت من دراستك مبدأ الاستمرارية الجانبية أن الطبقة الصخرية الواحدة على امتداد الحوض الرسوبي يكون لها العمر نفسه. ومن ثمّ، فإنه يمكن عمل مطابقة بين التتابعات الصخرية المتكشّفة وغير المتكشّفة ذات العمر الواحد في أماكن متباعدة على سطح الأرض عن طريق ما يُعرف **بالمضاهاة** (Correlation). وتُقسم المضاهاة إلى نوعين:

١- المضاهاة الصخرية

تعتمد **المضاهاة الصخرية** (Lithocorrelation) على التشابه في المكوّنات المعدِنية والخصائص الفيزيائية. ولتعرّف ذلك، ادرس المثال الآتي:

مثال (٢)

يُمثّل الشكل (٣-٢٥) مقطعين لطبقات صخور رسوبية أجريت بينهما مضاهاة صخرية، علمًا بأن الصخر (٦) يُمثّل صخرًا ناريًّا. ادرس الشكل جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣-٢٥): مثال (٢).

١- حدّد أقدم الطبقات الرسوبية وأحدثها في المقطعين.

٢- حدّد سطوح عدم التوافق.

٣- كم عدد الطبقات الرسوبية التي ترسّبت في المنطقة؟

الحل:

١– أقدم الطبقات هي (٧)، وأحدثها (٥).

٢– يوجد ثلاثة سطوح عدم توافق، كالآتي: في المقطع (أ) بين (٣) و (٤) يوجد سطح عدم توافق حتّي؛ بسبب حتّ الطبقة (١٠) وإزالتها. وفي المقطع (ب) بين (٦) و (٧) يوجد سطح لاتوافق؛ لأن (٦) صخر ناري. كما يوجد سطح عدم توافق حتّي بين (٨) و (٩)؛ بسبب حتّ الطبقة (٢) وإزالتها.

٣– سبع طبقات.

يواجه الجيولوجيون بعض المشكلات في أثناء إجراء المضاهاة الصخرية، نذكر منها:

أ – **تكرار النوع نفسه من الطبقات أكثر من مرّة في التعاقب الطبقي،** عندئذٍ يصعب إجراء المضاهاة، ويمكن التغلّب على هذه المشكلة بطريقتين، هما:

١. استخدام ما يُسمّى **الطبقة المرشدة** (Key Bed)، إن وُجدت، وهي طبقة مميّزة ذات صفات محدّدة، وانتشار واسع يَسهُل تتبّعها وتمييزها في المناطق المختلفة؛ كأن تكون مكوّنة من معدِن مميّز مثل الجبس، أو صخر الفوسفات والفحم الحجري.

٢. المضاهاة بمجموعة طبقات لها التتابع الطبقي نفسه في كلا المقطعين الجيولوجيين.

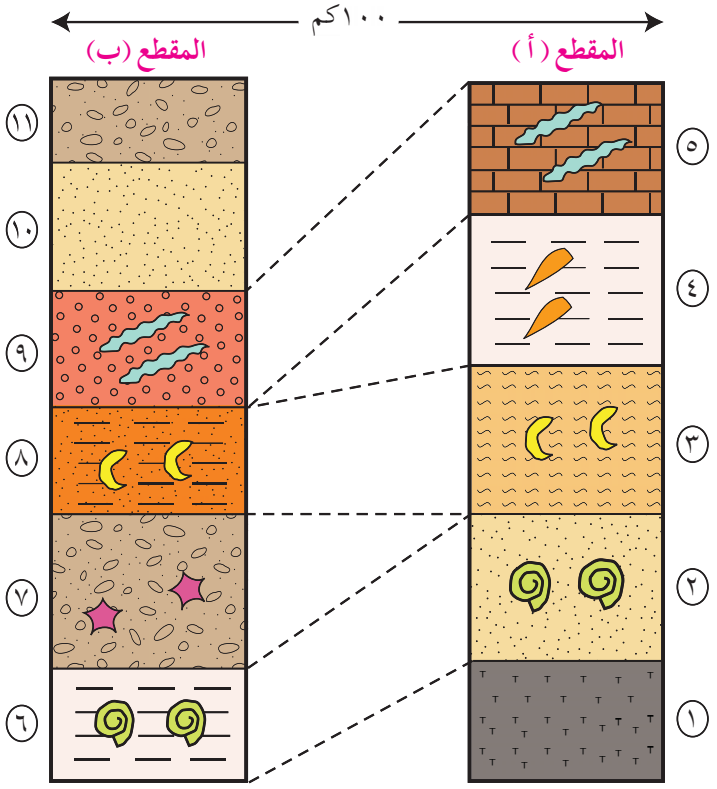
ب– **التغيّر الجانبي للصخور،** تحدث هذه المشكلة عند المضاهاة لمسافات كبيرة بسبب اختلاف ظروف الترسيب بين منطقة وأخرى؛ وقد اتضح للعلماء أن فاعلية هذه الطريقة تكون جيدة عند استخدامها في المضاهاة والتوفيق بين قطاعات قريبة من بعضها بعضًا. ونظرًا لصعوبة حلّ هذه المشكلة؛ يلزم الاعتماد على طريقة أخرى للمضاهاة أقلّ تأثرًا بُعد المسافات؛ هي المضاهاة الأحفورية.

٢– المضاهاة الأحفورية

تعتمد **المضاهاة الأحفورية** (Biocorrelation) على التشابه في المكوّنات الأحفورية. ولتعرّف هذا النوع من المضاهاة، ادرس المثال الآتي:

مثال (٣)

يُمثّل الشكل (٣–٢٦) مقطعين صخريين تفصل بينهما مسافة كبيرة، أجريت بينهما مضاهاة أحفورية. ادرس الشكل جيدًا، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.



الشكل (٣–٢٦): مثال (٣).

١– حدّد مكان انقطاع الترسيب في الشكل.

٢– هل يعتمد تعاقب مجموعات الأحافير على التغيّر في الخصائص الفيزيائية للصخر؟ وضّح إجابتك بدليل من الشكل.

الحل:

١– يوجد انقطاع في الترسيب بين الطبقة (٢) والطبقة (٣) في المقطع (أ)، وبين الطبقة (٨) والطبقة (٩) في المقطع (ب).

٢– لا، فمثلًا الطبقة (٥) والطبقة (٩) في المقطعين لها المحتوى الأحفوري نفسه، ولكنهما تختلفان في خصائصهما الفيزيائية.

يوجد مشكلات تحدّ من فاعلية المضاهاة الأحفورية مثل عدم وجود أحافير في موقع المضاهاة. كما أنه يصعب الاعتماد على أي أحفورة في المضاهاة؛ إذ يتم البحث عن أحافير تُسمّى **الأحافير المرشدة** (Index Fossils)، وتمتاز بأن عمرها الجيولوجي قصير، وانتشارها الجغرافي واسع. وقد استُخدمت هذه الأحافير في تحديد أعمار الصخور. ومن الأمثلة على الأحافير المرشدة؛ أحفورة الأمونيت التي تُرشِدنا إلى حقب الحياة المتوسطة.

ويمكن استخلاص أهمية المضاهاة في معرفة أعمار الطبقات الصخرية في أماكن لم تُدرس ميدانيًّا، كما تفيد المضاهاة في تحديد سطوح عدم التوافق والانقطاع في الترسيب.

سادسًا: التأريخ المطلق

يُعرف **التأريخ المطلق** (Absolute Dating) بأنه تحديد الأعمار المطلقة للمعادن والصخور والأحداث الجيولوجية باستخدام عملية الاضمحلال الإشعاعي للنظائر المشعّة.

تعلّمت سابقًا أن لبعض العناصر نظائر لها الأعداد الذرية والخصائص الكيميائية نفسها، لكنها تختلف في العدد الكتلي للعنصر الواحد. وتُصنّف النظائر حسب استقرار أنويتها إلى نظائر مستقرّة ونظائر غير مستقرّة. وتسعى نَوى النظائر المشعّة غير المستقرّة للوصول إلى حالة الاستقرار، وذلك بأن تضمحل تلقائيًّا مع مرور الزمن، ويكون هذا الاضمحلال بانبعاث جسيمات ألفا (α) وبيتا (β) وأشعة غاما (γ) منتجة نظائر وليدة، وهذا ما يُسمّى **النشاط الإشعاعي** (Radioactivity).

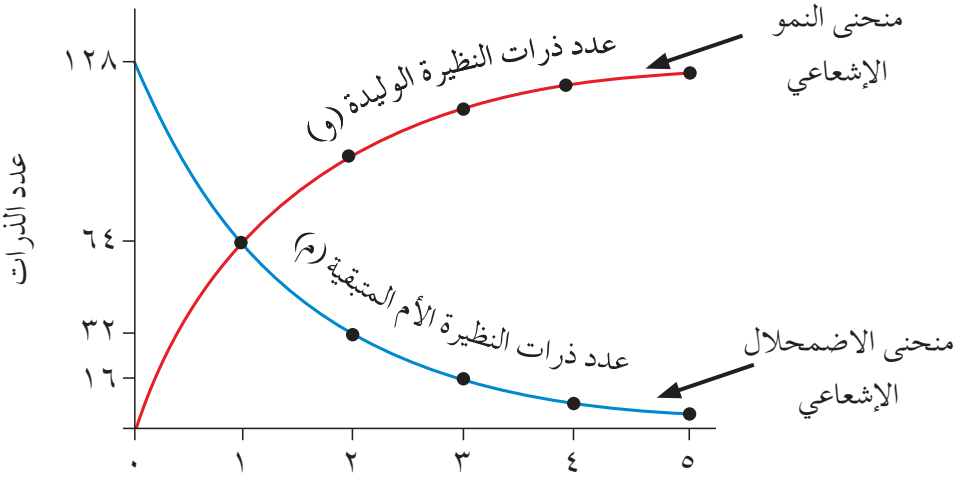
يمتاز مُعدّل الاضمحلال الإشعاعي بأنه ثابت، فلا يتأثّر بأي ظروف كيميائية أو فيزيائية، ومن هنا استُخدم في تحديد الأعمار الرقمية للمعادن والصخور.

١- تأريخ الأحداث الجيولوجية باستخدام النشاط الإشعاعي

أ - **عمر النصف:** يُعرف **عمر النصف** (Half-Life) بأنه زمن محدّد ثابت يضمحل فيه نصف عدد ذرات النظيرة المشعّة الأم إلى نظائر وليدة أكثر استقرارًا. ولكل نظيرة مشعّة عمر نصف خاص بها، حيث تتراوح فترة عمر النصف بين أجزاء من الثانية ومليارات السنين. ومن أكثر النظائر استخدامًا في التأريخ الجيولوجي البوتاسيوم ($^{40}_{19}K$)؛ إذ إنه على الرغم من

أن عمر النصف له يساوي ١,٣مليار سنة، يمكن أن يُستخدم في تحديد أعمار المعادن والصخور، التي تصل أعمارها إلى ١٠٠,٠٠٠سنة. ويمتاز البوتاسيوم بأنه موجود في معادن كثيرة، وفي معادن المايكا والفلسبار خاصّة. وتحتاج نظيرة البوتاسيوم ($^{40}_{19}K$) إلى ١,٣مليار سنة في كل مرّة تضمحل فيها إلى النصف لإنتاج نظيرتها الوليدة ($^{40}_{18}Ar$). بينما تحتاج نظيرة الكربون ($^{14}_{6}C$) إلى ٥٧٣٠ سنة في كل مرّة تضمحل فيها إلى النصف لإنتاج نظيرتها الوليدة ($^{14}_{7}N$) .

ولتوضيح مفهوم عمر النصف؛ ادرس الشكل (٣–٢٧)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣–٢٧): تناقص عدد ذرات النظيرة الأم المتبقية (المنحنى ذو اللون الأزرق) وتزايد عدد ذرات النظيرة الوليدة (المنحنى ذو اللون الأحمر) مع مرور الزمن.

- ما عدد ذرات النظيرة الأم الأصلية قبل بدء التحلّل؟
- ما عدد ذرات النظيرة الأم بعد انقضاء عمر النصف الأول؟
- ما عدد ذرات النظيرة الوليدة بعد ثلاث فترات عمر نصف (ن = ٣)؟
- صِف شكل منحنى الاضمحلال الإشعاعي: هل هو خطّي أم أسّي؟

يُلاحظ من الشكل (٣–٢٧)، تناقص عدد ذرات النظيرة الأم في كل فترة عمر نصف إلى نصف عدد ذراتها الأصلية، في حين يتزايد عدد ذرات النظيرة الوليدة، وذلك بسبب الاضمحلال الإشعاعي.

ويمكن التعبير عن عملية الاضمحلال الإشعاعي، بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$م = م_{.} \times (٢/١)^{ن}$$

حيث:

م. : عدد ذرات النظيرة الأم الأصلية.

م : عدد ذرات النظيرة الأم المتبقية.

ن : عدد فترات عمر النصف.

ب- **حساب أعمار الصخور:** لحساب **الأعمار المطلقة** (Absolute Ages) للمعادن والصخور، يجب تحديد نسبة النظيرة الأم المتبقية والنظيرة الوليدة لعينة معدِنية أو صخرية عن طريق التحليل الكيميائي باستخدام جهاز مطياف الكتلة، ثمّ حساب عدد ذرات النظيرة الأم الأصلية (م.) باستخدام العلاقة الرياضية الآتية:

$$م_{.} = م + و$$

حيث:

و : عدد ذرات النظيرة الوليدة.

ولحساب عمر العينة، نستخدم العلاقة الرياضية الآتية:

$$ز = ر_{٢/١} \times ن$$

حيث:

ز : عمر العينة.

$ر_{٢/١}$: عمر النصف للنظيرة المشعّة.

ن : عدد فترات عمر النصف.

مثال (٤)

عينة من عنصر مشعّ كتلتها ٢٠٠ غم، تحلّل منها ١٧٥ غم خلال ٣٠ يوم:

١– احسب عمر النصف لهذه العينة.

٢– كم يتبقى من العينة بعد مرور ٤٠ يومًا؟

الحل:

م$_{.}$ = ٢٠٠ غم و = ١٧٥ غم ز = ٣٠ يومًا

١– م$_{.}$ = م + و

٢٠٠ = م + ١٧٥ ← م = ٢٠٠ – ١٧٥ = ٢٥ غم.

م/م$_{.}$ = (١/٢)^{ن}

٢٥/٢٠٠ = (١/٢)^{ن}

(١/٨) = (١/٢)^{ن}

(١/٢)^{٣} = (١/٢)^{ن}

إذن: ن = ٣

ز = ر$_{١/٢}$ × ن

٣٠ = ر$_{١/٢}$ × ٣

ر$_{١/٢}$ = ١٠ أيام.

٢– م = ؟

ز = ر$_{١/٢}$ × ن ← ٤٠ = ١٠ × ن ← ن = ٤

ولكن: م = م$_{.}$ × (١/٢)^{ن} ← م/م$_{.}$ = (١/٢)^{ن}

م/٢٠٠ = ١/١٦

م = ٢٠٠/١٦ = ١٢,٥ غم.

إذن: م = ١٢,٥غم (الكتلة المتبقية من العينة بعد مرور ٤٠ يومًا).

مثال (٥)

نظيرة مشعّة عدد ذراتها ٦٠٠ ذرة نتج منها بعد الاضمحلال ٤٥٠ ذرة وليدة، احسب عمر الصخر؛ إذا علمت أن عمر النصف للنظيرة الأم، يساوي ٢٠ مليون سنة.

الحل:

م. = ٦٠٠ ذرة و = ٤٥٠ ذرة $ر_{٢/١}$ = ٢٠ مليون سنة

م. = م + و

٦٠٠ = م + ٤٥٠ ← م = ١٥٠ ذرة

ولكن: م/م. = $(٢/١)^{ن}$ ← ٦٠٠/١٥٠ = ٤/١ = $(٢/١)^{٢}$

إذن: ن = ٢

أو: ٦٠٠ ذرة ← (ن = ١) ٣٠٠ ذرة ← (ن = ٢) ١٥٠ ذرة

إذن: ن = ٢

ز = $ر_{٢/١}$ × ن

= ٢٠ × ٢ = ٤٠ مليون سنة.

اختبر معلوماتك

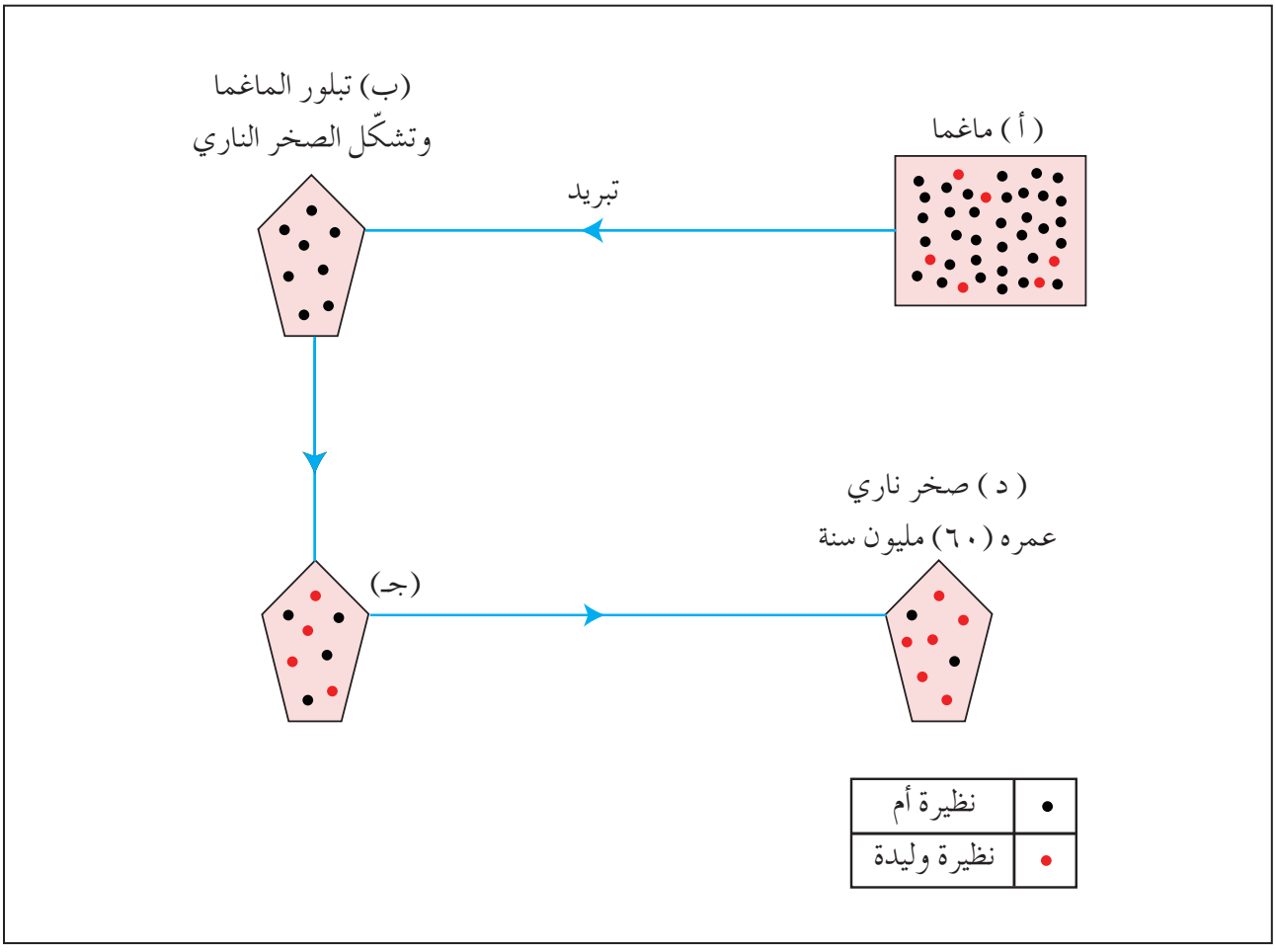
١- إذا كانت العينة الأصلية تحوي $١٠^{١٠}$ من ذرات النظيرة الأم في الزمن صفر (أي زمن تكوّن العينة)، نظّم جدولًا توضّح فيه عدد الذرات المتبقية من ذرات النظيرة الأم بعد انقضاء فترة عمر النصف: الأولى، والثانية، والثالثة، إلى فترة عمر النصف السادسة.

٢- بلورة من معدن لم يكن فيه رصاص ابتداءً، وكان يحوي يورانيوم، تبيّن لدى فحصه بجهاز مطياف الكتلة، أن فيه كميتين متساويتين من اليورانيوم ($^{238}_{92}U$) والرصاص ($^{206}_{82}Pb$). كم عمر هذه البلورة المعدِنية، إذا علمت أن عمر النصف لليورانيوم ($^{238}_{92}U$) يساوي ٤,٥ مليار سنة؟

ومن أهم شروط استخدام مبادئ الاضمحلال الإشعاعي في تقدير أعمار الصخور هو أن يكون النظام الإشعاعي مغلقًا أمام كسب كلا النظيرتين؛ الأم والوليدة أو فقدهما كي تعمل الساعة الإشعاعية، مشيرة إلى بداية تشكّل المعدِن (نشأته).

٢- استخدام التأريخ الإشعاعي في تقدير عمر الصخور

أسهل أنواع الصخور استخدامًا في التأريخ الإشعاعي هي الصخور النارية، التي تشكّلت من تبلور الماغما، ويكون النظام الإشعاعي مفتوحًا في حالة الماغما. وعندما تتبلور الماغما تبدأ الساعة الإشعاعية العدّ مع إغلاق النظام الإشعاعي؛ ما يعني انحباس النظيرة الأم المشعّة في البلورة. أي أن الساعة الإشعاعية تؤرّخ نشأة الصخر الناري لا نشأة الماغما. ولتعرّف ذلك، ادرس الشكل (٣-٢٨)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣-٢٨): استخدام النشاط الإشعاعي في تقدير أعمار الصخور النارية.

- هل يمكن حساب عمر الماغما في المرحلة (أ)؟ فسّر إجابتك.
- قدِّر عمر الصخر عند (ب). كيف توصلت إلى ذلك؟
- إذا كان عمر النصف للنظيرة الأم يساوي (٣٠) مليون سنة، قدّر عمر العينة عند (جـ).
- متى تبدأ الساعة الإشعاعية بالعدّ؟
- كم فترة عمر نصف مرّ على العينة في المرحلة (د)؟

وفي **الصخور المتحوّلة** فإن النشاط الإشعاعي يؤرّخ عملية التحوّل لا نشأة الصخر الأصلي؛ لأن عوامل التحوّل تفتح النظام الإشعاعي ما يؤدي إلى خروج (هروب) كلا النظيرتين؛ الأم أو الوليدة، ودخولهما إلى معدِن آخر في أثناء عملية التحوّل. وتوقّف عملية التحوّل يعني إغلاق النظام الإشعاعي، وبدء الساعة الإشعاعية عملية العدّ لتسجيل حادثة التحوّل.

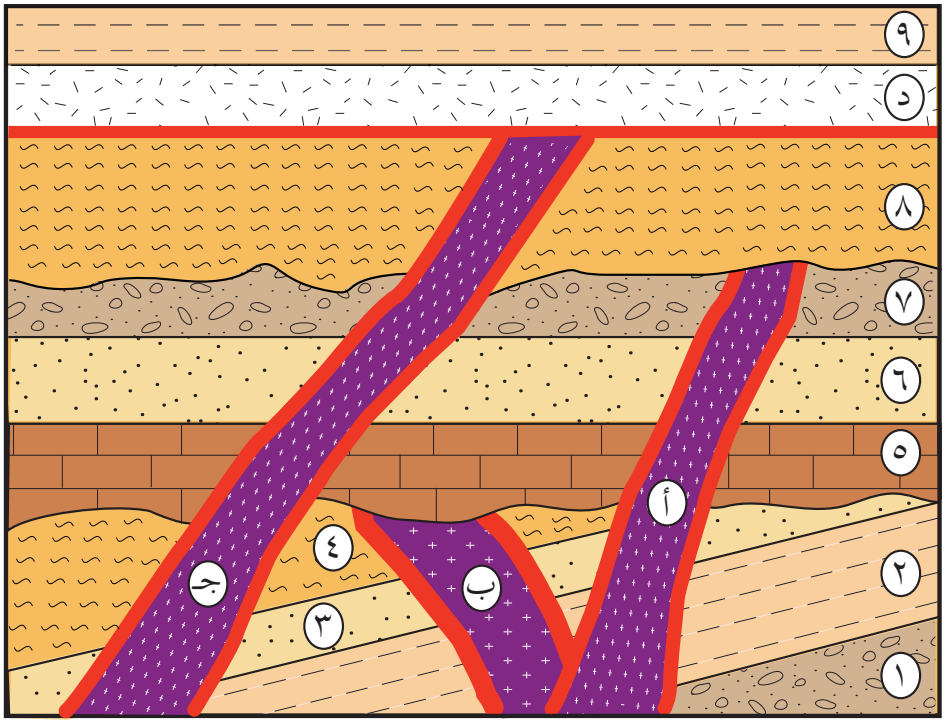
ويصعُب استخدام التأريخ الإشعاعي في الصخور الرسوبية الفتاتية؛ لأن النظام الإشعاعي في معادنها يبقى مغلقًا، ولا تتوقّف الساعة الإشعاعية عن العدّ؛ لذا، فإن تقدير عمر الصخر الرسوبي الفتاتي يُعطي عمر الصخر الأصلي الذي أُخذت منه المعادن. أما **الصخور الرسوبية الكيميائية**، فيُصبح النظام الإشعاعي فيها مغلقًا لحظة حدوث الترسيب؛ لذا، فإنه يؤرّخ عمر الرسوبيات قبل التصخُّر فقط، أي يُعطي عمرًا أكبر من عمر الصخر الرسوبي. وتُستخدم طريقة الكربون – نيتروجين ($^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N$) في تأريخ أعمار **الصخور الرسوبية العضوية** بشرط ألا تزيد على ٧٠ ألف سنة، ومن أمثلتها: الصخر الجيري العضوي، والشعاب المرجانية.

٣- إعطاء الأعمار النسبية أعمارًا مطلقة

كيف تمكّن العلماء من إعطاء أعمار مطلقة للصخور الرسوبية؟ لمعرفة ذلك، ادرس المثال الآتي:

مثال (٦)

يوضّح الشكل (٣-٢٩) تتابعات من صخور رسوبية (١، ٢، ٣، ٤، ٥، ٦، ٧، ٨، ٩)، وقواطع نارية (أ، ب، جـ) وطفح بركاني (د) أعمارها على الترتيب (٥٠، ٨٠، ٣٠، ٢٠) مليون سنة. ادرس الشكل جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣-٢٩): مثال (٦).

١- رتّب الأحداث الجيولوجية من الأقدم إلى الأحدث.

٢- أعطِ الطبقات الرسوبية أعمارًا مطلقة.

٣- ما عدد سطوح عدم التوافق؟ وما عدد التعاقبات الرسوبية؟

٤- ما الدليل على أن الطفح البركاني (د) أحدث من الطبقة (٨)؟

الحل:

١- ترسّبت الطبقات (١، ٢، ٣، ٤) أفقيًّا. ومن ثمّ، تعرّضت لعمليات تكتونية أدّت إلى ميلانها، ثمّ جاء القاطع الناري (ب) وقطع الطبقات جميعها، ثمّ ترسّبت الطبقات (٥، ٦، ٧) ثمّ قُطعت بالقاطع الناري (أ)، ثمّ ترسّبت الطبقة (٨)، ثمّ قُطعت بالقاطع الناري (جـ)، ثمّ تعرّضت المنطقة إلى الطفح البركاني (د)، وانتهت بترسيب الطبقة (٩).

٢-

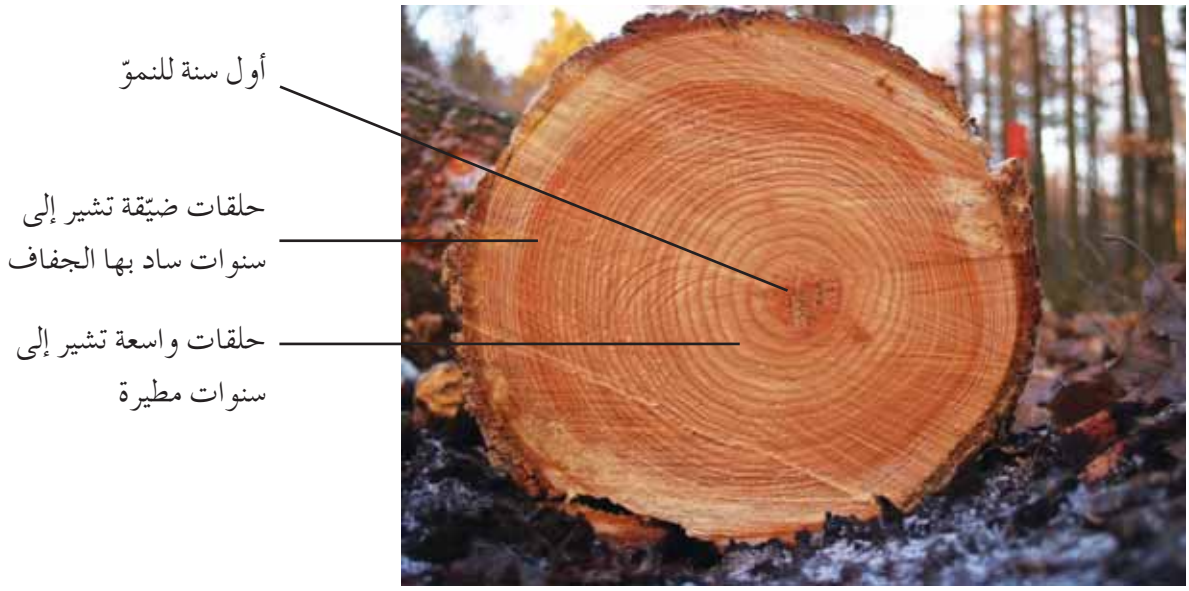
١ (الأقدم)	٢	٣	٤	ب	٥	٦	٧	أ	٨	جـ	د	٩ (الأحدث)
عمر هذه الطبقات أكبر من (٨٠) مليون سنة				(٨٠) مليون سنة	عمر هذه الطبقات يتراوح بين (٥٠-٨٠) مليون سنة			(٥٠) مليون سنة	عمر هذه الطبقة يتراوح بين (٣٠-٥٠) مليون سنة	(٣٠) مليون سنة	(٢٠) مليون سنة	عمر هذه الطبقة أقل من (٢٠) مليون سنة

٣- يوجد (٣) سطوح عدم توافق، و (٤) تعاقبات رسوبية.

٤- الطفح البركاني (د) أحدث تحوّلًا تماسيًّا في الطبقة (٨). ومن ثمّ، يكون أحدث منها.

سابعًا: التأريخ بحلقات الأشجار (Dendrochronology Dating)

إذا نظرنا إلى جذع شجرة مقطوعة، سنرى أنه يتكوّن من سلسلة من حلقات متّحدة المركز، لاحظ الشكل (٣-٣٠). وفي المناطق المعتدلة وفي كل سنة، تتكوّن حلقة من الخشب الثانوي الجديد، وتعكس خصائص كل حلقة من حيث الحجم والكثافة، الظروف البيئية (خاصة المناخ) التي سادت في أثناء السنة التي تشكّلت بها الحلقة. وفي السنوات المطيرة تنتج حلقات واسعة، أما السنوات التي يسود بها الجفاف فتنتج حلقات ضيقة، كما هو موضّح في الشكل (٣-٣٠).

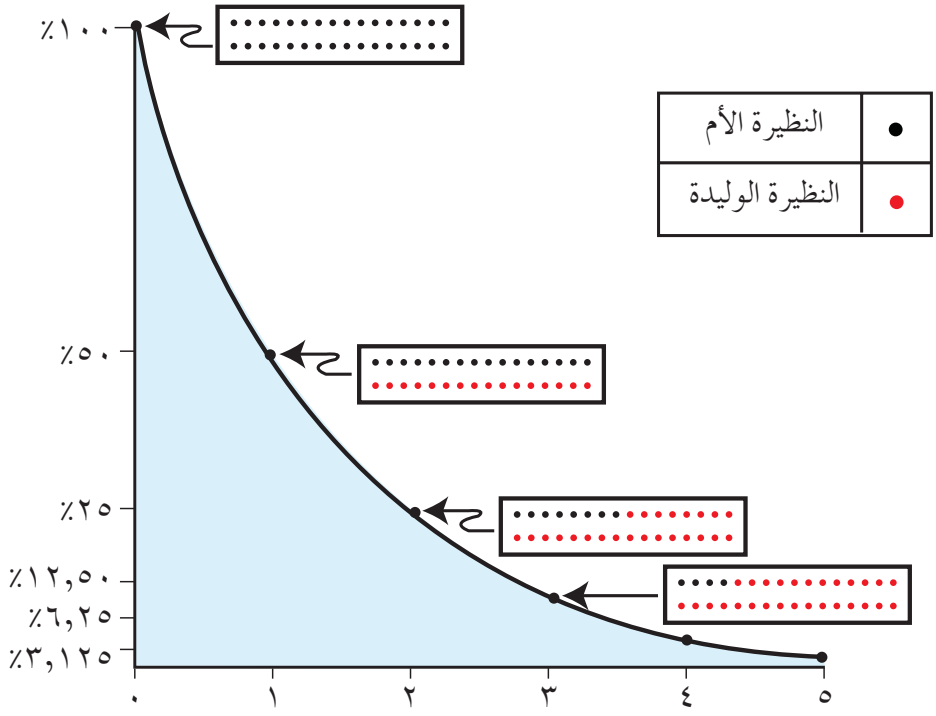


الشكل (٣–٣٠): التأريخ بحلقات الأشجار، حيث تنمو حلقة جديدة من الخشب الثانوي في كل سنة، وبدراستها يتم الحصول على معلومات قيّمة حول المناخ القديم.

وإذا تمكنّا من تحديد السنة التي قُطعت بها الشجرة، أمكننا معرفة عمر الشجرة والسنة التي شكّلت كل حلقة، ويمكن أن يُستخدم هذا الإجراء من أجل تحديد أعمار الأحداث الجيولوجية في التاريخ الحديث. على سبيل المثال، يمكن معرفة الحدّ الأدنى لعدد السنوات منذ تشكّل سطح الأرض الجديد فوق انهيار أرضي أو الفيضانات.

ويقدّم التأريخ بحلقات الأشجار معلومات قيّمة حول البيئة والمناخ من حيث معدّلات الهطل ودرجات الحرارة التي كانت سائدة قديمًا. وهو علم في غاية الأهمية لعلماء المناخ القديم، والتبيؤ والآثار.

١- يوضّح الشكل (٣-٣١) تناقص عدد ذرات النظيرة الأم مع مرور الزمن. ادرسه جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣- ٣١): السؤال (١).

أ - ماذا يُسمّى المنحنى الظاهر في الشكل؟

ب- علامَ يدلّ كل من؛ المحورالسيني والمحور الصادي؟

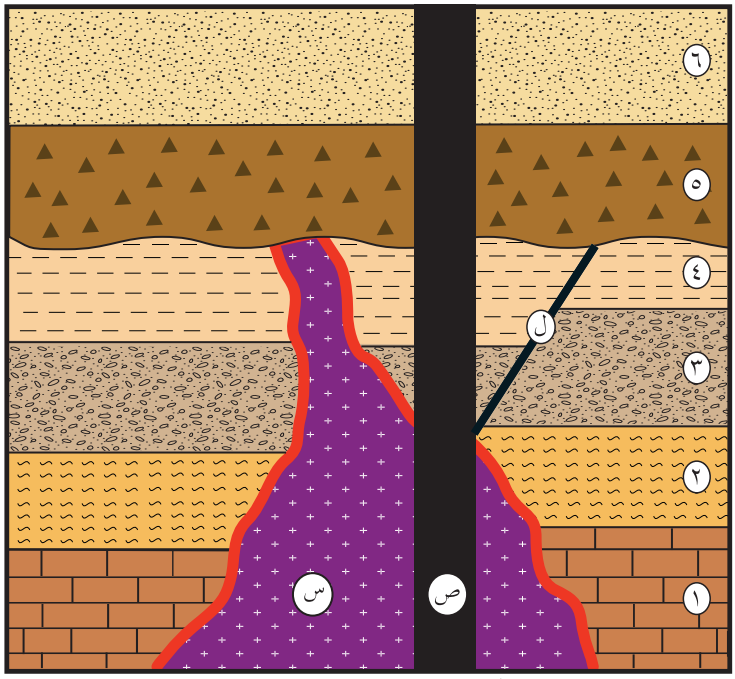
جـ- ما عدد ذرات النظيرة الأم الأصلية (م) في الشكل؟

د - ما عدد ذرات النظيرة المتبقية (م) وعدد ذرات النظيرة الوليدة (و) بعد عمر النصف الأول؟

هـ - صِفْ المنحنى الظاهر في الشكل؛ هل هو أسّي أم خطّي؟ وما علاقته مع الزمن؟

و - إذا أردنا أن نبني منحنى يُمثّل عدد ذرات النظيرة الوليدة، فكيف سيكون شكل المنحنى؟ وما اسمه؟

٢- يوضّح الشكل (٣-٣٢) طبقات من الصخور الرسوبية (١، ٢، ٣، ٤، ٥، ٦)، وقواطع نارية (س، ص)، والصدع (ل). ادرسه جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣-٣٢): السؤال (٢).

أ - رتّب الأحداث الجيولوجية (٣، ١، ٤، ٢، ٦، ٥، ص، ل، س) من الأقدم إلى الأحدث، ذاكرًا المبادئ التي اعتمدت عليها.

ب- ما عدد سطوح عدم التوافق؟ وما نوعها؟

جـ- ما عدد التعاقبات الرسوبية؟

د - إذا علمت أن عمر القاطع (ص) يساوي (٣٠) مليون سنة وعمر القاطع (س) يساوي (٣٥) مليون سنة؛ فما العمر المطلق للطبقة (٥)؟

٣- اعتمادًا على الجدول الآتي، أجب عما يأتي:

الجدول (٣-١): السؤال (٣).

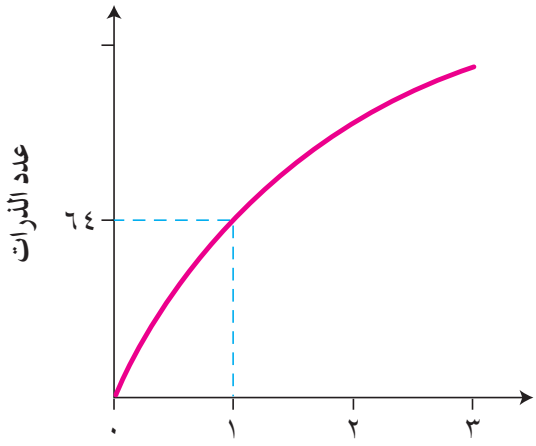
النظيرة	أ	ب	جـ	د
عمر النصف (سنة)	٤٠	١٠٠	٥٧٠٠	$٤,٦ \times ١٠^{٩}$

أ - أيُّ النظائر يُعدّ الأنسب لقياس عمر الأرض؟

ب- أيُّ النظائر يُعدّ الأنسب لقياس عمر العصور التاريخية (الآثار)؟ لماذا؟

جـ- إذا بدأت عينة عدد ذراتها (١٦) ذرة من النظيرة (ب) بالتحلّل، فما عمر العينة عندما يتبقّى من النظيرة ذرة واحدة؟

٤– ادرس الشكل (٣–٣٣)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣– ٣٣): السؤال (٤).

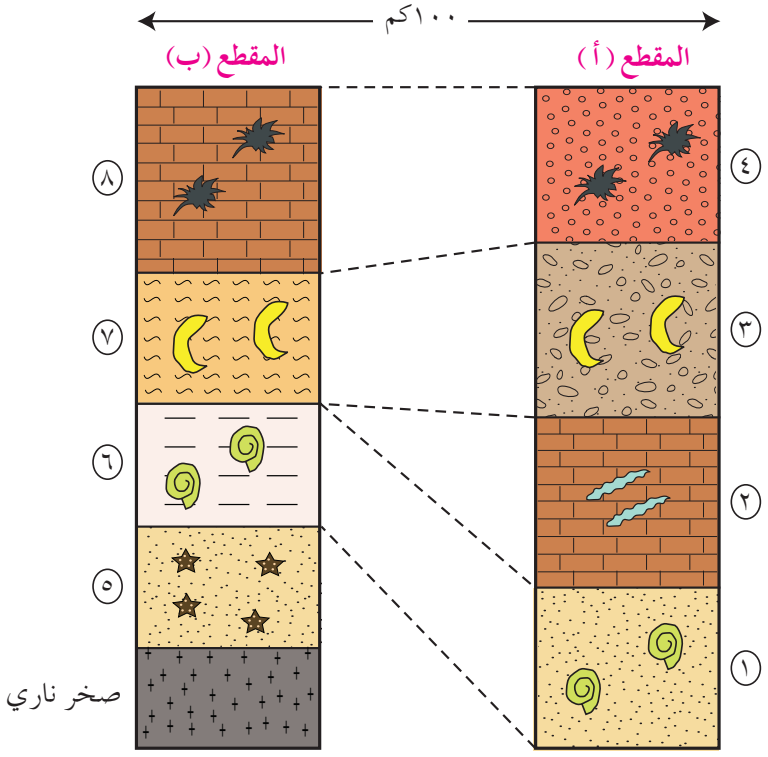
أ – ماذا يُسمّى المنحنى في الشكل؟

ب– كم عدد ذرات النظيرة الأم ؟

جـ– كم عدد ذرات كل من النظيرة الأم المتبقية والنظيرة الوليدة بعد (٣) فترات عمر نصف؟

د – إذا تبقّى بعد زمن (٦٣) مليون سنة ذرّتان من دون تحلّل، فكم عمر النصف؟

٥– يُمثّل الشكل (٣–٣٤) مقطعين صخريين أجريت بينهما مضاهاة. ادرسه جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٣– ٣٤): السؤال (٥).

أ – ما نوع المضاهاة المستخدمة بين المقطعين؟ فسّر إجابتك.

ب– حدّد مكان انقطاع الترسيب.

جـ– ما عدد سطوح عدم التوافق؟ حدّد موقعها.

د – هل تُعدّ الطبقة (١) امتدادًا للطبقة (٦)؟ لماذا؟

الوَحْدة الرابعة

٤

الجيولوجيا الاستكشافية وجيولوجية الأردن

(Geological Exploration and Geology of Jordan)

النتاجات

يُتوقّع منك في نهاية هذه الوَحْدة، أن تكون قادرًا على أن:

- تشرح مبادئ الاستكشاف الجيولوجي ومراحله.
- تُميّز طرائق الاستكشاف المباشر، من طرائق الاستكشاف غير المباشر.
- تستطيع التنبّؤ بوجود الخام وطبيعته؛ اعتمادًا على بيانات جيوفيزيائية وجيوكيميائية.
- تتعرّف أهم الأحداث الجيولوجية التي مرّ بها الأردن في أثناء مراحل التطوّر الجيولوجي له.
- توظّف خريطة الأردن الجيولوجية، في تعرّف توزيع صخور الأحقاب الجيولوجية المتكشّفة في الأردن.
- تُفسّر نشأة المظاهر الجيولوجية ذات الأهمية السياحية (وادي رم، والبحر الميت، ومدينة البترا الوردية، ومحمية ضانا).
- تقدّر الجهود التي تقوم بها الجهات الرسمية، في توفير بيانات جيولوجية لغايات الاستثمار.
- تُكبِر دور الجيولوجي وعلم الجيولوجيا في رفد الاقتصاد الوطني.

قال الله تعالى:

﴿ فَأَمَّا ٱلزَّبَدُ فَيَذۡهَبُ جُفَآءٗۖ وَأَمَّا مَا يَنفَعُ ٱلنَّاسَ فَيَمۡكُثُ فِي ٱلۡأَرۡضِۚ ﴾

(سورة الرعد، الآية ١٧).

يوجد في الأردن الكثير من الموارد المعدِنية، حيث يتم التنقيب عنها واستكشافها من أجل استخدامها في نواحي الحياة المختلفة. ومن الأمثلة على الموارد المكتشفة في الأردن، الفوسفات والصخر الزيتي واليورانيوم والنحاس ورمل الزجاج وغيرها.

- فكيف يتم استكشاف المناطق الواعدة؟ وما التقنيات المستخدمة في عمليات التنقيب والاستكشاف؟ وكيف يمكن الاستفادة منها؟
- وكيف تطوّر الأردن جيولوجيًّا عبر الأزمنة الجيولوجية؟ وما علاقة ذاك التطوّر بوجود الموارد المعدِنية في البيئة الأردنية؟ وما دور الجيولوجي في استكشاف الموارد المعدِنية ورفد الاقتصاد الوطني؟

الفصل الأول

التنقيب والاستكشاف الجيولوجي
(Geological Prospecting and Exploration)

لموارد الأرض وثرواتها المعدِنية عظيم الأثر في تنمية المجتمعات وظهور الحضارات، أينما أحسن الانسان استغلالها وتوظيفها في خدمة البشرية، تحقيقًا لعمارة الأرض على الوجه الأكمل. وعليه، فإن البحث عن هذه الثروات المعدِنية واستغلالها أمر في غاية الأهمية.

أولًا: التنقيب والاستكشاف

توجد الخامات على أعماق مختلفة من سطح الأرض. وقد ينتشر بعضها على مساحات واسعة، بينما يقتصر وجود خامات أخرى على مساحات صغيرة محدودة. فما الخام؟ وكيف يتم البحث عنه؟ وما طرائق تعدينه؟

يُعرف **المورد المعدِني** (Mineral Resource) بأنه تجمّع معدِني يوجد في الطبيعة قابل للاستغلال، وهو مكوّن من معدِن أو مجموعة معادن. وعندما تتوافر الظروف بحيث يمكن استغلاله لدى توافره بكميات ذات جدوى اقتصادية، يُطلق عليه اسم **الخام** (Ore). ويتم البحث عن الموارد المعدِنية والخامات، عن طريق التنقيب والاستكشاف. حيث تتم **عملية التنقيب** (Prospecting) بالبحث غير التفصيلي عن الموارد المعدِنية، بطرائق مباشرة أو غير مباشرة لتحديد مواقعها وتوضّعاتها في باطن الأرض. ويعقُب عملية التنقيب عملية أخرى هي **الاستكشاف** (Exploration) عن طريق البحث التفصيلي المنظّم عن الخامات في المناطق التي أفرزتها عمليات التنقيب.

يمتاز الأردن بوجود الكثير من الموارد المعدِنية بما فيها الخامات الفلزية، مثل خامات الحديد والنحاس، والخامات اللافلزية مثل الفوسفات، والصخر الجيري النقي، والصخر الزيتي. انظر الشكل (٤-١).

الشكل (٤–١): خام الصخر الزيتي (الطبقات السوداء) في منطقة السلطاني شرق الكرك في وسط الأردن.

ثانيًا: مبادئ الاستكشاف الجيولوجي

يكلّف الاستكشاف الجيولوجي الكثير من الوقت والجهد والمال؛ لذا، فلا بد من اتباع أساليب منظمة للوصول إلى أماكن الخام بأقصر الطرائق وأقل النفقات. وتعتمد عمليات الاستكشاف الجيولوجي على مجموعة من المبادئ على النحو الآتي:

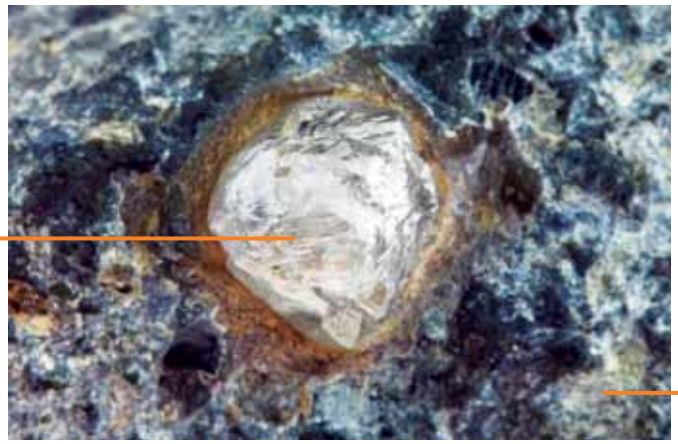
١– الوضع الجيولوجي المناسب لتكوّن الخام

يوجّه الاستكشاف الجيولوجي نحو أهداف جيولوجية محدّدة بدراسة الوضع الجيولوجي المناسب لتكوّن الخام، الذي يعتمد على معايير عدّة، منها الوضع التكتوني والتركيبي للخام، ونوع الصخور الحاوية للخام، والعصر الجيولوجي. وسندرسها بشيء من التفصيل كالآتي:

أ – **الوضع التكتوني والتركيبي للخام:** توجد علاقة بين توضّع بعض الخامات وحدود الصفائح، ومن أفضل الأمثلة على ذلك، موارد النحاس التي توجد أعظم مناجمه في تشيلي (غرب أمريكا الجنوبية)، حيث حدود الصفائح المتقاربة (حدود الغوص)، انظر الشكل (٤–٢). وفي المناطق التي تنتشر فيها التراكيب الجيولوجية مثل الصدوع والفواصل، وذلك لأنها تُسهّل حركة المحاليل الحرّمائية الحاملة لأيونات الخام، وتُمثّل أماكن مناسبة لترسيب حمولة هذه المحاليل من الموارد المعدِنية.

الشكل (٤–٢): انتشار توضّعات النحاس في تشيلي (غرب أمريكا الجنوبية) عند حدود الصفائح المتقاربة، عند غوص صفيحة محيطية تحت صفيحة قارية.

ب– نوع الصخور الحاوية للخام: توجد بعض الخامات في صخور معيّنة دون غيرها، فالزيولايت يوجد في صخور التفّ البركاني المجوّى، ويوجد اليورانيوم بنسب مرتفعة في صخور الفوسفات، والألماس يوجد في صخور الكمبرلايت (وهو أحد الصخور النارية، الذي يتكوّن على عمق بين (١٥٠–٢٠٠) كم تحت سطح الأرض، وهو العمق الذي يتشكّل عنده الألماس، حيث قيم الضغط المرتفعة)، انظر الشكل (٤–٣)؛ لذا، فعند البحث عن خام محدّد، نلجأ إلى البحث عن الصخر المناسب لتكوّنه.



الشكل (٤–٣): صخر كمبرلايت يحتوي على قطعة من الألماس.

جـ– العصر الجيولوجي: تميّزت بعض العصور الجيولوجية بانتشار كبير لخامات محدّدة تعود إلى الظروف والبيئات الجيولوجية التي كانت سائدة في ذلك العصر. فأفضل العصور للبحث عن الفحم الحجري هو العصر الكربوني؛ وذلك بسبب انتشار السرخسيات في بيئة المستنقعات، ووجود القارات على دائرة الاستواء. كذلك يتم البحث عن خامات الفوسفات في مناطق الشرق الأوسط وشمال إفريقيا في الصخور التي تُمثّل الفترة الممتدة بين العصر الكريتاسي الأعلى وبداية العصر الثلاثي، حيث غمر محيط التيثس تلك المناطق.

٢– الخصائص الفيزيائية والكيميائية للخامات

يمتاز كل خام بخصائص فيزيائية وكيميائية خاصة به، يجدر معرفتها لتحديد الوسائل المناسبة لاستكشافه؛ لذا، لا بد من معرفة خصائص الخام الفيزيائية والكيميائية عند توجيه الاستكشاف للبحث عن خامات محدّدة. فمثلًا عند البحث عن خامات الحديد تحت سطح الأرض، لا بد من توظيف الخصائص المغناطيسية لاستكشافه؛ لأن للحديد قابلية عالية للتمغنط تؤثّر في قيم المجال المغناطيسي الأرضي لدى قياسها، تختلف عن قيم المغناطيسية الأرضية المحيطة بالخام. وعند البحث عن خام الذهب؛ فإن خاصيتَي إيصال الكهرباء والكثافة العالية هما الأجدر في تمييز الذهب عمّا حوله من صخور. ومن المهم دراسة حركة العناصر وتوزّعهاوتركيزها في القشرة الأرضية، وتحديد أسباب تجمّع عناصر معيّنة وتَرافقِها في فلزات معيّنة، وتبعثرها في فلزات أخرى.

يهدف كل من التنقيب والاستكشاف الجيولوجي إلى تحديد المواقع الجديرة بالبحث عن الخامات. ويتم ذلك بالاستكشاف غير المباشر، أو الاستكشاف المباشر.

١- الاستكشاف غير المباشر (التنقيب)

قد تكون **الخريطة الجيولوجية** (Geologic Map) أهم الطرائق الأولية غير المباشرة في الاستكشاف، لأنها تضمّ معلومات عن أنواع الصخور وأعمارها والصدوع والطيات الموجودة في المنطقة، وكلها عوامل مهمة في تحديد وجود الخام أو عدم وجوده.

٢- الاستكشاف المباشر

يتوجّه الجيولوجي إلى المواقع المختارة بعد عملية تحليل البيانات المُستقاة من مرحلة الاستكشاف غير المباشر؛ لإجراء الفحص الميداني الدقيق، الذي يؤكّد أو ينفي وجود موارد معدِنية. فما طرائق الاستكشاف المباشر؟

يستخدم الجيولوجي في عمله إحدى الطريقتين الآتيتين: الاستكشاف الجيوفيزيائي، أو الاستكشاف الجيوكيميائي، بحيث يوظّف الخصائص الفيزيائية أو الكيميائية للمورد المعدِني أو للصخور المضيفة (Host Rocks)؛ وهي الصخور التي تحمل الخام وتستضيفه.

أ- **الاستكشاف الجيوفيزيائي:** يعتمد **الاستكشاف الجيوفيزيائي** (Geophysical Exploration)، على الاختلاف في الخصائص الفيزيائية للخامات عن الصخور التي حولها، مثل القابلية للتمغنط، والمقاومية الكهربائية، والكثافة، والمرونة وغيرها. فيُسمّى المسح مغناطيسيًّا، إذا كانت خاصية القابلية المغناطيسية هي التي تجري دراستها، وإذا كانت الخاصية التي يقيسها هي المقاومية الكهربائية، فيتمّ المسح بالطريقة الكهربائية.

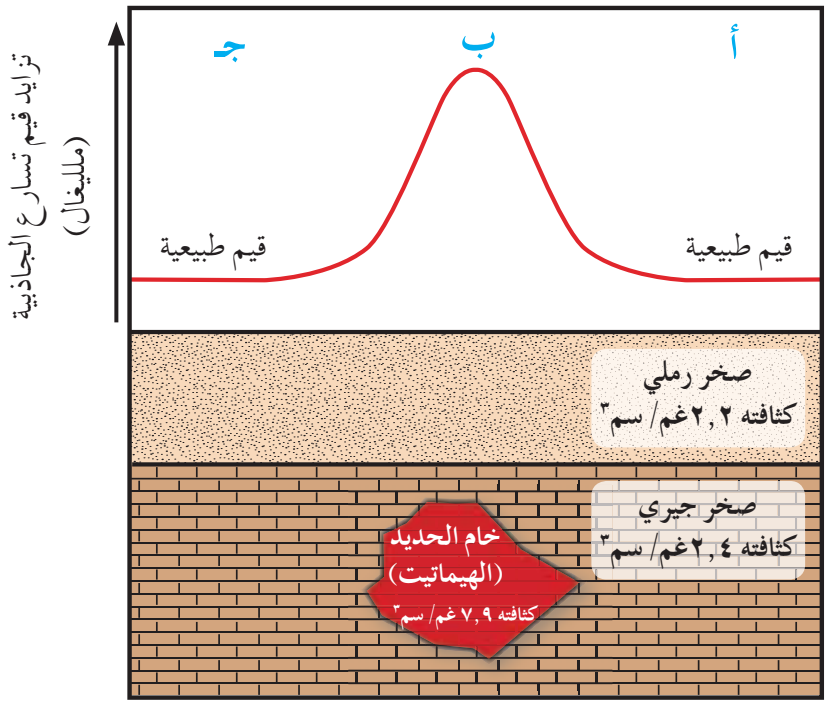
وتُسمّى القيم غير الطبيعية المختلفة عمّا حولها التي يتمّ تسجيلها **الشواذ الجيوفيزيائية** (Geophysical Anomalies)، أما القيم الجيوفيزيائية العادية في المنطقة فتُسمّى **القيم الجيوفيزيائية الطبيعية** (Geophysical Background).

ومن طرائق البحث عن الخامات طريقة الجاذبية، حيث يقيس الجيولوجي قيم الجاذبية الأرضية في منطقة الدراسة بواسطة جهاز شديد الحساسية للتغيّر في قيم تسارع

الجاذبية الأرضية يُسمّى **جهاز مقياس الجاذبية** (Gravimeter). ولمعرفة كيفية تحديد أماكن وجود القيم الشاذّة؛ نفّذ النشاط (٤–١).

٤–١ نشاط تحليلي: الاستكشاف الجيوفيزيائي

في الشكل (٤–٤)، قيست قيم الجاذبية في ثلاثة مواقع مختلفة. ادرس الشكل جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٤–٤): المسح الجاذبي الذي يوضّح قيم تسارع الجاذبية لشاذّة جاذبية عمّا حولها، سبَّبها وجود خام ذي كثافة عالية تحت سطح الأرض وهو خام الحديد (الهيماتيت).

١– ماذا تلاحظ على قيم تسارع الجاذبية في الشكل؟

٢– أيُّ المواقع الثلاثة سُجّلت قيم تسارع جاذبية أعلى فيها؟

٣– ما سبب ارتفاع قيمة تسارع الجاذبية في الموضع الذي حدّدته في إجابة السؤال السابق؟

٤– ما نوع الشاذّة الجيوفيزيائية الموجودة في الشكل؟

لاحظت من الشكل (٤–٤)، أن قيم تسارع الجاذبية كانت طبيعية عند الموقعين (أ) و(جـ)، أما الموقع (ب) فسجّل وجود شاذّة جاذبية بسبب وجود خام الحديد (الهيماتيت) تحته. وبما

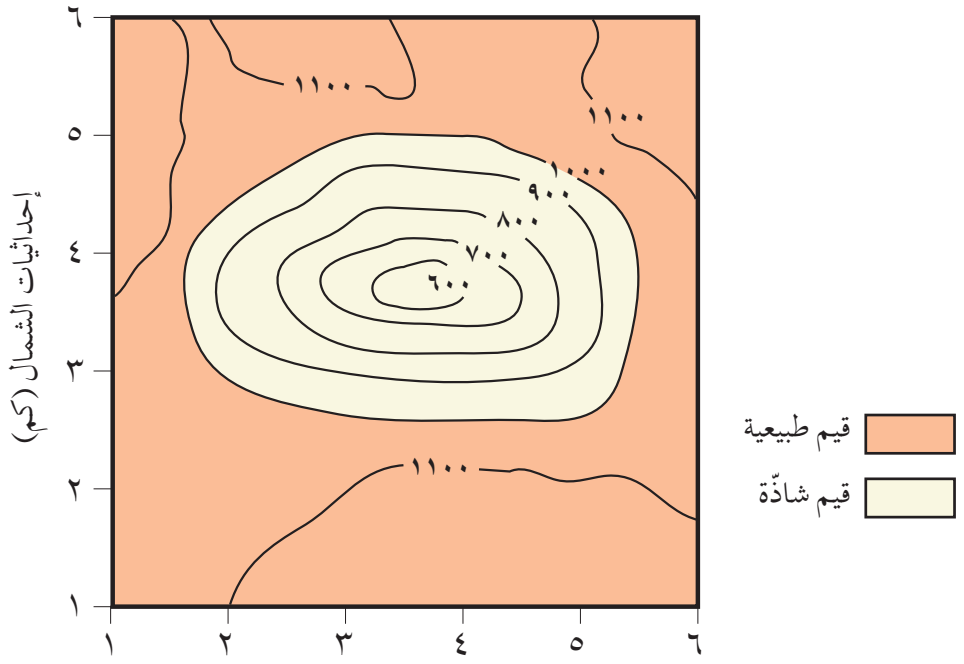
أن كثافة الهيماتيت أعلى من كثافة الصخور المحيطة، كانت قيم تسارع الجاذبية أكبر من القيم الطبيعية في المنطقة ولذلك فهي تُدعى **شاذّة جاذبية موجبة**.

اختبر معلوماتك

هَبْ مثلًا وجود خام ملح صخري سميك في وسط حوض رسوبي. هل تتوقّع إذا تم مسحه جاذبيًّا أن تحصل على شواذ سالبة أم موجبة؟ لماذا؟

وعند الانتهاء من المسح الجيوفيزيائي، تبدأ مرحلة تفسير النتائج بإعداد خرائط كنتورية للقيم المَقيسة. ثمّ تُحصَر المساحات التي تشغلُها القيم الجيوفيزيائية الشاذّة وتُحدّد، كما في الشكل (٤–٥). ثمّ يعقب ذلك الانتقال إلى مرحلة الاستكشاف التفصيلي.

والآن، ادرس الشكل (٤–٥)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٤–٥): خريطة كنتورية تُبيّن شاذّة كهربائية سالبة، وتُقاس بوَحْدة (أوم. متر).

- ما القيم الطبيعية في المنطقة؟ وما القيم الشاذّة؟
- أين تتوقّع وجود الخام؟

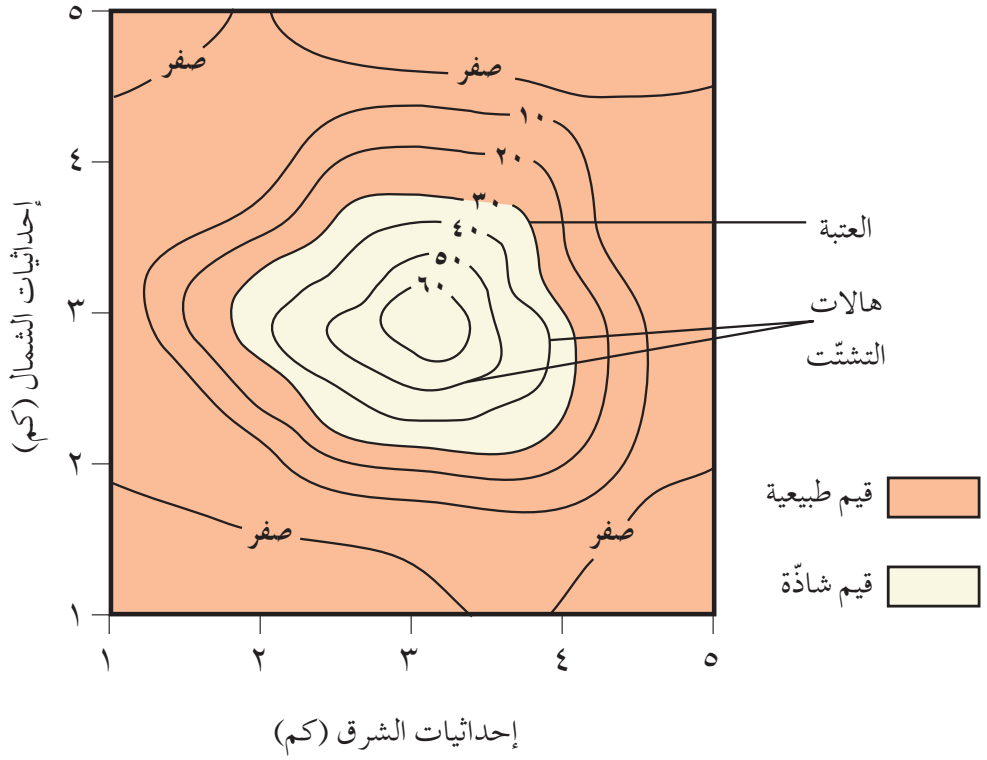
• ما نوع الشاذّة الجيوفيزيائية؟

توجد القيمة الشاذّة في الشكل (٤–٥) ضمن خطوط الكنتور، التي تقلّ قيمها عن ١٠٠٠ أوم. متر، وهي المنطقة المحتملة لوجود الخام.

ب– الاستكشاف الجيوكيميائي: توجد بعض الخامات المعدِنية ذات القيمة الاقتصادية بتراكيز منخفضة جدًّا مثل الذهب، وبالتالي تكون الطرق الجيوفيزيائية غير مجدية لاستكشافه؛ إلا إذا وجد بمساحة صغيرة وتراكيز عالية مثل وجوده ضمن قاطع ناري فيسهل استكشافه بالطرق الجيوفيزيائية. لذا، يجري الكشف عنها ودراسة توضّعها بواسطة الاستكشاف الجيوكيميائي.

يُستخدم **الاستكشاف الجيوكيميائي** (Geochemical Exploration) للبحث عن الموارد المعدِنية، اعتمادًا على الخصائص الكيميائية للمورد المعدِني وللصخر المضيف. حيث تكون القيم الكيميائية المَقيسة عند الصخر المضيف أعلى من القيم الكيميائية الطبيعية دائمًا. وتُسمّى الشواذّ في هذه الحالة **شواذّ جيوكيميائية** (Geochemical Anomalies).

والآن، ادرس الشكل (٤–٦) جيدًا، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.



الشكل (٤–٦): خريطة كنتورية أُعدت باستخدام تقنية المسح الجيوكيميائي، تُبيّن توزيع تراكيز النحاس (جزء بالمليون) في إحدى المناطق.

- ما القيم الطبيعية لتركيز النحاس في المنطقة؟ وما القيم الشاذّة فيها؟
- ما القيمة التي يحدث عندها تغيّر من القيم الطبيعية إلى القيم الشاذّة؟ وماذا تُسمّى؟

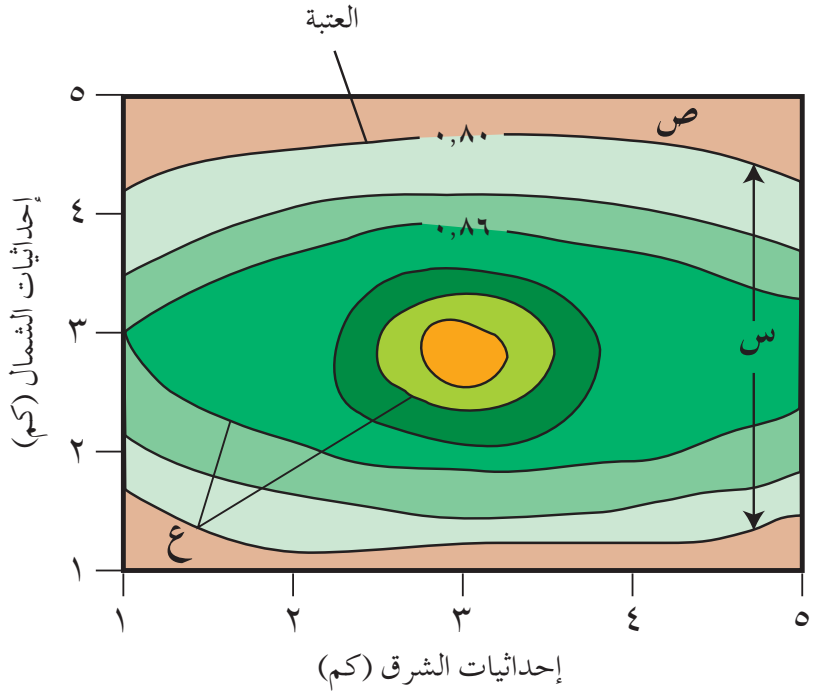
تؤدي عمليات التجوية والتعرية إلى نقل الخام المتكشّف على سطح الأرض، أو على أعماق ضحلة إلى المواقع المجاورة لموقع الخام، ما يؤدي إلى انتشاره في مناطق أوسع. يُطلق على عملية الانتشار هذه **التشتّت الجيوكيميائي** (Geochemical Dispersion)، ويكون الانتشار على شكل هالات تحيط بالخام تُسمّى **هالات التشتّت** (Dispersion Halos)، انظر الشكل (٤–٦). وتتناقص قيم الشواذ الجيوكيميائية كلما ابتعدنا عن مركز توضّع الخام، حتى تصبح القيم مساوية للقيم الطبيعية في المنطقة. وتُسمّى القيمة التي يحدث عندها تغيّر من القيم الطبيعية إلى القيم الشاذّة **العتبة** (Threshold).

ترافق الخامات بعض العناصر المصاحبة لها، التي تتشكّل معها في الوقت نفسه، ومن ثمّ تصاحبها، وتُسمّى **العناصر الدالّة** (Pathfinders). ومن العناصر الدالّة على وجود خام الذهب عناصر النحاس والكبريت والزئبق والفضة. ويجب أن يكون للعناصر الدالّة هالات تشتّت واسعة وعالية جدًّا.

بعد أخذ القراءات الجيوكيميائية، تُفسّر باتباع طرائق مختلفة منها: رسم الخرائط الكنتورية، التي تُحدّد تراكيز الخام. ومن ثمّ، تحديد المساحات التي تتوزّع فيها الشواذ الجيوكيميائية.

١- وضّح المقصود بكل مما يأتي: الاستكشاف، والشواذ الجيوفيزيائية، والعتبة، والشواذ الجيوكيميائية، والاستكشاف الجيوفيزيائي.

٢- يُمثّل الشكل (٤-٧)، خريطة كنتورية لتراكيز خام ما مَقيسة بالنسبة المئوية (٪) بإحدى طرائق الاستكشاف الجيوكيميائي لمنطقة ما. ادرسه جيدًا، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.



الشكل (٤-٧): السؤال (٢).

أ - ماذا تُمثّل كل من الرموز الآتية: (س، ص، ع)؟

ب- أين يوجد الخام بتراكيز اقتصادية؟

٣- فسّر ما يأتي تفسيرًا علميًّا دقيقًا:

أ - تزداد احتمالية وجود الخامات في مناطق الصدوع.

ب- توجد هالات التشتّت في المواقع المحيطة بالخام.

جـ- يوجد الألماس ضمن صخور الكمبرلايت.

٤– أ – متى نلجأ لاستخدام المسح الجيوكيميائي؟

ب– ما المقصود بالعناصر الدالّة؟ وكيف تظهر في الصخر المُضيف؟

٥– في أثناء المسح الجيوكيميائي لمنطقة ما، يتكشّف فيها صخر رسوبي يحوي شواهد على وجود النحاس، أُخذت القيم التي تُمثّل النسبة المئوية لتركيز النحاس في خمسة مواقع مختلفة، كما هو موضّح في الجدول (٤–١)، علمًا بأن قيمة العتبة لخام النحاس ٠,٥٪. ادرس البيانات الواردة في الجدول، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.

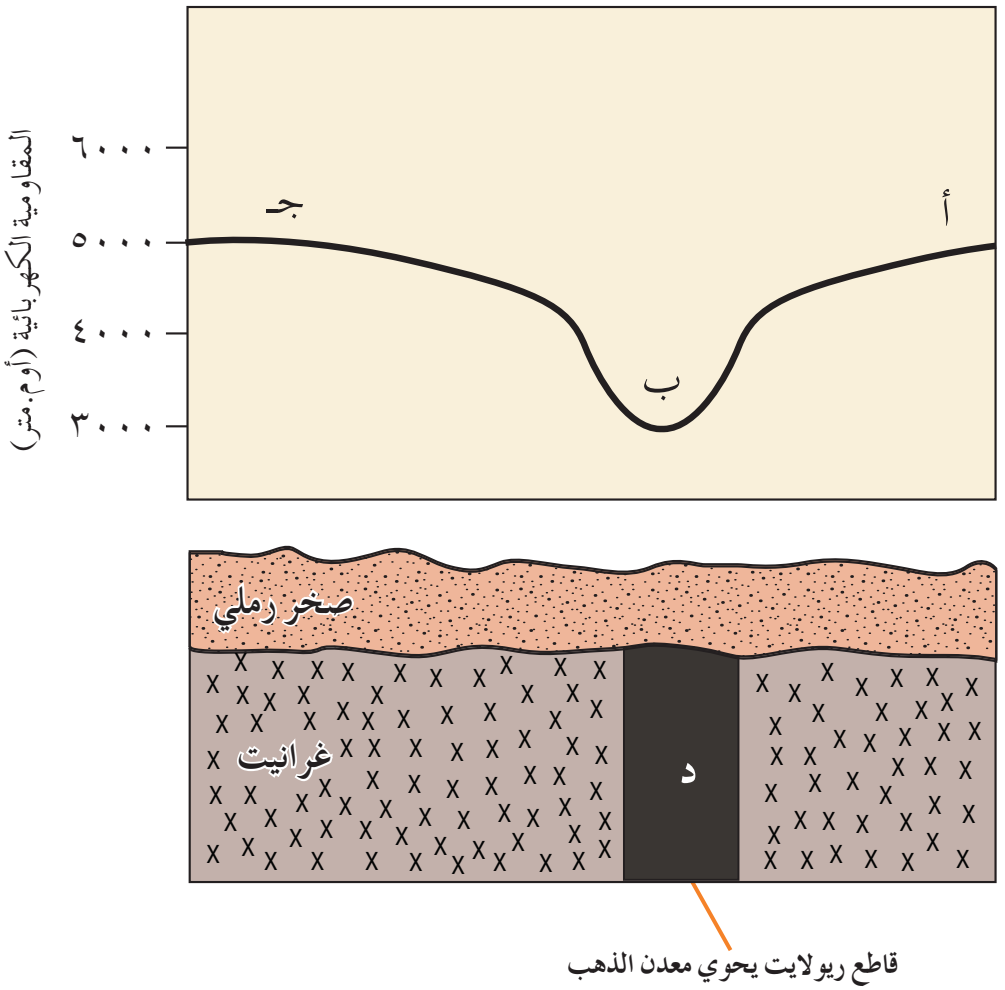
الجدول (٤–١): السؤال (٥).

الموقع	النسبة المئوية (٪)
أ	٠,١٠
ب	٠,٦٢
جـ	٠,٢٠
د	٠,٠٥
هـ	٠,٧٨

أ – ما رمز الموقع الذي يوجد فيه خام النحاس بتراكيز اقتصادية؟

ب– ما رمز الموقع الذي يوجد فيه خام النحاس بتراكيز غير اقتصادية؟

٦- يوضّح الشكل (٤-٨) شواذ جيوفيزيائية كُشِف عنها باستخدام طريقة مسح المقاومية الكهربائية. ادرسه جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٤-٨): السؤال (٦).

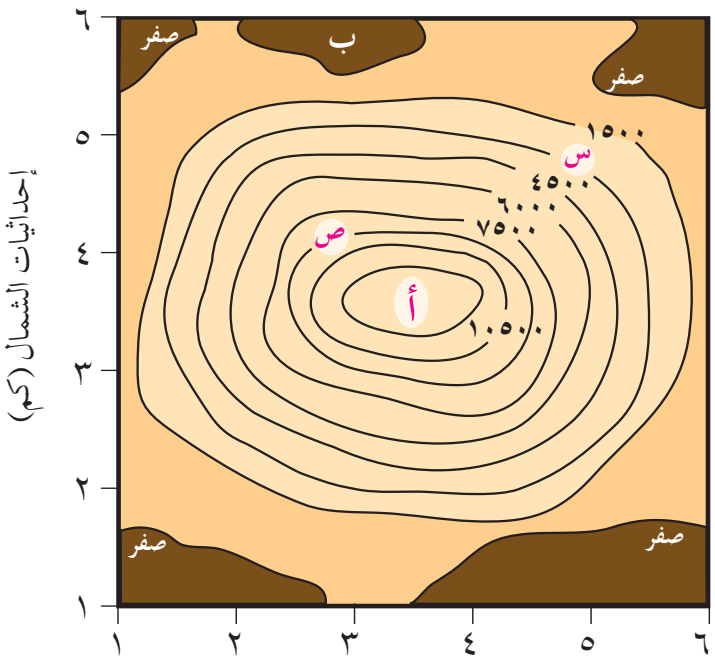
أ - ما الرمز الذي يُمثّل:

- قيمة كهربائية طبيعية.
- شاذّة كهربائية.
- موقع محتمل لوجود الخام.

ب- ما نوع الشاذّة الكهربائية؟

جـ- هل يتحتّم ظهور الخام على السطح عند الاستكشاف الجيوفيزيائي؟ لماذا؟

٧– يوضّح الشكل (٤–٩) خريطة كنتورية لقيم مغناطيسية في أثناء المسح الجيوفيزيائي لمنطقة ما، ادرسه جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٤–٩): السؤال (٧).

أ – ما القيم المغناطيسية في الموقع (س) والموقع (ص)؟

ب– إذا علمت أن القيمة المغناطيسية الطبيعية أقل من (١٥٠٠) غاما:

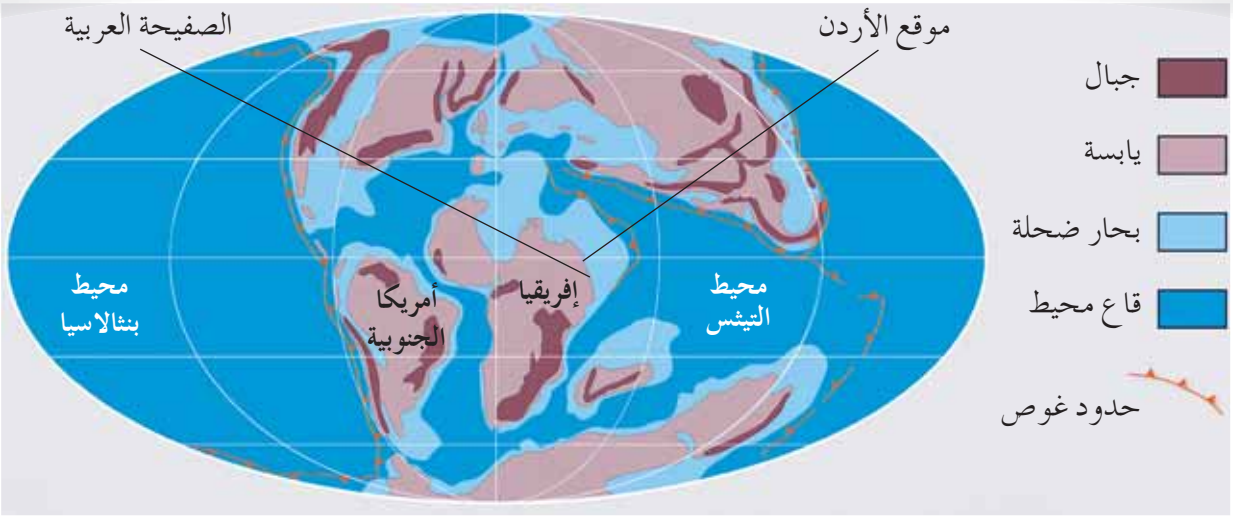
- ما قيمة الشاذّة المغناطيسية؟
- ما نوع الشاذّة المغناطيسية؟

جـ– في أي الموقعين؛ (أ) أم (ب) يمكن أن نجد الخام؟ لماذا؟

الفصل الثاني

جيولوجية الأردن
(Geology of Jordan)

تتحرّك الصفائح التكتونية بصورة مستمرة؛ الأمر الذي يؤدي إلى تغيير مواقع القارات عبر الزمن الجيولوجي. ولا يمكن دراسة مراحل التطوّر التي مرّ بها الأردن بمعزل عن محيطه؛ فالأردن جزء من الصفيحة العربية التي كانت متّصلة مع الصفيحة الإفريقية قبل (٣٠) مليون سنة تقريبًا. أما قارة إفريقيا، فكانت إحدى القارات التي شكّلت القارة العظيمة غوندوانا (Gondwana)، التي كانت تتمركز في النصف الجنوبي للكرة الأرضية، وكان يفصلها محيط التيثس (Tethys Ocean) عن القارات الشمالية التي كانت تُشكّل القارة العظيمة لوراسيا، انظر الشكل (٤-١٠). وهذا يعني أن مناخ الأردن كان متغيّرًا بتغيّر موقعه الجغرافي عبر العصور الجيولوجية، كذلك تغيّرت أنواع الكائنات الحية التي سادت فيه، كما تغيّرت الأحداث الجيولوجية التي شهدها الأردن، وستدرسها في هذا الفصل.

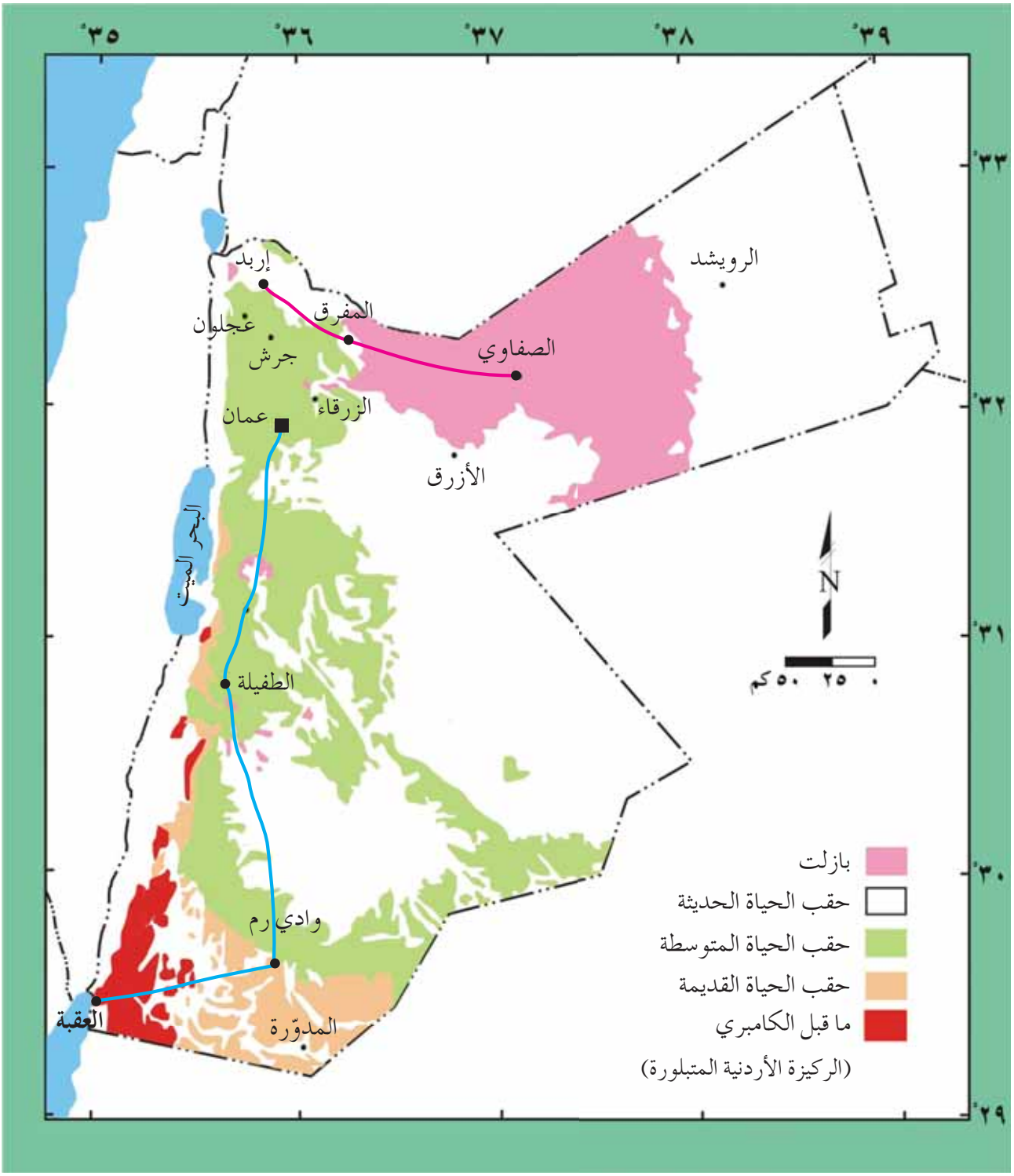


الشكل (٤-١٠): موقع الأردن في العصر الترياسي.

أولًا: توزيع صخور الأحقاب الجيولوجية في الأردن

أراد أحمد وزملاؤه الذهاب في رحلة استكشافية في أنحاء الأردن؛ لدراسة الصخور المتكشّفة وأعمارها، وكان للرحلة مساران، المسار الأول يبدأ من العقبة جنوبًا ويمرّ بوادي رم والطفيلة. ومن ثمّ، ينتهي في عمان وسط الأردن. والمسار الثاني يبدأ من إربد شمالًا، فالمفرق وينتهي بالصفاوي شرقًا.

والآن، لمساعدة أحمد وزملائه في رحلتهم الاستكشافية؛ ادرس الشكل (٤–١١)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٤–١١): خريطة توضّح توزّع الأحقاب الجيولوجية في الأردن.

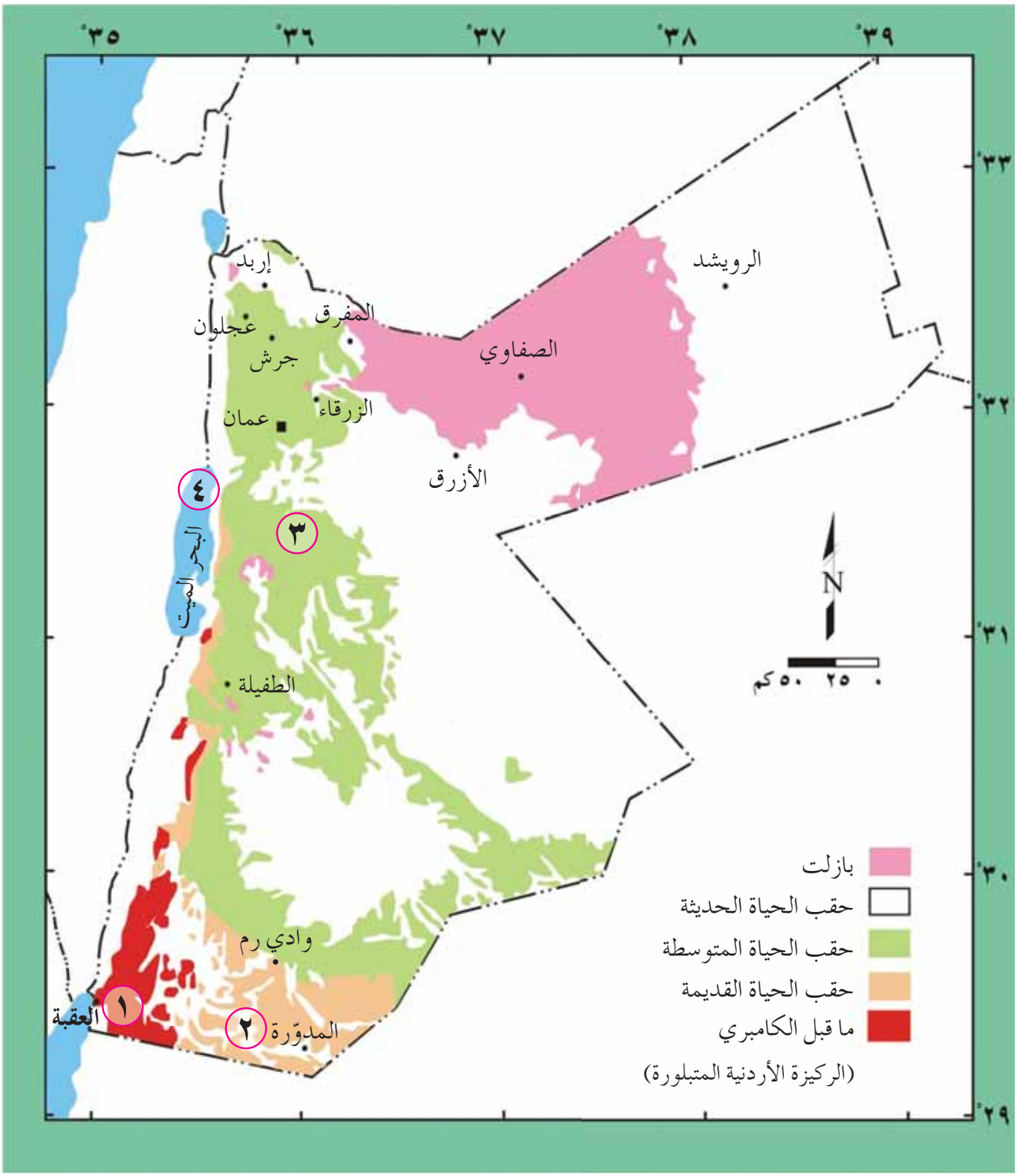
- ما الأحقاب الجيولوجية للصخور المتكشّفة على السطح التي سيلحظها أحمد وزملاؤه في كلا المسارين؟
- ما أعمار الصخور المتكشّفة على السطح التي سيلحظها أحمد وزملاؤه في كلا المسارين؟
- أين توجد الصخور الأقدم في الأردن؟
- صِف التغيّر في أعمار الصخور المتكشّفة بدءًا من العقبة وحتى منطقة الصفاوي، وأين توجد الصخور الأحدث؟ ماذا تستنتج؟

تتكشّف أقدم الصخور في الأردن في منطقة العقبة التي تقع في أقصى جنوبه الغربي، وتُسمّى **صخور الركيزة**، التي تعود أعمارها إلى ما قبل الكامبري. وفي أثناء جولة أحمد وزملائه في المسار الأول، سيشاهدون صخور الركيزة في العقبة، ثمّ صخورًا تعود لحقب الحياة القديمة في وادي رم، ثمّ سيشاهدون صخورًا تعود أعمارها لحقب الحياة المتوسطة في كل من الطفيلة وعمّان.

أما المسار الثاني، فسيُلاحظ الطلاب صخورًا تعود لحقب الحياة الحديثة في إربد والمفرق، وفي منطقة الصفاوي فتتكشّف صخور نارية بازلتية تُعدّ من أحدث الصخور في الأردن؛ أي من أعلى حقب الحياة الحديثة.

ثانيًا: التطوّر الجيولوجي في الأردن

قام الكثير من الجيولوجيين بتتبّع أهم الأحداث الجيولوجية التي شهدها الأردن في أثناء الأحقاب الجيولوجية الزمنية المختلفة؛ وذلك اعتمادًا على موقع صخوره عند تشكّلها بالنسبة إلى القارة (اليابسة) والمحيط. ولدراسة التطوّر الجيولوجي في الأردن، تأمّل الشكل (٤-١٢).



الشكل (٤–١٢): الأحداث الجيولوجية التي مرّ بها الأردن، في أثناء الأحقاب الجيولوجية المختلفة (المعلومات الموضّحة في داخل الصناديق جميعها للحفظ).

١- الركيزة الأردنية المتبلورة (ما قبل الكامبري) (أقدم من ٥٤٢ مليون سنة)

- سُمّيت بهذا الاسم لأن صخور المراحل الأخرى اللاحقة لها ترتكز عليها، حيث إن الصخور النارية الباطنية هي السائدة في صخور الركيزة، وتتكوّن معظمها من الغرانيت.
- تعرّضت المنطقة في نهاية هذه المرحلة إلى عمليات رفع وحتّ وتعرية، أدّت إلى تكوين سطح تسوية (Peneplanation) وهو سطح لا توافق يفصل بين صخور الركيزة وصخور الأحقاب الأخرى فوقها، حيث يميل هذا السطح بمقدار ٥° باتجاه الشمال والشمال الشرقي.

٢- الترسيب القاري (حقب الحياة القديمة وجزء من حقب الحياة المتوسطة) (٥٤٢-١٠٠) مليون سنة

- تضمّ الرسوبيات القارية من العصر الكامبري وانتهاء بالعصر الكريتاسي الأسفل، ومثال عليها صخور جبال وادي رم ومدينة البترا الورديّة.
- تميّزت هذه المرحلة بتفاعل بيئتين رسوبيتين هما؛ (أ) بيئة نهرية: حيث كانت الأنهار تجري من الجنوب وتصبّ في محيط التيثس في الشمال، ما أدى إلى ترسيب رسوبيات فتاتية نهرية على مساحات واسعة. و(ب) بيئة بحرية تذبذبية: حيث كان محيط التيثس يتذبذب انحسارًا وتقدّمًا ما أدّى إلى ترسيب صخور رسوبية بحرية. وتوجد رسوبيات جليدية نهرية في العصر الأوردوفيشي.

٣- تقدّم محيط التيثس (حقب الحياة المتوسطة - الحديثة) (١٠٠-٣٥) مليون سنة

- تقدّم محيط التيثس إلى الجنوب، وغمر أجزاءً كبيرة من الأردن ما أدّى إلى ترسيب الكثير من الصخور الجيرية النقية والمارل (الذي يتكوّن من معادن طينية وكربونات الكالسيوم).
- وجود الأردن ضمن منطقة التيارات البحرية الصاعدة، ما أدّى إلى ترسيب الفوسفات والصوّان والصخر الزيتي وغيرها.

٤- نشأة الانهدام الأردني والبحر الميت (حقب الحياة الحديثة) (قبل ٣٥ مليون سنة حتى الآن)

- انفصال الصفيحة العربية عن الصفيحة الإفريقية، وتكوّن البحر الأحمر وخليج العقبة وصدع البحر الميت التحويلي بفعل استمرار حركة الصفيحة العربية إلى الشمال والشمال الشرقي.
- عمليات رفع أدّت إلى رفع محيط التيثس، وتكوّن سلاسل جبلية وبحيرات، مثل البحر الميت وبحيرة الأزرق.
- نشاط بركاني على شكل حرّات بازلتية غطّت أجزاءً واسعة من الأردن والمناطق المجاورة، وخاصة في شمال وشمال شرق ووسط الأردن.

ثالثًا: الثروات المعدِنية ودور الجيولوجي في استكشافها

للثروات المعدِنية دور مهم وبارز في دفع عجلة التنمية الاقتصادية، التي تُشكّل لَبِنات البناء الحضاري للمجتمع، ويُسهِم الجيولوجيون بشكل كبير في أعمال التنقيب والاستكشاف عن الثروات المعدِنية في الأردن؛ فكان لهم دور مهم في إجراء الدراسات والأبحاث المختلفة، والمتعلقة بتوضّع الخامات لتحديد الأماكن المناسبة لتكوّنها، وإنشاء الخرائط الجيولوجية التي تصف الصخور والتراكيب الجيولوجية المختلفة، وإجراء المسوحات والاستكشاف الجيوفيزيائي والجيوكيميائي للمواقع المختلفة.

يمتاز الأردن بأنه بلد يحوي ثروات طبيعية، نتيجة التنوّع المتميّز في جيولوجيته، التي تُسهم في دعم الاقتصاد الوطني، حيث إن لكل مرحلة جيولوجية خامات معدِنية معيّنة انتشرت فيها، وذلك بسبب وجود الاندفاعات النارية والأنشطة البركانية، وتقدّم محيط التيثس وترسيب الرسوبيات البحرية، كذلك وجود الترسيب القاري. وفي ما يأتي الموارد المعدِنية التي تتميّز فيها كل مرحلة من المراحل الجيولوجية:

١- الركيزة الأردنية المتبلورة (ما قبل الكامبري)

يُميّز هذه المرحلة وجود خامات متعدّدة منها النحاس والذهب وصخور الغرانيت الذي له استخدامات عديدة في البناء، ويُعدّ من مصادر أحجار الزينة.

٢- الترسيب القاري

يُميّز هذه المرحلة وجود الصخور الرملية التي يتخلّلها رسوبيات بحرية ضحلة، وتحتوي على خامات المنغنيز والصلصال والرمل الزجاجي، ويُعدّ الرمل الزجاجي من أنقى أنواع الرمال، ويمتاز بأنه قليل الشوائب ومتكشّف على سطح الأرض وموجود بكميات ضخمة في مناطق مختلفة، مثل رأس النقب. وتتوافر خامات النحاس بكميات كبيرة في عدّة مناطق في ضانا، منها: منطقة فينان وأم العمد ووادي خالد، ضمن صخور الكربونات (الدولوميت) وصخور الغضار.

٣- تقدّم محيط التيثس

ترسّبت في هذه المرحلة رسوبيات بحرية وقارية، وتحتوي على خامات الصخر الجيري

النقي والمعادن الطينية، والجبس والفوسفات، حيث يمتلك الأردن خامس أكبر احتياطي فوسفات في العالم، والصخر الزيتي الذي يتميّز بجودته العالية وقُرْبه من السطح ويُعدّ من أهم الموارد الطبيعية في الأردن، الذي يوجد بكميات كبيرة في عدّة مناطق ويُتوقّع استغلاله في المستقبل القريب.

٤- نشأة الانهدام الأردني والبحر الميت

يُميّز هذه المرحلة أملاح البحر الميت، مثل البوتاس والمنغنيز واليود والبروم والملح الصخري (ملح الطعام) وغيرها، كما يُميّزها صخور البازلت والتفّ البركاني الذي يُستخدم في صناعة الإسمنت، وخامات الزيولايت التي تُستخدم في الزراعة لتحسين نوعية التربة.

اختبر معلوماتك

١- تُقسّم مراحل التطوّر الجيولوجي في الأردن إلى أربع مراحل. انسب الأحداث الجيولوجية الآتية إلى المرحلة المناسبة لكل منها:

أ - تشكّل البحر الميت.

ب- تشكّل صخور جبال وادي رم.

جـ - تكوّن صخور الركيزة في العقبة.

د - ترسيب الرسوبيات الفتاتية على مساحات واسعة، وبسماكات كبيرة جنوب الأردن.

هـ - تشكّل خام الصخر الزيتي.

٢- أ - فسّر سبب وجود خامات الفوسفات ضمن مناطق واسعة في الأردن.

ب- عند البحث عن خام الفوسفات في الأردن، في أي مراحل التطوّر الجيولوجي السابقة يتم استكشافه؟ لماذا؟

٣- ما الخامات الأكثر انتشارًا في كل من المناطق الآتية:

أ - البحر الميت.

ب- الصفاوي.

جـ - معان.

د - العقبة.

رابعًا: السياحة الجيولوجية

تُعدّ السياحة من أهم الروافد الاقتصادية لكثير من الدول في العالم، والسياحة الجيولوجية هي إحدى أفرع السياحة، ولها جانبان؛ الجانب العلمي للبحث عن الظواهر الجيولوجية المختلفة، وجانب ترفيهي يتمثَّل بالراحة والاستجمام بالمناظر الخلّابة.

ويتمتع الأردن بطبيعة جيولوجية خلّابة، حيث يتكشّف على سطحه سجلّات صخرية للأحقاب الجيولوجية جميعها، بدءًا من ما قبل الكامبري إلى حقب الحياة الحديثة، ومن أماكن السياحة الجيولوجية في الأردن:

١- **ضانا:** تتميّز منطقة ضانا بجمالها الخلّاب، حيث تتكوّن من سلسلة من الجبال العالية وتتخلّلها الأودية العميقة المختلفة. تسود الصخور الجيرية التابعة لحقب الحياة المتوسطة في أعلى المنطقة شرقًا، وعندما تنزل مع وادي ضانا غربًا فإنك ترى الصخور الرملية المتعددة الألوان التابعة لحقب الحياة المتوسطة والقديمة. وينتهي بك المطاف برؤية الصخور الغرانيتية من صخور الركيزة التابعة لما قبل الكامبري.

الشكل (٤-١٣): نفق تعدين قديم للنحاس في منطقة ضانا جنوب الأردن.

ويمكن للزائر أن يرى آثار تعدين الأنباط وغيرهم للنحاس، حيث تُعدّ أنفاق التعدين شاهدة على ذلك، انظر الشكل (٤-١٣).

٢- **وادي رم:** وهو نتاج ملايين السنين من عمليات جيولوجية ومناخية متعددة، تعود إلى مرحلة الترسيب القاري في حقب الحياة القديمة، حيث نشطت بيئة قارية نهرية كانت الأنهار تجري فيها من الجنوب وتصبّ في الشمال، عملت على ترسيب الصخور الرسوبية الفتاتية بكميات كبيرة. وقد أدت عمليات الحتّ والتعرية للجبال العالية إلى تغطية الأودية والمناطق المجاورة بطبقة رملية سميكة.

ووادي رم وادٍ سياحي يقع في جنوب الأردن، ويمتاز بوجود الجبال الشاهقة بألوانها

الصفراء والبيضاء والحمراء والبنّيّة، وكذلك بأشكالها المميّزة التي تتّخذ شكل الصخور المعلّقة (المشروم) وغيرها من الأشكال الخلّابة، انظر الشكل (٤-١٤).

(أ) جبال وادي رم.

(ب) مظهر جيولوجي ناتج من عمليات الحتّ في وادي رم يُدعى بالصخور المعلّقة (المشروم).

الشكل (٤-١٤): التشكيلات الصحراوية في وادي رم جنوب الأردن.

٣- البترا: تقع البترا في محافظة معان جنوب الأردن، وتشتهر بجمال صخورها، حيث مدينة البترا الوردية المنحوتة في الصخر الرملي التابع لحقب الحياة القديمة، وتحتوي جبال البترا على تراكيب جيولوجية مثالية تتمثّل بالصدوع والطيات، ومقاطع جيولوجية بألوان زاهية، كما تحتوي على كهوفٍ طبيعية، وتشكيلات مختلفة بفعل عمليات الحتّ والتعرية، انظر الشكل (٤-١٥). ما عمل على تشجيع السياحة الجيولوجية في هذه المنطقة.

الشكل (٤-١٥): التشكيلات الرملية في مدينة البترا.

٤- البحر الميت: يقع البحر الميت في أكثر أماكن غور الأردن انخفاضًا، ويشتهر بأنه أخفض بقعة على سطح الأرض، حيث وصل إلى (٤٣٠) م تحت مستوى سطح البحر في عام ٢٠١٦م. تمتاز أملاح البحر الميت بأنها ثروة معدِنية ذات قيمة اقتصادية كبيرة، حيث تمتاز مياهه باحتوائها على تراكيز عالية من بعض العناصر من مثل البوتاسيوم والصوديوم والمغنيسيوم والليثيوم والكلور والبروم. ويُستغلّ منه حاليًّا مجموعة من المواد مثل أملاح البوتاس والمغنيسيوم والبروم وغيرها. ويمكن بسهولة رؤية ترسّبات الملح الصخري (ملح الطعام) على شكل بلّورات تغطّي صخور الشاطئ، انظر الشكل (٤-١٦).

الشكل (٤-١٦): ترسّبات من الملح الصخري (ملح الطعام) تغطّي شواطئ البحر الميت.

ولمياه البحر الميت أهمية علاجية كبيرة، فهي تساعد على الشفاء من الأمراض الجلدية وغيرها.

١– من الأحداث الجيولوجية في مرحلة الركيزة الأردنية المتبلورة تشكّل سطح التسوية.

أ – ما المقصود بسطح التسوية؟ وما سبب تشكّله؟

ب– لماذا سمّيت صخور الركيزة بهذا الاسم؟

جـ– لماذا توجد صخور الركيزة على عمق كبير تحت مدينة عمان؟

٢– فسّر ما يأتي تفسيرًا علميًّا دقيقًا:

أ – ساد الترسيب النهري في مرحلة الترسيب القاري في المناطق الجنوبية من المملكة.

ب– يتمتّع الأردن بطبيعة جيولوجية فريدة من نوعها.

٣– وادي رم إحدى المناطق ذات الأهمية السياحية الجيولوجية في الأردن، وضّح كيف تشكّلت صخور جبال وادي رم، وفي أي حقب جيولوجي؟

٤– عن طريق دراستك لجيولوجية الأردن، اذكر سببًا لما يأتي:

أ – مدينة البترا من المناطق التي تُزار بهدف السياحة الجيولوجية.

ب– تمتاز أملاح البحر الميت بأنها ثروة معدِنية ذات قيمة اقتصادية كبيرة.

جـ– تكشّف صخور الغرانيت في منطقة العقبة، مع أنها صخورٌ باطنية.

٥– هَبْ أنه قد طُلب إليك أن تبحث عن خام الصخر الزيتي في الأردن:

أ – أيُّ المناطق التي ستبحث فيها؟ لماذا؟

ب– أيُّ طرائق الاستكشاف الجيولوجي سوف تستخدم؟ لماذا؟

جـ– ما أهمية استكشاف خام الصخر الزيتي في الأردن؟

٦– إذا سلكت الطريق الذي يربط العقبة بعمان مرورًا في وادي رم، ما الأحقاب الجيولوجية التي ستمرّ فيها؟

الوَحْدة الخامسة

٥

بِنية الأرض الداخلية وديناميتها

(Earth's Interior Structure and its Dynamics)

النتاجات

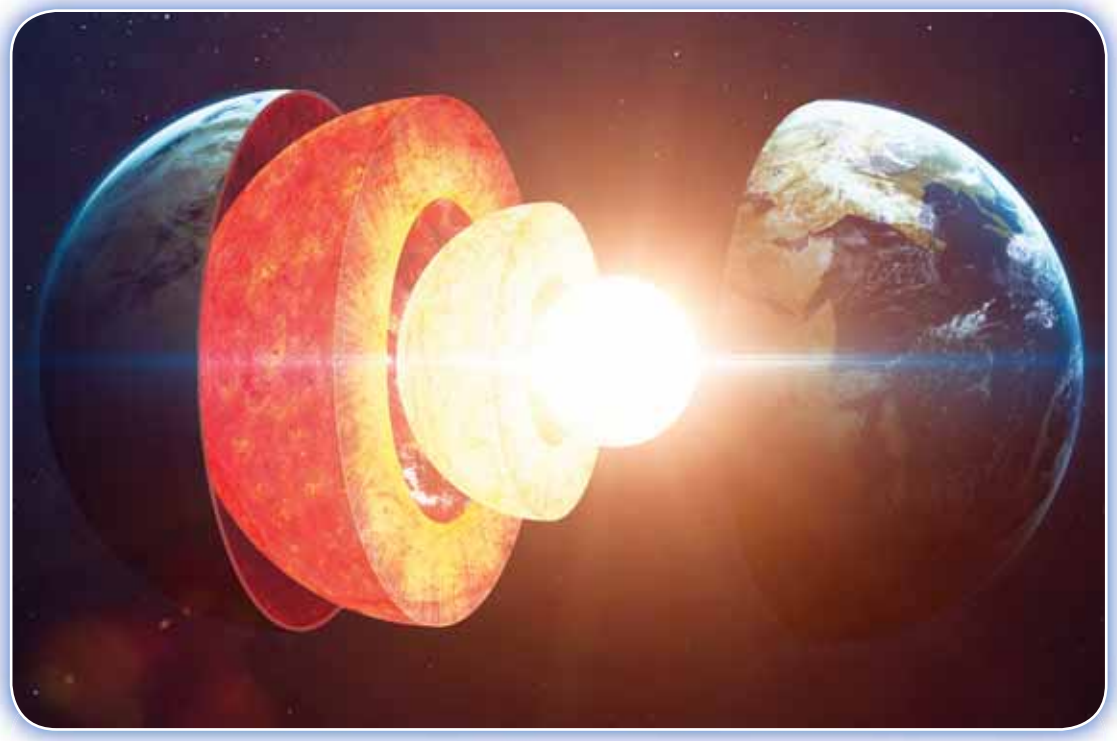
يُتوقّع منك في نهاية هذه الوَحْدة، أن تكون قادرًا على أن:

- تتعرّف الأسس العلمية التي أسهمت في فهم بِنية الأرض الداخلية.
- تستنتج بِنية الأرض الداخلية ومكوّناتها، عن طريق الدراسات الزلزالية وغيرها.
- توضّح المقصود بكل من: الغلاف الصخري، والغلاف اللدن، وانقطاع موهو، وانقطاع غوتنبيرغ، وانقطاع ليمان، ونطاق احتجاب الأمواج الزلزالية، ونطاق السرعة المنخفضة، وفرضية انجراف القارات، وتوسُّع قاع المحيط، ونظرية تكتونية الصفائح.
- تمايز بين القشرة القارية والمحيطية، من حيث السمك والمكوّنات والكثافة.
- تُفسّر وجود اللب الخارجي في الحالة السائلة، واللب الداخلي في الحالة الصُّلبة.
- تتعرّف الفرضيات والنظريات المتعلقة بدراسة دينامية الأرض، وتُقيّمها.
- تصف الصفائح الأرضية الرئيسة، وأنواع الحركة على حدودها.
- تُفسّر حدوث الزلازل والبراكين من منظور نظرية تكتونية الصفائح.
- تُفسّر المظاهر الجيولوجية المرتبطة بحدود الصفائح: الأخاديد البحرية، وحدود الغوص، وحدود التصادم، والانهدامات، وأظهر المحيطات، والسلاسل الجبلية.
- تربط بين توسُّع قاع المحيط والمغناطيسية المقلوبة، ومظاهر قاع المحيط.
- تُقدّر أهمية نظرية تكتونية الصفائح في تفسير معظم المظاهر الجيولوجية.
- تستشعر عظمة الخالق عز وجل في تنظيم خلقه.

قال الله تعالى:

﴿ أَوَلَمْ يَرَوْا أَنَّا نَأْتِي الْأَرْضَ نَنقُصُهَا مِنْ أَطْرَافِهَا ۚ وَاللَّهُ يَحْكُمُ لَا مُعَقِّبَ لِحُكْمِهِ ۚ وَهُوَ سَرِيعُ الْحِسَابِ ﴾

(سورة الرعد، الآية ٤١).



تتكوّن الأرض من الداخل من نُطُق تختلف في مكوّناتها وخصائصها الفيزيائية وكثافتها ومعاملات مرونتها.

- فكيف استدلّ العلماء على أن بِنية الأرض الداخلية تُمثّل نموذجًا خاصًّا بها من حيث التركيب والكثافة والخصائص الفيزيائية الأخرى؟
- وكيف تفسّر نشأة صدع البحر الميت التحويلي ونشأة المظاهر التكتونية الأخرى كسلسلتَي جبال طوروس وزاغروس وتشكّل خليج عدن، بناءً على نظرية تكتونية الصفائح؟

الفصل الأول

بِنية الأرض الداخلية
(Earth's Interior Structure)

تعلّمت سابقًا أن الأرض ذات نصف قطر يبلغ ٦٣٧١كم تقريبًا، وهي تتكوّن من أربعة نُطُق رئيسة : القشرة، والستار، واللب الخارجي، واللب الداخلي. فكيف توصّل العلماء لمعرفة بِنية الأرض الداخلية وخصائص النُطُق الرئيسة المكوّنة لها، على الرغم من محدودية عمليات الحفر، بحيث لم تصل إلى أعمق من ١٢,٣كم تقريبًا.

أولًا: الدراسات العلمية في تعرّف بِنية الأرض الداخلية

وظّف العلماء نتائج دراسات كثيرة للتعرّف إلى بِنية الأرض الداخلية، ومنها الدراسات المخبرية على عينات صخرية يُعتقد أنها ممثّلة لتركيب الأرض من الداخل. ومثال ذلك، تحليل عينات **النيازك** (Meteorites)، وهي كِسَف من أجسام غير أرضية تسقط على الأرض، وقد جرى دراستها بهدف عمل استنتاجات وبطريقة غير مباشرة عن تركيب باطن الأرض. وقد وجد العلماء نوعين رئيسين من النيازك، هما: **النيازك الصخرية** (Stony Meteorites) وتتكوّن من صخور البيرودوتيت وتشبه مكوّناتها مكوّنات نطاق الستار، و**النيازك الفلزية** (Metallic Meteorites) وهي سبائك تتكوّن من عنصرَي الحديد والنيكل، وتشبه مكوّناتها مكوّنات نطاق لب الأرض الداخلي. وكذلك دراستهم عينات صخرية تحتبسها الصخور البركانية، ويُعتقد أنها تحمل معها بعض مكوّنات الأرض على أعماق كبيرة تصل إلى مئات الكيلومترات.

وعلى الرغم من هذه المعلومات؛ فإن المصدر الرئيس للتعرّف إلى بِنية الأرض من الداخل هو الدراسات الزلزالية.

- **دور الدراسات الزلزالية في تعرّف بِنية الأرض الداخلية**

تعلّمت سابقًا خصائص الأمواج الزلزالية، وأنها تُقسم إلى نوعين؛ **الأمواج الأولية** (Primary Waves) و**الأمواج الثانوية** (Secondary Waves)، ومن هذه الخصائص:

أ – أن سرعة الأمواج الزلزالية تزداد مع العمق في الطبقة الواحدة؛ نتيجة تغيّر الخصائص الفيزيائية للطبقة، مثل كثافة الصخر ومعاملات مرونته.

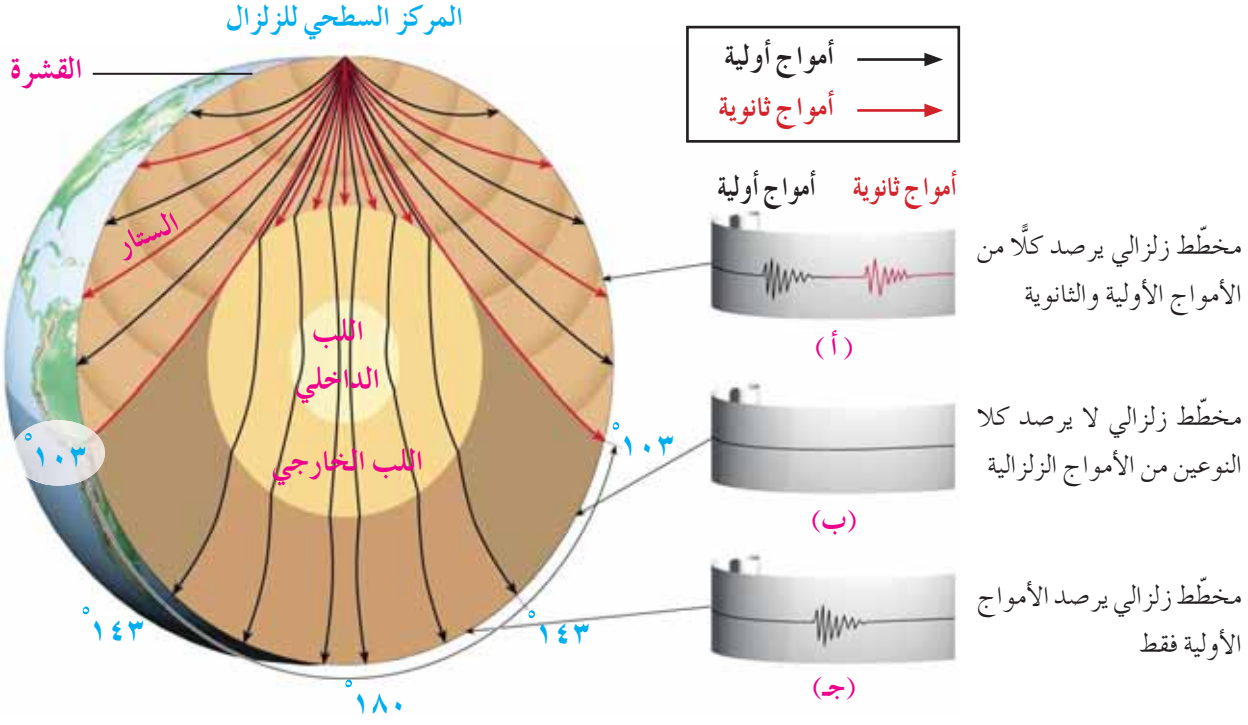
ب- تعاني الأمواج الزلزالية انكسارًا أو تغيّرًا في سرعتها عندما تنتقل بين نطاقين مختلفَي الخصائص.

جـ- تنتقل الأمواج الأولية بسرعة أكبر من الأمواج الثانوية في الأوساط المادية جميعها، بينما لا تنتقل الأمواج الثانوية إلا في الأوساط الصُّلبة فقط.

وقد وُظّفت هذه الخصائص في التعرّف إلى بِنية الأرض الداخلية وأنها غير متجانسة مع العمق. ولمعرفة ذلك اعتمادًا على خصائص الأمواج الزلزالية؛ نفّذ النشاط التحليلي (٥-١).

٥-١ نشاط تحليلي: الاستدلال على عدم تجانس بِنية الأرض الداخلية اعتمادًا على خصائص الأمواج الزلزالية

أُجريت تجربة زلزالية تمّ فيها رصد الأمواج الزلزالية على سطح الأرض. المخطّط الزلزالي (أ) يُمثّل المنطقة التي تُسجّل فيها **الأمواج الزلزالية الأولية** (P-Waves) و**الأمواج الزلزالية الثانوية** (S-Waves)، والمخطّط الزلزالي (ب) يُمثّل المنطقة التي تُحتجب فيها كلًّا من الأمواج الأولية والثانوية، والمخطّط الزلزالي (جـ) يُمثّل المنطقة التي تُسجّل فيها الأمواج الأولية فقط وتُحتجب فيها الأمواج الثانوية. ادرس الشكل (٥-١)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٥-١): سلوك الأمواج الزلزالية في نُطُق الأرض الرئيسة، ومناطق احتجاب الأمواج الأولية والثانوية.

١– حدّد البُعد الزاوي (مقدار الزاوية المحصورة بين المركز السطحي للزلزال ومكان وصول الأمواج الزلزالية على السطح) الذي تُحتجب عنده الأمواج الثانوية، على جانبَي المركز السطحي للزلزال. وماذا يُطلق على هذه المنطقة؟

٢– حدّد البُعد الزاوي الذي تُحتجب عنده الأمواج الأولية على جانبَي المركز السطحي للزلزال. وماذا يُطلق على هذه المنطقة؟

٣– في ضوء معرفتك خصائص الأمواج الزلزالية، ماذا تتوقّع أن تكون خصائص النطاق الذي تُحتجب عنده الأمواج الثانوية؟

ملاحظة: (عند إجابتك عن الأسئلة السابقة، سيُعتمد مفهوم **المنطقة**؛ لتُشير إلى إحدى مناطق الاحتجاب، ومفهوم **النطاق**؛ ليُشير إلى إحدى نُطُق الأرض الرئيسة).

توصلت من إجابتك عن الأسئلة السابقة، إلى أن سرعة الأمواج الزلزالية وسلوكها تتغيّر خلال مرورها بالنُّطُق المختلفة. وقد فسّر العلماء هذه المشاهدات بناءً على معرفتهم خصائص الأمواج الزلزالية، على النحو الآتي:

أ – **البُعد الزاوي (٠° – ١٠٣°) تقريبًا**، وهو يُمثّل منطقة جرى فيها استلام كل من الأمواج الزلزالية الأولية والثانوية التي مرّت في **نطاقَي القشرة والستار**، لاحظ المخطّط الزلزالي (أ) في الشكل (١–٥).

ب– **البُعد الزاوي (١٠٣° – ١٤٣°) تقريبًا**، وهو يُمثّل منطقة تختفي فيها الأمواج الزلزالية الأولية والثانوية، وسُمّيت **منطقة احتجاب الأمواج الأولية** (P–Waves Shadow Zone)؛ نظرًا لاختفاء الأمواج الأولية، وسُمّيت أيضًا **منطقة احتجاب الأمواج الزلزالية**؛ وذلك بسبب اختفاء الأمواج الأولية والثانوية معًا. فعند وصول الأمواج الأولية والثانوية إلى هذا النطاق الذي يُمثّل اللب الخارجي فإن الأمواج الأولية تنكسر وتغيّر مسارها نظرًا لطبيعته السائلة،

وتختفي الأمواج الثانوية تمامًا كونها لا تمرّ بالسوائل، لاحظ المخطّط الزلزالي (ب) في الشكل (٥–١).

جـ– البُعد الزاوي (١٤٣° – ١٨٠°) تقريبًا، حيث تظهر الأمواج الأولية مرة أخرى عند البُعد الزاوي ١٤٣° تقريبًا، وفي أجزاء محدّدة في هذه المنطقة تزداد سرعة الأمواج الأولية، وقد أثار ذلك فضول العلماء وقادهم لاكتشاف أن الأمواج الأولية دخلت نطاقًا يوجد في الحالة الصُّلبة، كثافته كبيرة وهو اللب الداخلي الذي تُسجّل فيه الموجات الزلزالية لتصل إلى البُعد الزاوي ١٨٠° تقريبًا، لاحظ المخطّط الزلزالي (جـ) في الشكل (٥–١).

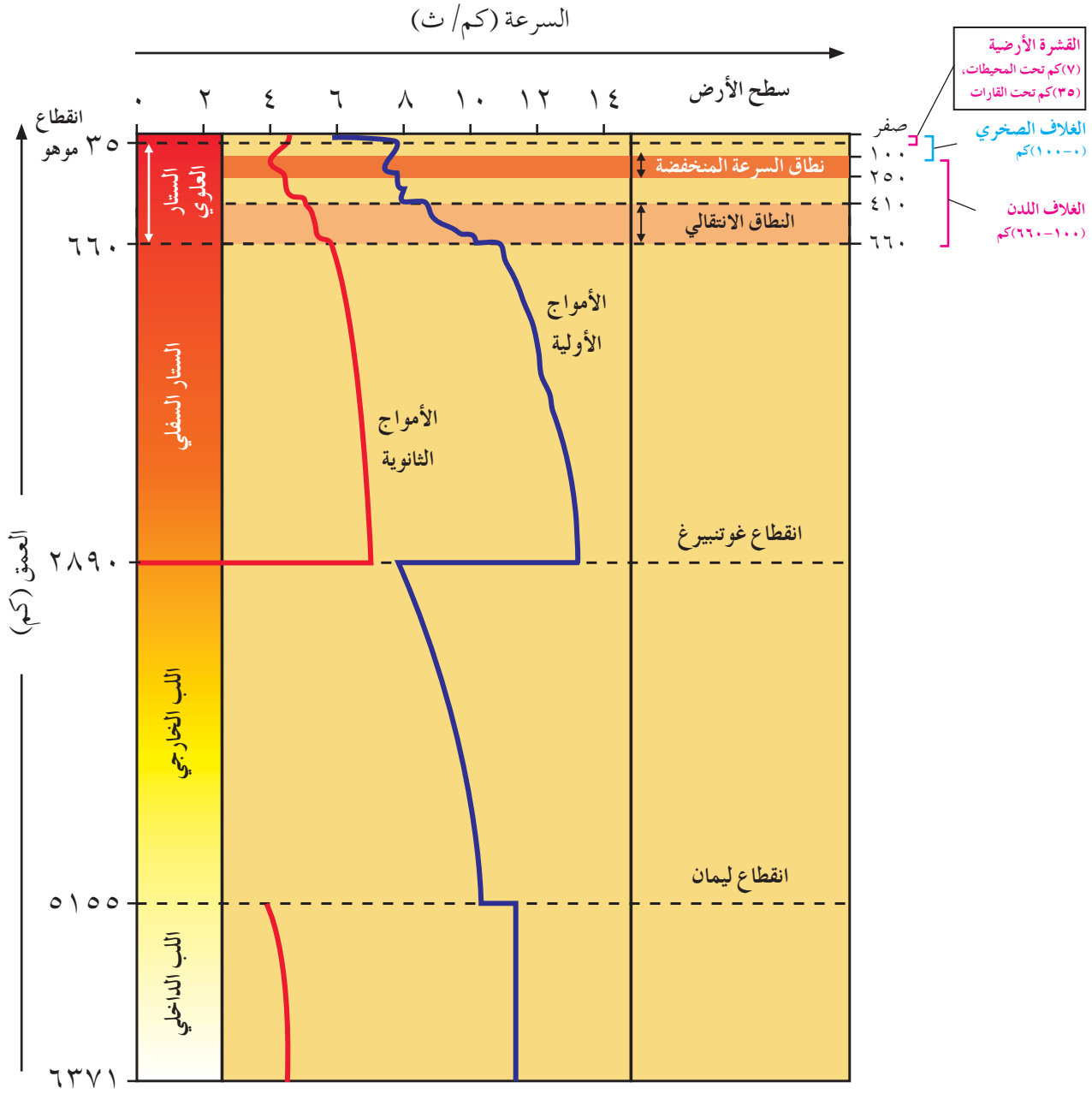
واعتمادًا على نتائج تحليل المشاهدات الزلزالية السابقة جميعها، استنتج العلماء أن الأرض من الداخل تتكوّن من نُطُق تختلف في مكوّناتها وخصائصها الفيزيائية وكثافتها ومعاملات مرونتها، وتوصّلوا إلى أن بِنية الأرض تُمثّل نموذجًا خاصًّا بها من حيث التركيب والكثافة والخصائص الفيزيائية الأخرى.

ثانيًا: نُطُق الأرض الرئيسة

تعلّمت سابقًا أن بِنية الأرض تتكوّن من أربعة نُطُق رئيسة، ويُمثّل كل نطاق منها نظامًا مميّزًا في خصائصه ومكوّناته وسماكته، فماذا يضمّ كل نطاق؟ وكيف تسلك الأمواج الزلزالية في كل نطاق منها؟ للتعرّف إلى ذلك؛ نفّذ النشاط التحليلي (٥–٢)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

٥-٢ نشاط تحليلي: نُطَق الأرض الرئيسة وسلوك الأمواج الزلزالية فيها

ادرس الشكل (٥-٢)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٥-٢): نُطَق الأرض الرئيسة، وسلوك الأمواج الزلزالية فيها.

١- ما متوسط سمك القشرة القارية؟

٢- قارن بين الغلاف الصخري والغلاف اللدن من حيث: السمك، والأجزاء الرئيسة التي يضمّها كل منها.

٣- لاحظ سلوك الأمواج الزلزالية من العمق (١٠٠)كم إلى العمق (٦٦٠)كم:

أ - هل تزداد سرعة الأمواج الزلزالية بصورة تدريجية مع العمق، أم تنخفض بصورة تدريجية؟

ب- هل يكون التغيّر في سرعة الأمواج الزلزالية عند الأعماق (١٠٠)كم و (٤١٠)كم و(٦٦٠)كم تدريجيًّا أم مفاجئًا؟

٤- سمّ الانقطاعات الرئيسة الواردة في الشكل، وما سبب تسميتها بالانقطاعات؟

٥- هل تتوقّع وجود علاقة بين سلوك الأمواج الزلزالية في اللب الداخلي واللب الخارجي والحالة الفيزيائية لكل منهما؟ لماذا؟

توصلت من إجابتك عن الأسئلة السابقة، إلى أن نُطُق الأرض الرئيسة هي:

١- القشرة الأرضية (Earth Crust)

نطاق صخري صُلب يُغلّف الأرض، وتُقسم القشرة الأرضية إلى نوعين: قارية ومحيطية، حيث تتكوّن القشرة القارية من صخور جزؤها العلوي يُشبه تركيبها التركيب الكيميائي لصخور الغرانيت الغنيّة بسليكات الألمنيوم والبوتاسيوم والصوديوم، ويتكوّن جزؤها السفلي من صخور يُشبه تركيبها التركيب الكيميائي لصخور البازلت الغنيّة بسليكات الحديد والمغنيسيوم، ويبلغ متوسط سمك القشرة القارية (٣٥)كم تحت القارات، ومتوسط كثافتها (٢,٧) غم/سم^{٣}، بينما تتكوّن القشرة المحيطية من صخور أكثر كثافةً ويبلغ متوسط كثافتها (٣) غم/سم^{٣}، ويُشبه تركيبها التركيب الكيميائي لصخور البازلت، ويبلغ متوسط سمكها (٧)كم تحت المحيطات، ويفصل **انقطاع موهو** (Moho Discontinuity) نطاق القشرة الأرضية عن نطاق الستار، حيث يحدث عنده زيادة مفاجئة وكبيرة في سرعة الأمواج الزلزالية، لاحظ الشكل (٥-٣).

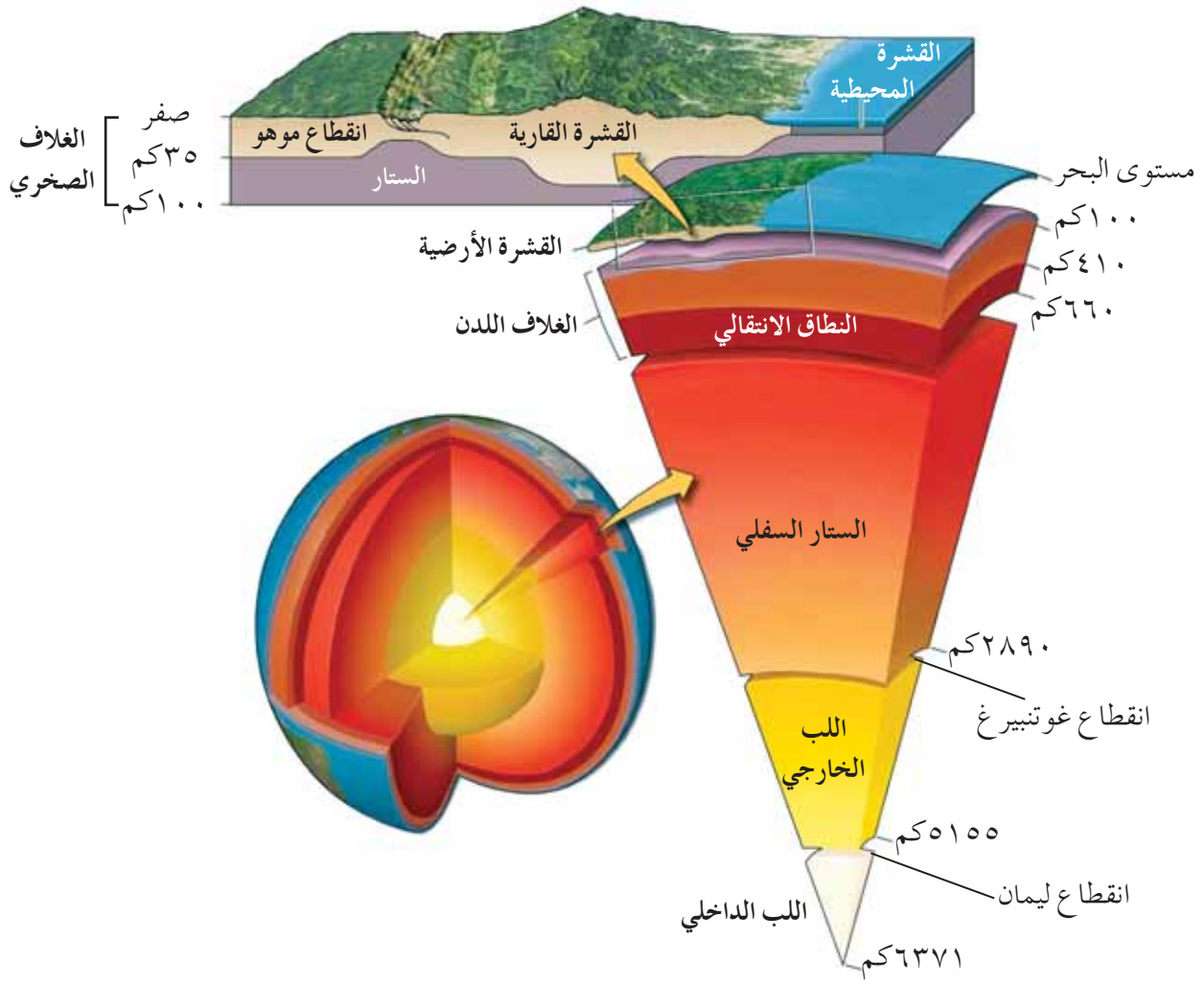
٢- الستار (Mantle)

نطاق صخري يمتدّ من انقطاع موهو الى حدود اللب الخارجي، ويُشكّل النسبة الأكبر من كتلة الأرض. يُقسم الستار الى قسمين؛ هما **الستار العلوي** (Upper Mantle) ويمتدّ من

انقطاع موهو لغاية عمق (٦٦٠)كم، ويتكوّن بشكلٍ رئيس من صخور البيرودوتيت، و**الستار السفلي** (Lower Mantle) الذي يمتدّ من عمق (٦٦٠)كم حتى عمق (٢٨٩٠)كم، ويتكوّن من معادن غنيّة بسليكات الحديد والمغنيسيوم وأكاسيد الحديد والمغنيسيوم.

ويضمّ الستار العلوي غلافين هما **الجزء السفلي من الغلاف الصخري** (Lithosphere) الذي يمتدّ لعمق (١٠٠)كم تقريبًا، وهذا الغلاف يشمل القشرة الأرضية والجزء الأعلى الصُّلب من الستار، ويتّصف بالصلابة والقابلية للتصدّع. و**الغلاف اللدن** (Asthenosphere) الذي يقع أسفل الغلاف الصخري، وتتّصف مادته بأنها لدنة ومنصهرة جزئيًّا، لاحظ الشكل (٥–٣).

يفصل الغلاف الصخري عن الغلاف اللدن حدّ حارّ يُطلق عليه اسم **الحدّ الحراري** (Thermal Boundary) حيث تبلغ درجة حرارته (١٢٨٠)°س، وبعد هذا الحدّ تبدأ الصخور بالانصهار الجزئي والتدفّق بمعدّل يصل إلى ١٥ سم/ سنة.



الشكل (٥–٣): نُطُق الأرض الرئيسة وأجزاؤها.

٣- اللب الخارجي (Outer Core)

يمتدّ من نهاية الستار عند عمق (٢٨٩٠)كم إلى عمق (٥١٥٥)كم، ويفصله عن الستار انقطاع يُسمّى **انقطاع غوتنبيرغ** (Gutenberg Discontinuity)، انظر الشكل (٥-٣). ويتكوّن اللب الخارجي في غالبيته من الحديد ونسب قليلة جدًّا من الكبريت والأكسجين والنيكل، وتعمل العناصر الخفيفة فيه؛ الكبريت والأكسجين على خفض درجة انصهاره، بحيث تصبح أقل من درجة الحرارة في النطاق؛ ما يؤدي إلى انصهاره كليًّا ووجوده في الحالة السائلة. وللّب الخارجي أهمية كبيرة في توليد المجال المغناطيسي للأرض؛ إذ ينتج هذا المجال بفعل التيارات الكهربائية الناتجة من تيارات الحمل في هذا اللب؛ نظرًا لوجوده في حالة سائلة، بالإضافة إلى دوران الأرض حول محورها.

٤- اللب الداخلي (Inner Core)

يمتدّ من نهاية اللب الخارجي عند عمق (٥١٥٥)كم حتى مركز الأرض عند العمق (٦٣٧١)كم، ويفصله عن اللب الخارجي انقطاع يُسمّى **انقطاع ليمان** (Lehmann Discontinuity)، انظر الشكل (٥-٣). ويتكوّن في غالبيته من الحديد ونسب قليلة جدًّا من النيكل، ويتميّز بأنه صُلب على الرغم من درجة الحرارة المرتفعة جدًّا في مركز الأرض؛ وذلك بسبب الضغط الكبير الذي يمنع انصهاره.

ولكن، كيف تسلك الأمواج الزلزالية عند انتقالها من نطاق رئيس إلى نطاق رئيس آخر؟ وماذا يحدث لها عند انتقالها داخل النطاق الواحد؟

بالعودة إلى الشكل (٥-٢)، نلاحظ أن سرعة الأمواج الزلزالية تتغيّر عند انتقالها بين النُطُق المختلفة، وتتغيّر سرعتها أيضًا عند انتقالها في النطاق الواحد، ولكن كيف يكون التغيّر في السرعة؟

تزداد سرعة الأمواج الزلزالية تدريجيًّا من سطح الأرض حتى نهاية القشرة الأرضية، وعند انقطاع موهو تزداد سرعة الأمواج الزلزالية زيادة مفاجئة معلنةً عن نهاية القشرة الأرضية وبداية الستار، ولهذا السبب أُطلِقَ عليه مفهوم **الانقطاع** (Discontinuity)، لأنه يحصل عنده تغيّر مفاجئ وكبير في سرعة الأمواج الزلزالية عند الانتقال بين نطاقين رئيسين. يلي ذلك زيادة تدريجية في السرعة حتى عمق (١٠٠)كم تقريبًا، وعند هذا العمق يحدث انخفاض

طفيف مفاجئ في سرعة الأمواج الزلزالية ويستمر حتى العمق (٢٥٠)كم.

يُسمّى هذا الجزء من الستار العلوي **نطاق السرعة المنخفضة** (Low-Velocity Zone)؛ نظرًا لانخفاض سرعة الأمواج الزلزالية فيه، ويتميّز هذا الجزء بوجوده في حالة الانصهار الجزئي، إذ لا يزيد مقدار الصخور المنصهرة جزئيًّا فيه عن ٢٪ من حجم المنطقة كلها، وذلك لأن جزءًا بسيطًا من هذه الصخور يكون قد اقترب من درجة انصهار المادة وهو يُشكّل جزءًا مهمًّا من الغلاف اللدن، انظر الشكل (٥-٢)، وله دور مهم في حركة الصفائح التكتونية كما ستدرس لاحقًا.

بعد ذلك تزداد سرعة الأمواج الزلزالية تدريجيًّا ابتداءً من نهاية نطاق السرعة المنخفضة حتى العمق (٤١٠)كم، وعند هذا العمق يحدث زيادة طفيفة مفاجئة في السرعة؛ لأن المعادن المكوّنة للصخور تغيّر من بِنيتها البلورية، ولا تغيّر من تركيبها الكيميائي؛ وذلك استجابة لتغيّر ظروف الضغط ودرجة الحرارة، يلي ذلك زيادة تدريجية في السرعة حتى العمق (٦٦٠)كم. ويُسمّى العمق الممتدّ من (٤١٠)كم إلى العمق (٦٦٠)كم **النطاق الانتقالي** (Transition Zone)، انظر الشكل (٥-٣).

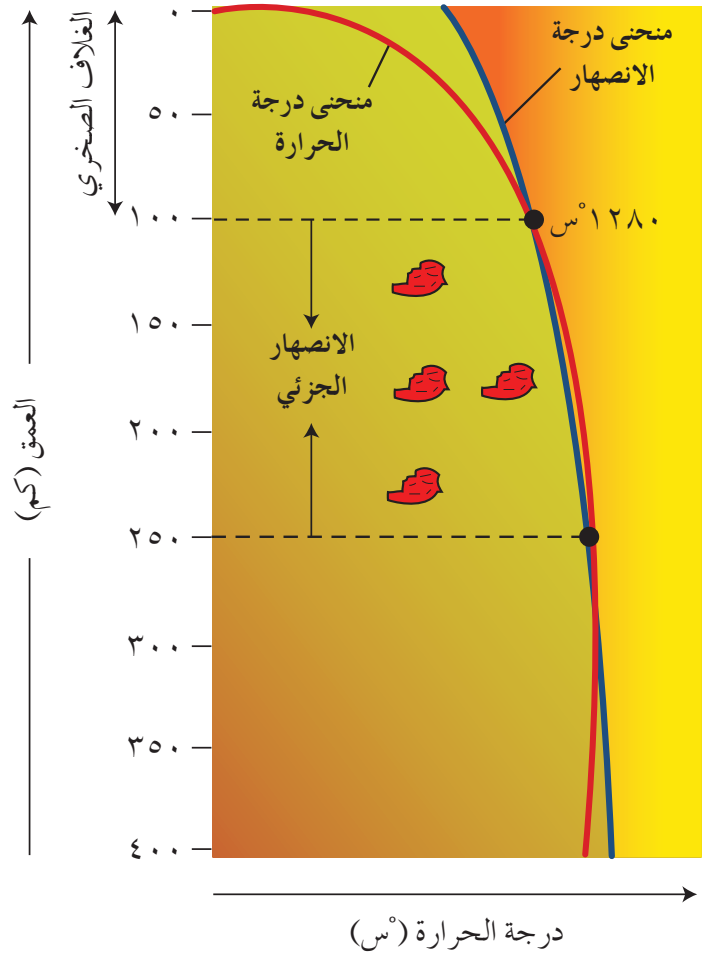
وعند انتقال الأمواج الزلزالية من الستار العلوي إلى الستار السفلي، يحدث زيادة طفيفة مفاجئة أخرى في سرعة الأمواج الزلزالية بسبب تغيّر التركيب المعدِني للستار السفلي، ثمّ تزداد سرعتها تدريجيًّا حتى حدود اللب الخارجي (انقطاع غوتنبيرغ).

ولكن، ماذا يحدث لسرعة الأمواج الزلزالية عند انتقالها في اللّبّين الخارجي والداخلي؟

لاحظ العلماء اختفاء الأمواج الثانوية لدى انتقالها من الستار السفلي إلى اللب الخارجي، وحدوث انخفاض كبير مفاجئ في سرعة الأمواج الأولية، ما أوحى إلى العلماء أن اللب الخارجي يكون في الحالة السائلة. ولاحظ العلماء حدوث زيادة مفاجئة في سرعة الأمواج الأولية عند انتقالها إلى اللب الداخلي. وبناءً على حسابات فيزيائية قام بها العلماء استدلّوا عن طريقها على أن الأمواج الثانوية لا بد أن تظهر مرة أخرى في اللب الداخلي؛ لأنه نطاق صُلب ذو كثافة كبيرة، وأن الأمواج الثانوية التي سوف تظهر في اللب الداخلي ناتجة من تحوّل أو تفرّع في الأمواج الأولية.

اختبر معلوماتك

ادرس الشكل (٥–٤)، الذي يوضّح منحنيي درجة الحرارة ودرجة انصهار الصخور وعلاقتهما بالعمق، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.



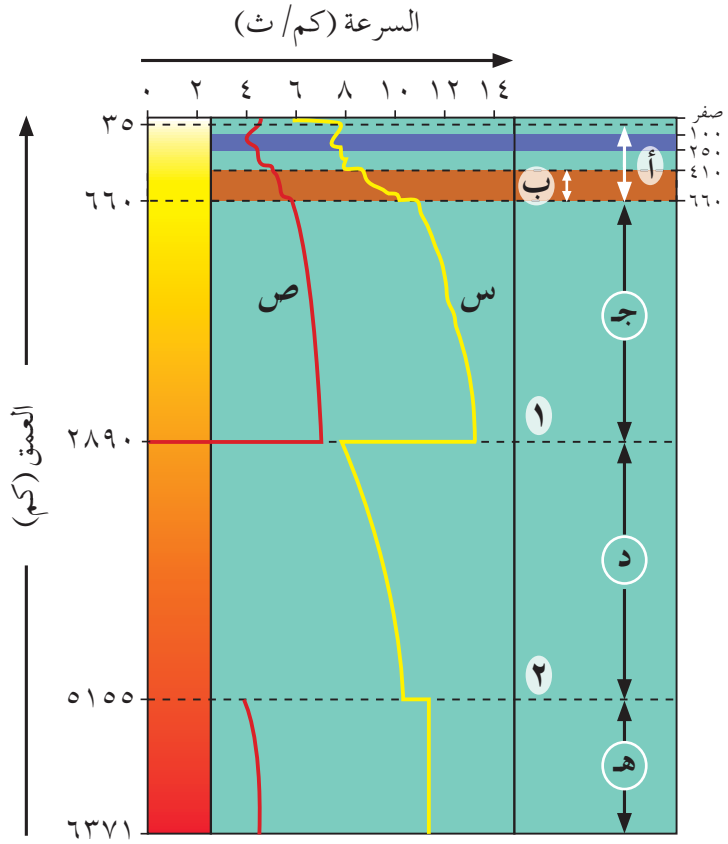
الشكل (٥–٤): اختبر معلوماتك.

١– ماذا يُسمّى النطاق الممتد من العمق (١٠٠)كم إلى العمق (٢٥٠)كم؟ وما سبب تسميته بهذا الاسم؟

٢– فسّر سبب الانصهار الجزئي للصخور عند هذا العمق.

١– وضّح المقصود بكل من: انقطاع موهو، وانقطاع ليمان، ومنطقة احتجاب الأمواج الثانوية، والغلاف الصخري، والغلاف اللدن، ونطاق السرعة المنخفضة، والنطاق الانتقالي.

٢– ادرس الشكل (٥–٥)، ثمّ أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٥–٥): السؤال (٢).

أ – حدّد نوع كل من الموجتين الزلزاليتين (س) و (ص).
كيف تمكّنت من الاستدلال عليهما؟

ب– ما الحالة الفيزيائية للنطاق (د)؟ فسّر إجابتك.

جـ– ما سبب انخفاض سرعة الأمواج الزلزالية في المنطقة الممتدة من العمق (١٠٠)كم إلى العمق (٢٥٠)كم؟

د – كيف يكون التغيّر في سرعة الأمواج الزلزالية في المنطقة (جـ)؟

هـ – ما أسماء المناطق التي تُشير اليها الرموز (أ، ب، جـ، د، هـ) والرقمين (١، ٢)؟

٣– قارن بين كل نطاقين من النُّطُق الآتية من حيث: السمك، والمكوّنات، وسلوك الأمواج الزلزالية فيها.

أ – اللب الخارجي واللب الداخلي.

ب– الستار العلوي والستار السفلي.

٤– فسّر ما يأتي تفسيرًا علميًّا دقيقًا:

أ – وجود اللب الداخلي في حالة صُلبة واللب الخارجي في حالة سائلة، على الرغم من أن درجة الحرارة في اللب الداخلي أعلى منها في اللب الخارجي.

ب– اختفاء الأمواج الثانوية خلال مرورها في اللب الخارجي.

جـ– يحدث زيادة مفاجئة طفيفة في سرعة الأمواج الزلزالية عند العمق (٤١٠)كم.

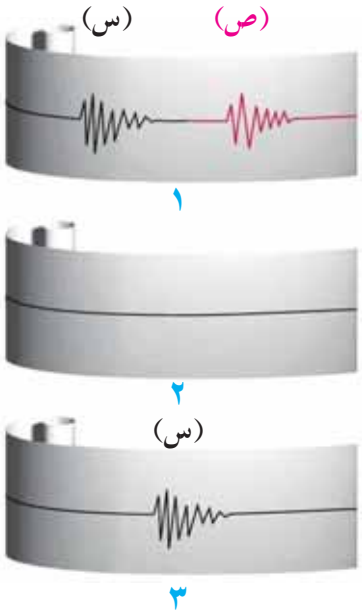
٥– من دراستك نُطُق الأرض الرئيسة وسلوك الأمواج الزلزالية فيها، أجب عن الأسئلة الآتية:

أ – تتبّع سلوك الأمواج الزلزالية، بدءًا من سطح الأرض وحتى العمق (٦٦٠)كم.

ب– ما الانقطاعات الرئيسة للأرض؟ وأين توجد؟

جـ– علامَ يدل التغيّر المفاجئ الكبير في سرعة الأمواج الزلزالية عند الانقطاعات الرئيسة للأرض؟

٦– يُمثّل الشكل (٥–٦) ثلاثة مخطّطات زلزالية رُصدت لمناطق مختلفة على سطح الأرض، ادرسه جيّدًا ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٥–٦): السؤال (٦).

أ – حدّد نوع الموجة الزلزالية (س) والموجة الزلزالية (ص).

ب– ما أسماء المناطق التي رُصدت فيها المخطّطات الزلزالية (١، ٢، ٣)؟

جـ– ما البُعد الزاوي الذي يمثّله المخطّط (٢)، ولماذا لم تُرصد فيه أي من النوعين من الأمواج الزلزالية؟

د – ما رقم المخطّط الذي تكون سرعة الأمواج الزلزالية فيه أكبر ما يمكن؟ فسّر إجابتك.

هـ – فسّر سبب رصد كلا النوعين من الأمواج الزلزالية في المخطّط (١)؟

و – فسّر سبب ظهور الموجة الزلزالية (س) في المخطّط الزلزالي (٣).

الفصل الثاني

ديناميكية الأرض
(Earth Dynamics)

كان الاعتقاد السائد لدى كثير من علماء الأرض أن القارات والمحيطات في حالة ثبات دائم، ولكن مع التقدّم الهائل في علوم الأرض وتوافر معلومات جديدة في القرن العشرين، وذلك بظهور فرضية انجراف القارات في عام ١٩١٥م، وتوسُّع قاع المحيط في عام ١٩٦٠م، ونظرية تكتونية الصفائح في عام ١٩٦٨م، أدرك العلماء أن الجزء الخارجي للأرض مكوّن من قطع (صفائح) متفاوتة في الحجم وأنها في حركة دائمة وفي تغيّر مستمر مع الزمن، وهذا يعمل على التغيّر المستمر في مظاهر سطح الأرض كنشوء السلاسل الجبلية وتكوّن المحيطات وتشكّل البراكين. وسبب هذا كلّه عمليات تحدث في باطن الأرض وتؤثّر في مظاهر سطحها؛ أي أن الأرض ليست ساكنة وإنما ديناميكية؛ أي في حركة دائمة. وهذا ما يوضّح مفهوم ديناميكية الأرض. وستتعرّف في هذا الفصل مضمون تلك الدراسات، وكيف فسّرت مظاهر سطح الأرض الرئيسة بالاعتماد على الأدلة العلمية.

أولًا: فرضية انجراف القارات

١- نص الفرضية

إذا أمعنت النظر في خريطة العالم، ستلحظ تشابهًا في حواف القارات المتقابلة، وقد ألهمت تلك الملاحظة الكثير من العلماء ومنهم عالم الأرصاد **ألفرد فغنر** (Alfred Wegener)، فافترض أنه لو أُعيد تركيب القارات فإنها ستلتقي في قارة واحدة، فوضع فرضية سمّاها **فرضية انجراف القارات** (Continental Drift Hypothesis) التي تنص على أن **"القارات الحالية كانت مجتمعة على شكل قارة عظمى واحدة تُسمّى بنغايا** (وتعني كل اليابسة)، **يُحيط بها محيط واسع اسمه بنثالاسيا** (ويعني كل المحيط)؛ **ثمّ بدأت بالانفصال إلى قارات مختلفة منذ ٢٠٠ مليون سنة، واستمرّت حتى وصلت إلى مواقعها الحالية"**. وقد دعّم (فغنر) فرضيته بالأدلة العلمية والشواهد الجيولوجية المؤيّدة، لاحظ الشكل (٥-٧).

(أ) موقع القارات قبل ٢٠٠ مليون سنة (قارة بنغايا العظمى).

(ب) موقع القارات في الوقت الحالي.

الشكل (٥–٧): موقع القارات قبل ٢٠٠ مليون سنة (أ)، وفي الوقت الحالي (ب).

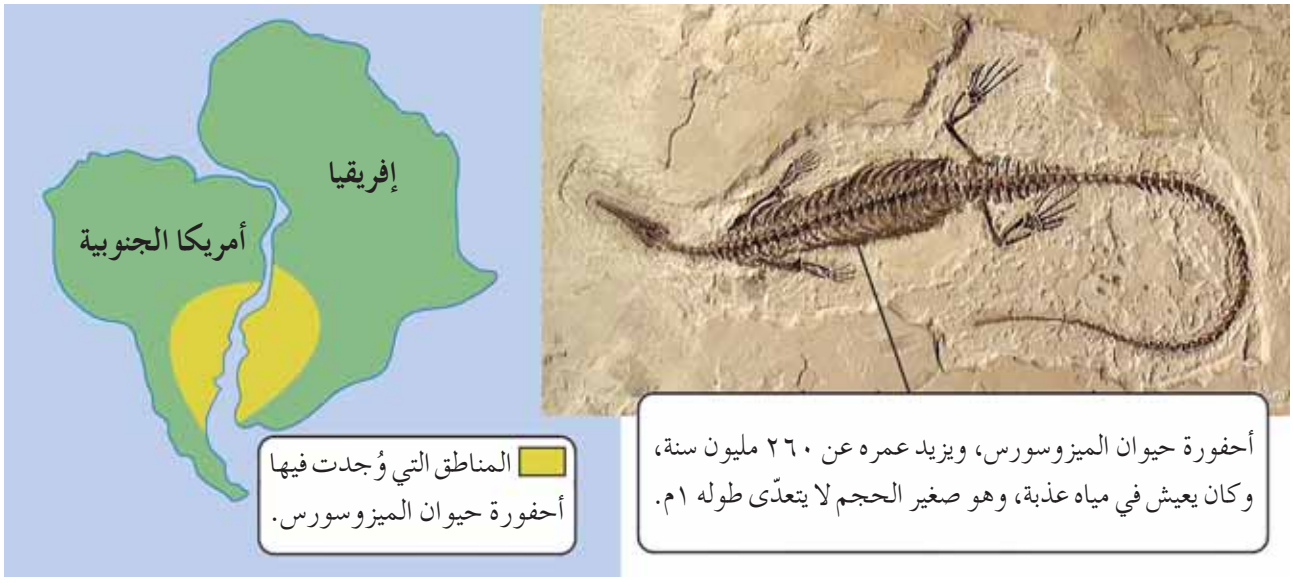
٢– الأدلة المؤيّدة لفرضية انجراف القارات

من الأدلة التي قدّمها العالم فغنر لإثبات صحة فرضيته، ما يأتي:

أ – **تشابه حواف القارات:** يُعدّ هذا الدليل أكثر الأدلة وضوحًا، فقد لاحظ العالم (فغنر) تطابق الحافة الغربية لقارة إفريقيا والحافة الشرقية لقارة أمريكا الجنوبية، وهذا الذي دفعه للتفكير في إمكانية مطابقة حواف القارات، وأن القارات الحالية كانت قارة واحدة ثمّ انفصلت، لاحظ الشكل (٥–٨).

الشكل (٥–٨): التشابه بين الحافة الغربية لقارة إفريقيا والحافة الشرقية لقارة أمريكا الجنوبية.

ب- الأحافير النباتية والحيوانية: بحث العالم (فغنر) عن الأحافير التي حُفظت في صخور ذات عمر واحد في قارتين مختلفتين متباعدتين في الوقت الحالي، ولمعرفة لماذا تُعدّ هذه الأحافير دليلًا قويًّا على انجراف القارات، انظر الشكل (٥-٩)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



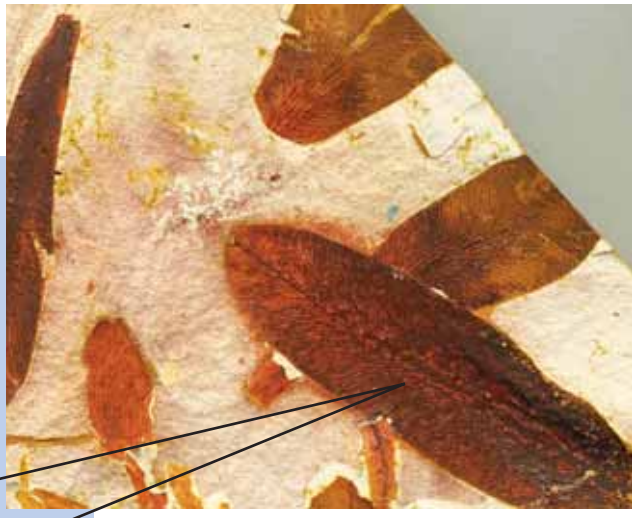
الشكل (٥-٩): التوزيع الجغرافي لأحفورة حيوان الميزوسورس الذي يزيد عمره عن ٢٦٠ مليون سنة.

- حدّد الموقع الجغرافي الذي تتوزّع فيه أحفورة حيوان الميزوسورس.
- في أي بيئة كان يعيش هذا الحيوان؟ وهل يستطيع السباحة عبر مياه المحيط الأطلسي الواسعة المالحة لينتقل من قارة إلى أخرى؟
- كيف تُفسّر إذن، وجوده في القارتين معًا؟

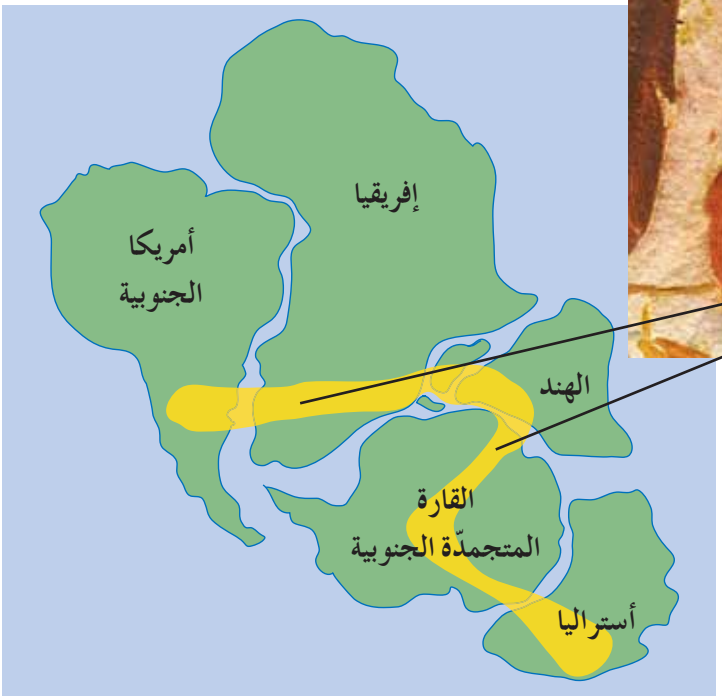
وجد (فغنر) أن **أحافير الميزوسورس** تنتشر في جنوب غرب إفريقيا وجنوب شرق أمريكا الجنوبية، ومن المعروف أن هذا الكائن الصغير الحجم، كان يعيش في مياه عذبة في العصر البيرمي (قبل حوالي ٢٦٠ مليون سنة)، فمن غير الممكن لهذا الكائن الصغير أن يعبر مياه المحيط الأطلسي المالح، ولو تمكّن فعلًا من الانتقال لما انحصر وجوده في مناطق محدّدة في القارتين، ويدلّ هذا أن القارتين كانتا قارة واحدة، ثمّ انفصلت.

اختبر معلوماتك

ادرس الشكل (٥–١٠)، الذي يوضّح **أحفورة الغلوسوبترس**، وهي أحفورة بذور سرخسيات عمرها أكبر من ٢٠٠ مليون سنة منتشرة في المناطق الموضّحة في الشكل، وتمتاز هذه البذور بِثقَل وزنها بحيث لا تستطيع الرياح حملها عبر مياه المحيطات الواسعة المالحة، فكيف تفسّر توزّعها في هذه القارات اعتمادًا على فرضية انجراف القارات؟



(أ) أحفورة الغلوسوبترس.



(ب) الانتشار الجغرافي لأحفورة الغلوسوبترس بين القارات.

الشكل (٥–١٠): اختبر معلوماتك.

جـ– المناخ القديم: استدل (فغنر) على المناخات التي سادت الأرض في الماضي من معرفته للخصائص المناخية المناسبة لتشكّل كل من الفحم الحجري، والرسوبيات الجليدية، والمتبخرات، والشعاب المرجانية. ولمعرفة كيف يُعدّ المناخ دليلًا على انجراف القارات، ادرس الشكل (٥–١١)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

(أ) رسوبيات جليدية. لاحظ الخدوش التي تتركها الكتل الجليدية في صخور مجرى النهر الجليدي.

(ب) توزّع الرسوبيات الجليدية قبل ٣٠٠ مليون سنة.

(جـ) توزّع الرسوبيات الجليدية القديمة في الوقت الحالي.

الشكل (٥–١١): الرسوبيات الجليدية (أ)، وتوزّعها في القارات قبل ٣٠٠ مليون سنة (ب)، وفي وقتنا الحالي (جـ).

- أين كانت تتوزّع الرسوبيات الجليدية قبل ٣٠٠ مليون سنة؟ لماذا؟
- أين تتوزّع الرسوبيات الجليدية نفسها حاليًّا؟ وما المناخ السائد في الوقت الحالي في هذه المناطق حسب موقعها في الشكل؟ هل يمكن للجليديات أن تتشكّل في هذه المواقع الآن؟

• كيف تفسّر توزّع الرسوبيات الجليدية في هذه المناطق حاليًا حسب فرضية (فغنر)؟

تُعرف **الرسوبيات الجليدية** (Glacial Sediments) بأنها رسوبيات سطحية تتكوّن من صخور مختلفة نقلتها الأنهار والكتل الجليدية من مكانها الأصلي إلى مكان آخر. وقد وجد العالم (فغنر) رسوبيات جليدية عمرها ٣٠٠ مليون سنة تقريبًا في جنوب قارة إفريقيا وأمريكا الجنوبية وأستراليا والهند، علمًا بأن مناخ هذه المناطق في الوقت الحالي حارّ نسبيًّا ولا يسمح بتكوّن الجليد واستدامته، وهذا المناخ غير ملائم لتكوّن الرسوبيات الجليدية، وقد فسّر ذلك بأن هذه الرسوبيات تكوّنت عندما كانت القارات متجمّعة حول القارة المتجمّدة الجنوبية قبل ٣٠٠ مليون سنة، ضمن ظروف باردة، ثمّ بدأت بالانجراف قبل نحو ٢٠٠ مليون سنة حتى وصلت إلى مكانها في الوقت الحالي.

اختبر معلوماتك

كيف تفسّر توزّع رسوبيات الفحم الحجري في قارتَي أوروبا وأمريكا الشمالية، على الرغم من أنه يتكوّن في مناخ حارّ ورطب، وهذه الظروف لا تتوافر ضمن التوزيع الحالي لهاتين القارتين.

٣- الأدلة المعارضة لفرضية انجراف القارات

على الرغم من صدق الأدلة التي ساقها (فغنر) على أن القارات كانت متّصلة، إلا أنها رُفضت للأسباب الآتية:

أ - أشار (فغنر) إلى أن القارات هي فقط التي تنجرف.

ب- أخفق (فغنر) في تقديم تفسير علمي لحركة القارات، إذ لم يستطِع أن يُقدّم آلية يُفسّر بها تحريك أو انجراف القارات الصُّلبة فوق صخور صُلبة تحتها. إذ افترض فغنر أن قوة جذب القمر للأرض هي القوة المسؤولة عن انجراف القارات، على الرغم من معرفته بضعف تلك القوة للحدّ الذي لا يمكن معه إحداث إزاحة كبيرة في مواقع القارات، إلا أنه ظنّ أنه بمرور ملايين السنين ستُصبح تلك القوّة كبيرة يسهُل ملاحظتها. لكن ضعف قوة جذب القمر للأرض، لم يُقنع علماء عصره بالتفسير الذي اقترحه لحركة القارات.

جـ- اعتقد (فغنر) أن القارات تنزلق فوق قيعان المحيطات الملساء، ولكن رفض العلماء تفسيره؛ لأن قيعان المحيطات ليست ملساء بل متنوعة التضاريس، ما يعني استحالة انجراف القارات الضخمة فوق قيعان المحيطات في مثل هذه الحالة.

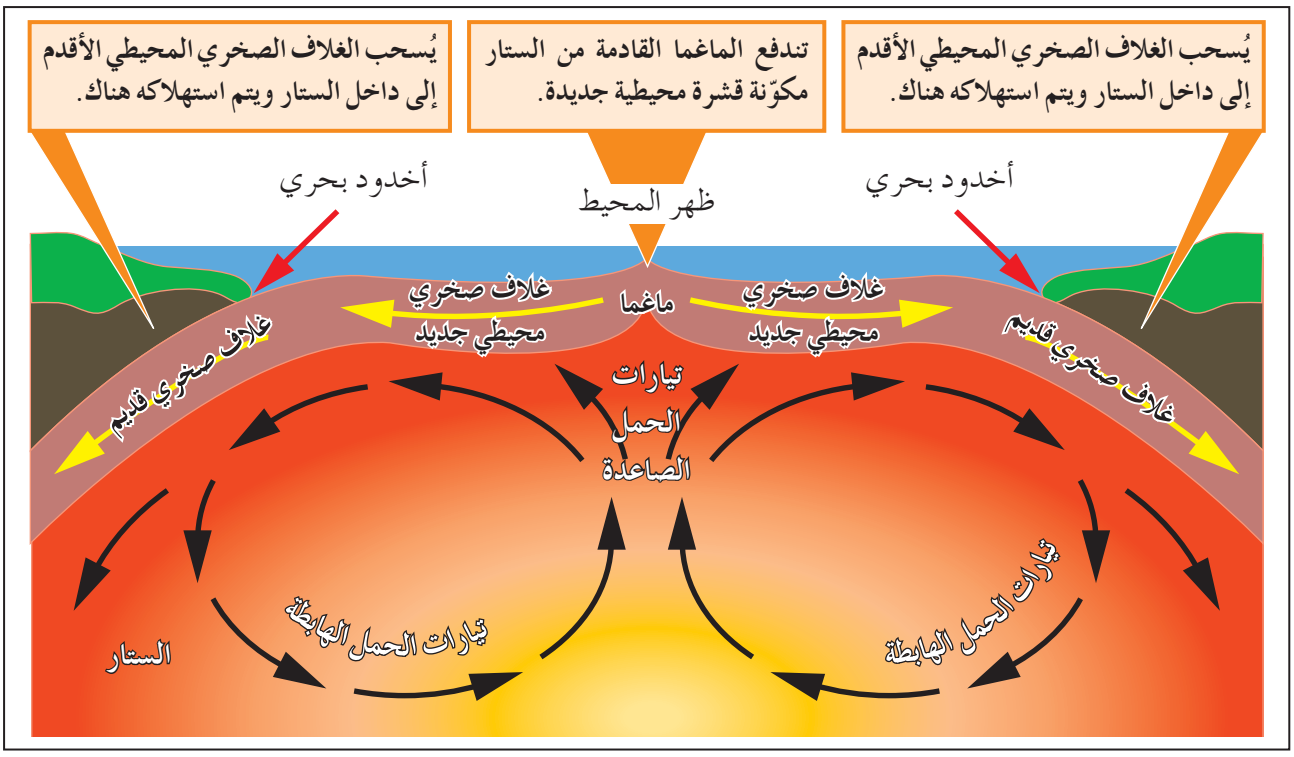
ثانيًا: توسُّع قاع المحيط

أثار اكتشاف تضاريس قاع المحيط المكوّنة من ظهر المحيط (Oceanic Ridge) والأخاديد البحرية (Trenches)، التي تعلّمتها في صفوف سابقة، اهتمام العالم **هاري هِس** (Harry Hess)، ما ساعده على اكتشاف آلية تكوّن القشرة المحيطية وأعمارها وتوسُّع قاع المحيط. فوضع العالم هِس في عام ١٩٦٠م، فرضية توسُّع قاع المحيط (Sea Floor Spreading) التي يقترح فيها أن "**ظهر المحيط يتوضّع فوق مناطق تعلو ستار الأرض، ومنه تصعد الماغما القادمة من الستار العلوي منتجة قشرة محيطية جديدة مكان القشرة المحيطية الأقدم التي أُزيحت جانبًا. وفي المقابل تُسحب القشرة المحيطية الأقدم إلى داخل الستار العلوي على الجانب الآخر من ظهر المحيط عند الأخاديد البحرية**". ولكن لم يتمكّن العالم (هِس) من تفسير سبب توسُّع قاع المحيط.

وفي ما بعد، اتّضح للعلماء أن المحرّك الرئيس للقشرة المحيطية هو تيارات الحمل، وأن ظهر المحيط يتوضّع فوق مناطق تعلو ستار الأرض، ومنه تصعد الماغما القادمة من الستار العلوي بواسطة تيارات الحمل أسفل القشرة، وتتحرّك تيارات الحمل في الستار تحتها في وضع أفقي وعلى جانبَي الظهر، وتؤدّي قوى الشدّ الناتجة من الحركة الأفقية التباعدية لتيارات الحمل إلى فتح طريق للماغما، حيث تتدفّق منتجة قشرة محيطية جديدة مكان القشرة المحيطية الأقدم التي أُزيحت جانبًا. وفي المقابل تُسحب القشرة المحيطية الأقدم إلى داخل الستار العلوي على الجانب الآخر من ظهر المحيط عند الأخاديد البحرية، وتُستهلك بفعل تيارات الحمل الهابطة.

ولكن، ما العلاقة التي تربط بين القشرة المحيطية والغلاف الصخري المحيطي؟

باستمرار اندفاع الماغما من الستار العلوي عند ظهر المحيط يستمرّ تكوّن قشرة محيطية جديدة، وبوجود تيارات الحمل يتم سحب القشرة المحيطية المتكوّنة بعيدًا عن ظهر المحيط. وتأخذ الماغما أسفل القشرة المحيطية المتكوّنة (مادة الستار) بالبرودة إلى ما دون ١٢٨٠ °س، وتزداد سماكتها وتصبح غلافًا صخريًّا محيطيًّا، لاحظ الشكل (٥-١٢).

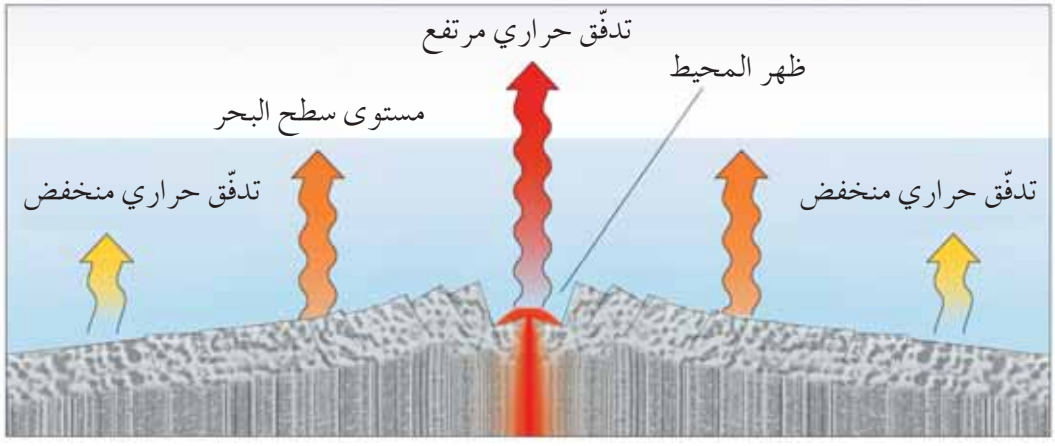


الشكل (٥–١٢): آلية توسُّع قاع المحيط بتيارات الحمل الصاعدة وتيارات الحمل الهابطة.

وقد اعتُمدت المشاهدات الآتية في دعم صحة توسُّع قاع المحيط:

١– قيم التدفّق الحراري

توصّل العلماء إلى أن أكبر قيمة للتدفّق الحراري تكون عند أظهُر المحيطات، وهذا بسبب اندفاع الماغما عندها، وتناقص قيم التدفّق الحراري بدءًا من ظهر المحيط باتجاه الأخاديد نتيجة لتبريد الغلاف الصخري المحيطي، وتماثل قيمها على جانبَي ظهر المحيط، لاحظ الشكل (٥–١٣).

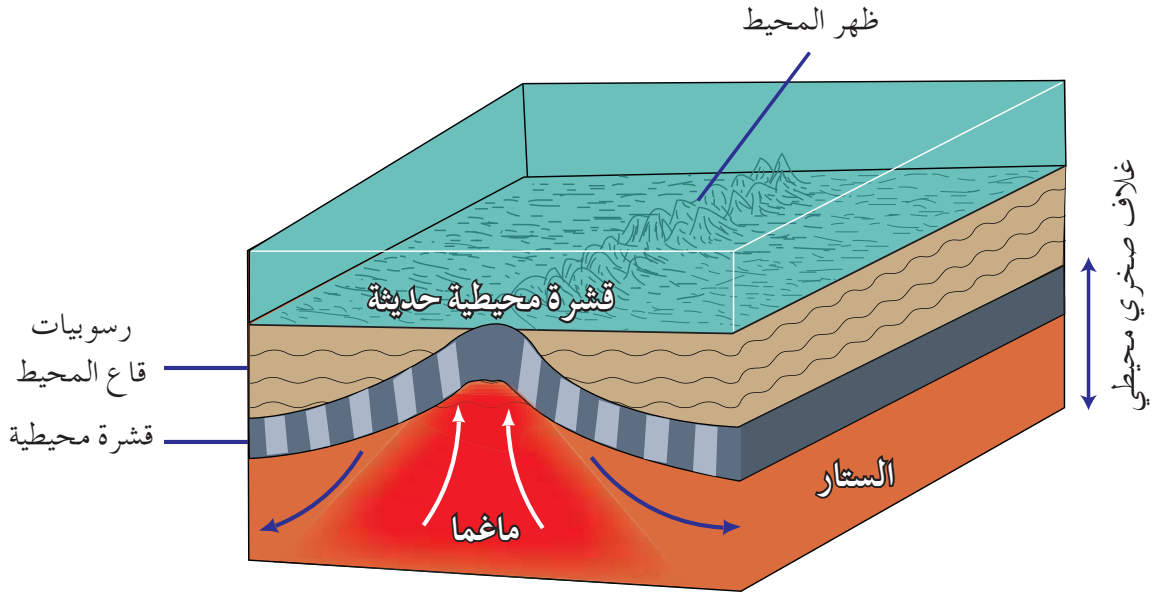


الشكل (٥–١٣): قيم التدفّق الحراري عند ظهر المحيط وعلى جانبيه.

٢- سمك رسوبيات قاع المحيط

أثبتت الدراسات التي قامت بها سفينة الأبحاث **جلومار** (Glomar Challenger)، أن متوسط سمك الرسوبيات التي تغطي قاع المحيطات حاليًّا لا يتعدّى نصف كيلومتر تقريبًا، وهذا السمك يُعدّ ضئيلًا جدًّا قياسًا إلى عمر الأرض، فما الذي حدث؟

تتميّز القشرة المحيطية بأنها دائمة التجدّد، ومن المهم أن نعلم أن تراكم الرسوبيات فوق القشرة المحيطية الحديثة بسماكات كبيرة يحتاج زمنًا طويلًا جدًّا، ولا يتوافر هذا الزمن الطويل لرسوبيات قاع المحيط لتجدّد قشرته باستمرار. كما وجد العلماء أن سمك الرسوبيات يزداد كلما ابتعدنا عن ظهر المحيط باتجاه الأخاديد، وأن سماكاتها متماثلة على جانبَي ظهر المحيط، لاحظ الشكل (٥-١٤).



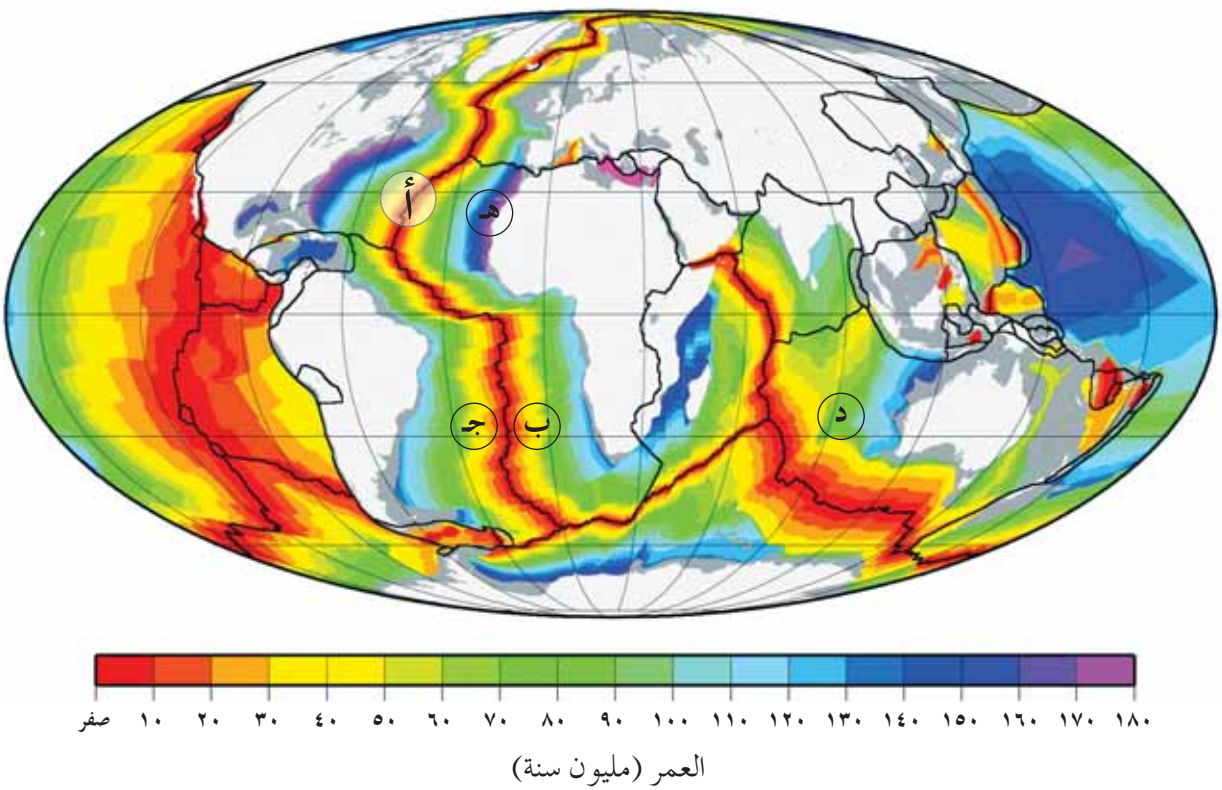
الشكل (٥-١٤): خصائص قاع المحيط وزيادة سمك الرسوبيات بالإبتعاد عن ظهر المحيط.

٣- أعمار صخور القشرة المحيطية

يزداد عمر صخور القشرة المحيطية كلما ابتعدنا عن ظهر المحيط باتجاه الأخاديد، إضافة إلى تماثل أعمار هذه الصخور على جانبَي ظهر المحيط. وقد وُجد أن أكبر عمر للقشرة المحيطية لا يزيد على ١٨٠ مليون سنة؛ أي أن أكبر عمر تبلغه صخور القشرة المحيطية يعود إلى حقب الحياة المتوسطة.

اختبر معلوماتك

ادرس الشكل (٥–١٥)، الذي يوضّح التغيّر في أعمار صخور القشرة المحيطية على جانبيَ أظهُر المحيط، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٥–١٥): اختبر معلوماتك.

١– صِفْ أعمار صخور القشرة المحيطية بالانتقال من المنطقة (أ) إلى المنطقة (هـ).

٢– ما المظهر الجيولوجي الذي تقع عنده المنطقة (أ)، موضّحًا كيف توصلت لذلك؟

٣– عند أيّ المناطق تكون قيمة التدفّق الحراري أعلى ما يمكن؟ لماذا؟

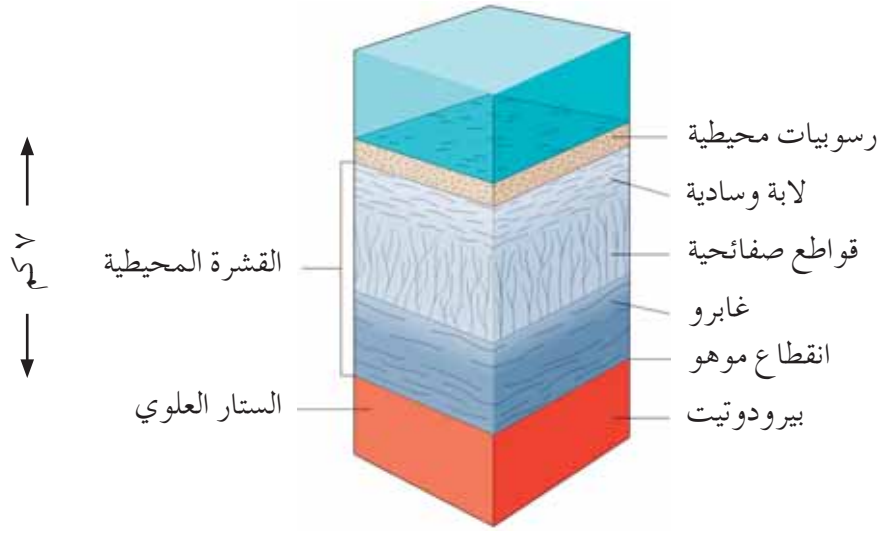
٤– أين تتوقّع أن يكون الغلاف الصخري أبرد وأكثر سمكًا؟ لماذا؟

٥– في أيّ الموقعين؛ (أ) أم (ب) يكون سمك الرسوبيات أكبر؟ لماذا؟

٦– اذكر ثلاث خصائص مشتركة بين المنطقتين (ب) و (جـ).

٤- المكوّنات الصخرية للقشرة المحيطية

أخذت سفن الحفر مقاطع عمودية من قاع المحيط، فأظهرت أن قيعان المحيطات تتشابه جميعها في مكوّناتها الصخرية؛ وتتكوّن القشرة المحيطية من رسوبيات محيطية، ولابة وسادية، وقواطع صفائحية، وصخور الغابرو، انظر الشكل (٥-١٦). وينطبق ذلك على أجزاء القشرة المحيطية كافّة؛ ما يدلّ على أن المحيطات جميعها قد تكوّنت بالكيفية ذاتها منذ نشأتها لغاية الآن.

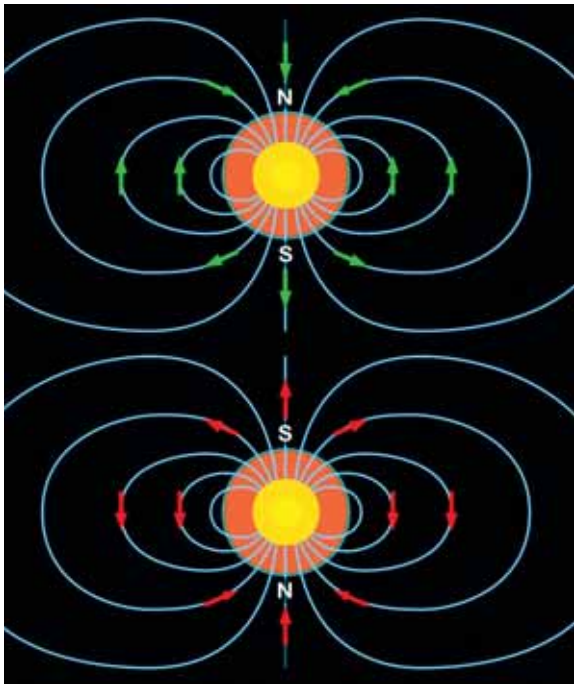


الشكل (٥-١٦): مقطع عمودي في القشرة المحيطية التي تُمثّل الجزء العلوي للغلاف الصخري المحيطي.

٥- انقلاب المغناطيسية

تعلّمت سابقًا أن حركة تيارات الحمل في اللب الخارجي للأرض هي السبب الرئيس لتوليد المجال المغناطيسي الأرضي؛ لذا، فإن تغيّر اتجاه حركة تيارات الحمل في اللب الخارجي يؤدي إلى انقلاب المجال المغناطيسي الأرضي فعليًّا، فيُصبح القطب الشمالي المغناطيسي قطبًا جنوبيًّا مغناطيسيًّا، ويُصبح القطب الجنوبي المغناطيسي قطبًا شماليًّا مغناطيسيًّا؛ أي أن القطبين قد تبادلا الأماكن. ويُصاحب انقلاب المجال المغناطيسي هبوط تدريجي في شدّة المجال المغناطيسي. وعندما يكون اتجاه القطب الشمالي المغناطيسي باتجاه القطب الحالي، تُسمّى قطبية الصخور التي تتّجه فيها المعادن المغناطيسية باتجاه المجال المغناطيسي الحالي **القطبية العادية** (Normal Polarity)، وعندما يكون اتجاه القطب الشمالي المغناطيسي عكس اتجاه القطب الحالي؛ تُسمّى قطبية الصخور التي تتّجه فيها

المعادن المغناطيسية باتجاه معاكس لاتجاه المجال المغناطيسي الحالي **القطبية المقلوبة** (Reverse Polarity)، كما هو موضّح في الشكل (٥–١٧).

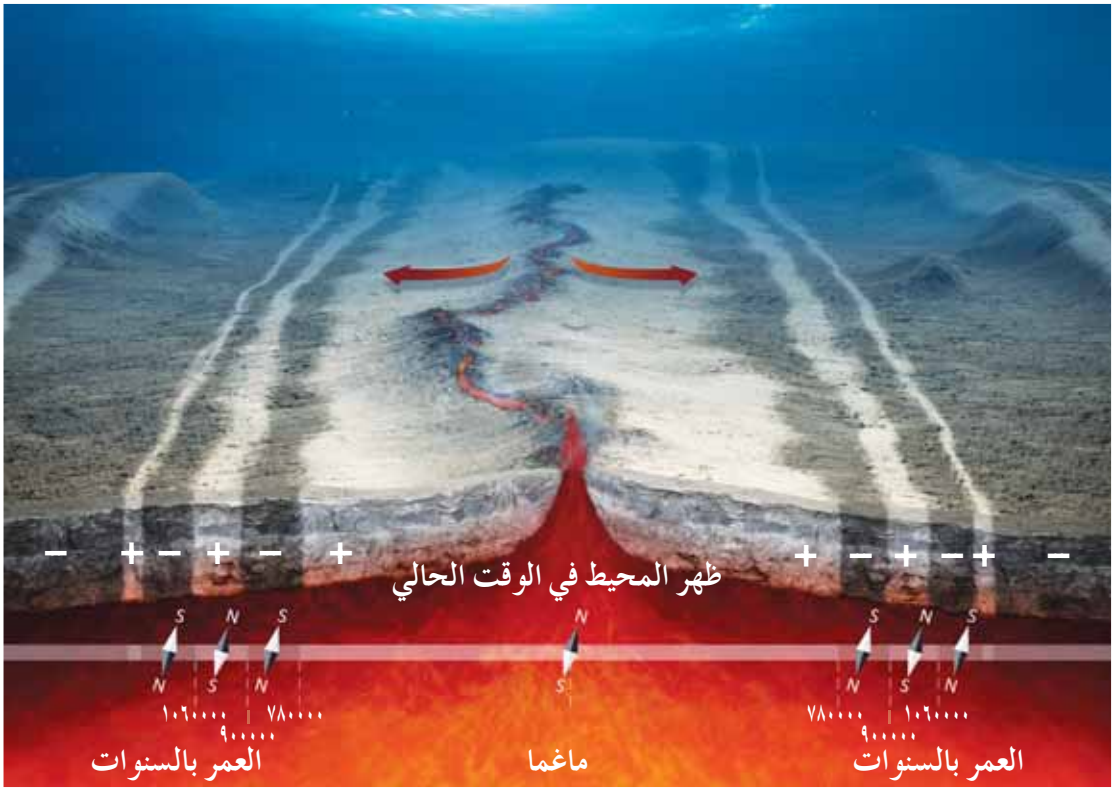


الشكل (٥–١٧): انقلاب المجال المغناطيسي الأرضي، لاحظ اتجاه خطوط المجال المغناطيسي في كلا الشكلين؛ قطبية عادية (أ)، وقطبية مقلوبة (ب).

وقد قام العالمان فاين (Vine) وماثيوس (Matthews) عام ١٩٦٣م، بقياس شدّة المجال المغناطيسي لصخور قاع المحيط بواسطة جهاز حساس يقيس شدّة المجال المغناطيسي الأرضي، يُسمّى **جهاز الماجنيتومتر** (Magnetometer). وتبيّن لهما أن صخور قاع المحيط مرتّبة على شكل **حزم مغناطيسية** (Magnetic Strips) ذات شدّة مجال مغناطيسي مرتفعة تُوجد بوضع متبادل مع حزم أخرى ذات شدّة مجال مغناطيسي منخفضة على جانبَي ظهر المحيط. وقد فسّرا ذلك بأن **صخور القشرة المحيطية ذات القطبية المغناطيسية العادية (وتأخذ إشارة موجبة +) لها شدّة مجال مغناطيسي مرتفعة، وصخور القشرة المحيطية ذات القطبية المغناطيسية المقلوبة (وتأخذ إشارة سالبة –) لها شدّة مجال مغناطيسي منخفضة.**

لكن، كيف يمكن تفسير تماثل الحزم المغناطيسية من حيث القطبية المغناطيسية والعمر والعرض؛ أي المسافة التي يقطعها البازلت المتدفّق على جانبَي ظهر المحيط بناءً على توسُّع قاع المحيط؟

فسّر العالمان فاين وماثيوس التماثل في القطبية المغناطيسية على جانبَي ظهر المحيط بأن المعادن المغناطيسية المحفوظة في الصخور المكوّنة لقاع المحيط على طول ظهر وسط المحيط تأخذ اتجاه وشدّة المجال المغناطيسي الأرضي السائد وقت تبلورها نفسه. ونظرًا لتكافؤ سرعة التدفّق على جانبَي ظهر المحيط؛ تتكوّن الحزم المغناطيسية على جانبيه بالقطبية المغناطيسية والعمر والعرض نفسها ضمن مدّة زمنية واحدة، انظر الشكل (٥-١٨).



الشكل (٥-١٨): تماثل الحزم المغناطيسية من حيث القطبية المغناطيسية والعمر والعرض على جانبَي ظهر المحيط، الأمر الذي يثبت صحّة توسُّع قاع المحيط. وتشير إشارة (+) إلى أن صخور القشرة المحيطية ذات قطبية مغناطيسية عادية، وتشير إشارة (-) إلى أن صخور القشرة المحيطية ذات قطبية مغناطيسية مقلوبة.

ويمكن حساب معدّل توسُّع الحزمة المغناطيسية باستخدام العلاقة الرياضية الآتية:

معدّل توسُّع الحزمة المغناطيسية (سم/ سنة) = عرض الحزمة المغناطيسية (سم)/ مدّة القطبية (سنة)

اختبر معلوماتك

ادرس الجدول (٥–١) جيدًا، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

الجدول (٥–١): خصائص الحزم المغناطيسية على جانبيَ ظهر محيط ما.

الحزمة المغناطيسية	عرض الحزمة المغناطيسية (كم)	القطبية المغناطيسية	العمر (مليون سنة)	مدّة القطبية (مليون سنة)	معدّل التوسُّع (سم/سنة)
أ	٤٠٠	+	١٧	١٠	٤
ب	٢٠٠	-	٧	٥	
جـ	ص	+	٢	٢	٤
د	٢٠٠	-	٧	٥	٤
هـ	٤٠٠	+	١٧	١٠	

١– أيُّ الحزم المغناطيسية تقع عند ظهر المحيط؟

٢– احسب معدّل توسُّع الحزمتين المغناطيسيتين؛ (ب) و (هـ).

٣– كيف تتغيّر أعمار الصخور عند الانتقال من الحزمة (أ) إلى الحزمة (جـ)، وعند الانتقال من الحزمة (جـ) إلى الحزمة (هـ)؟ ماذا تستنتج؟

٤– لماذا تتماثل الحزمتان المغناطيسيتان (أ) و (هـ) في العرض والقطبية المغناطيسية والعمر ومدّة القطبية؟ فسّر ذلك.

ومن دراسة أعمار القشرة المحيطية، تبيّن للعلماء أن المحيطات قد نشأت حديثًا وأن أقدمها لا يتجاوز عمره (١٨٠) مليون سنة تقريبًا، وهي منذ ذلك الوقت في حالة توسُّع مستمر. ومن ثمّ، فإن قيعان المحيطات تتوسّع باستمرار حاملة معها القارات. وبهذا أمكن تفسير حركة القارات، التي عجز عن تفسيرها (فغنر)، بتوسُّع قيعان المحيطات.

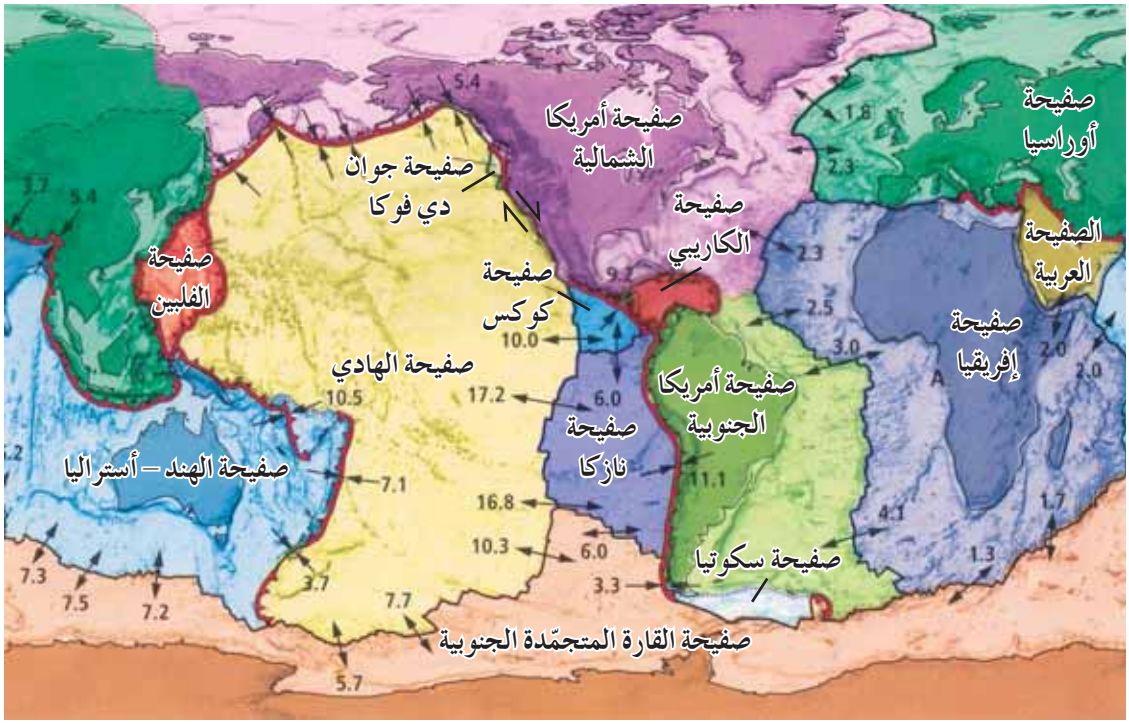
ثالثًا: نظرية تكتونية الصفائح

عُدّت نظرية تكتونية الصفائح ثورة في علوم الأرض التي وُضعت في عام ١٩٦٨م، لأنها فسّرت آلية تشكّل معظم المظاهر الجيولوجية الكبرى، مثل السلاسل الجبلية الضخمة والمحيطات والأخاديد البحرية والقارات وتوزيع البراكين وأماكن حدوث الزلازل وغيرها. وقد اعتَمدت هذه النظرية في معطياتها، على الأدلة العلمية التي وفّرتها فرضية انجراف القارات وتوسُّع قاع المحيط. فما المقصود بتكتونية الصفائح؟ وما مصدر القوى المسبّبة لحركتها؟ وكيف تتشكّل المظاهر الجيولوجية المختلفة بناءً على هذه النظرية؟

١- مفهوم نظرية تكتونية الصفائح

تنص **نظرية تكتونية الصفائح** (Plate Tectonics Theory)، على أن "**الغلاف الصخري للأرض بنوعَيه؛ القاري والمحيطي، مقسّم إلى قِطَع أرضية تُسمّى الصفائح** (Plates)، **تتحرّك كل صفيحة منها بصورة مستقلة نسبة إلى الأخرى فوق الغلاف اللدن، ويرافق ذلك تغيُّر في أشكالها وحجومها**".

ولكن ما أنواع هذه الصفائح؟ وما أنواع الحركة في ما بينها؟ لمعرفة ذلك، ادرس الشكل (٥-١٩)، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.



الشكل (٥-١٩): الصفائح الأرضية الرئيسة الكبرى والمتوسطة والصغرى، وتُمثّل الأرقام سرعة الصفائح بالاتجاهات المُشار إليها مَقيسة بوحدة (سم/ سنة).

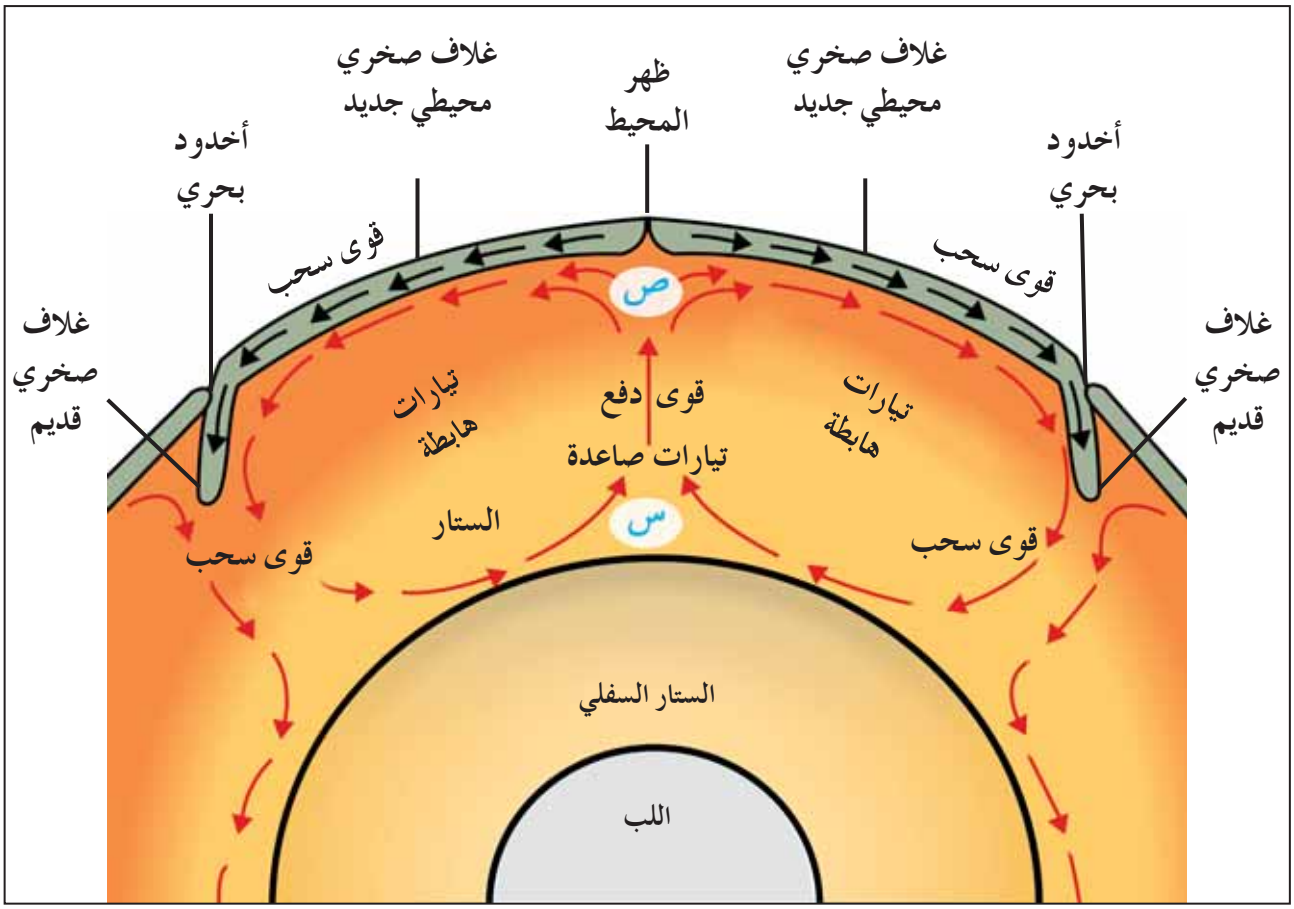
- ما نوع الحركة بين كل من صفيحة أمريكا الجنوبية وصفيحة نازكا؟ وما نوع الحركة بين صفيحة إفريقيا وصفيحة أمريكا الجنوبية؟
- هل توجد صفيحة مكوّنة من غلاف صخري قاري فقط؟ وهل توجد صفيحة مكوّنة من غلاف صخري محيطي فقط؟ فسّر ذلك.

تُصنّف الصفائح الأرضية إلى نوعين: **صفائح محيطية** يبلغ متوسط سمكها ٦٠كم، وتتكوّن من غلاف صخري محيطي حيث يتكوّن من قشرة محيطية فقط مثل الصفيحة أسفل المحيط الهادي (صفيحة الهادي)، و**صفائح قارية- محيطية** قد يصل سمكها إلى ١٥٠كم، وتتكوّن في جزئها الأعلى من قشرة قارية وأجزاء من القشرة المحيطية مثل صفيحة أمريكا الجنوبية، انظر الشكل (٥-١٩). إذ لا توجد صفيحة قارية دون وجود جزء محيطي فيها، وهذا يعني أن الحركة تكون على مستوى الصفيحة التي تشمل القارة وأجزاء من المحيط لا على مستوى القارة. ومن ناحية أخرى، فإن الحركة تشمل الغلاف الصخري لا القشرة فقط، وهذا ينقض ما جاءت به فرضية انجراف القارات التي افترضت انزلاق القارات على سطح قاع المحيط.

وتختلف الصفائح الأرضية في مساحاتها وأشكالها ونوع الحركة على حدودها. فعلى سبيل المثال، تُعدّ صفيحة الهادي أكبر الصفائح مساحة، بينما تُعدّ الصفيحة العربية مثالًا على الصفائح المتوسطة المساحة، وصفيحة جوان دي فوكا التي تقع بين صفيحتَي أمريكا الشمالية والهادي من الصفائح الصغيرة المساحة.

٢- كيف تتحرّك الصفائح؟

اقتُرِحت قوى كثيرة لتفسير حركة الصفائح، لكن القوى الأكثر قبولًا هي **تيارات الحمل** (Convection Currents) في الستار. فكيف تعمل تيارات الحمل على تحريك الصفائح؟ لمعرفة ذلك؛ ادرس الشكل (٥-٢٠)، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.



الشكل (٥–٢٠): نموذج يُفسّر القوى المحرّكة للصفائح الأرضية؛ تيارات الحمل وما ينتج منها من قوى الدفع عند ظهر المحيط وقوى السحب عند الأخاديد البحرية.

- هل تتساوى كثافة مادة الستار في المنطقتين (س) و(ص)؟ وهل لذلك علاقة بدرجة حرارة الستار؟
- ما نوع التيارات (صاعدة أم هابطة) التي تعمل على تباعد الصفائح وبناء قشرة محيطية جديدة عند أظهُر المحيطات؟ وتلك التي تؤدي إلى سحب القشرة المحيطية عند الأخاديد البحرية؟

تتولّد تيارات الحمل نتيجة التوزيع غير المتساوي للحرارة داخل ستار الأرض، حيث يتم تسخين مادة الستار العلوي، فتقلّ كثافتها وترتفع إلى الأعلى وتبدأ بالانصهار مكوّنة تيارات الحمل الصاعدة التي تبني غلاف صخري محيطي جديد عندما تبرد عند ظهر المحيط. وحيث تتحرّك جانبيًّا، تحمل تيارات الحمل صخور ظهر وسط المحيط القديمة وتبرد في

أثناء ابتعادها عن الظهر وتزداد سماكة وكثافة الغلاف الصخري المحيطي، وتهبط مع تيارات الحمل الهابطة التي تعمل على سحب الغلاف الصخري المحيطي القديم واستهلاكه في الستار العلوي، لاحظ الشكل (٥–٢٠). وتُسهم الماغما الصاعدة في دفع الصفائح بعيدًا عن الظهر ويُطلق عليها اسم **قوى الدفع** (Ridge Push). ويُسهم الجزء الغاطس من الصفيحة المحيطية في سحبها إلى الأسفل بسبب قوى الجاذبية في ما يُسمّى **قوى السحب** (Slab Pull)، لاحظ الشكل (٥–٢٠). وبهذا تكون القوى المؤثّرة في حركة الصفائح تيارات الحمل بوصفها قوة رئيسة، وقوى الدفع وقوى السحب بوصفها قوى مساندة.

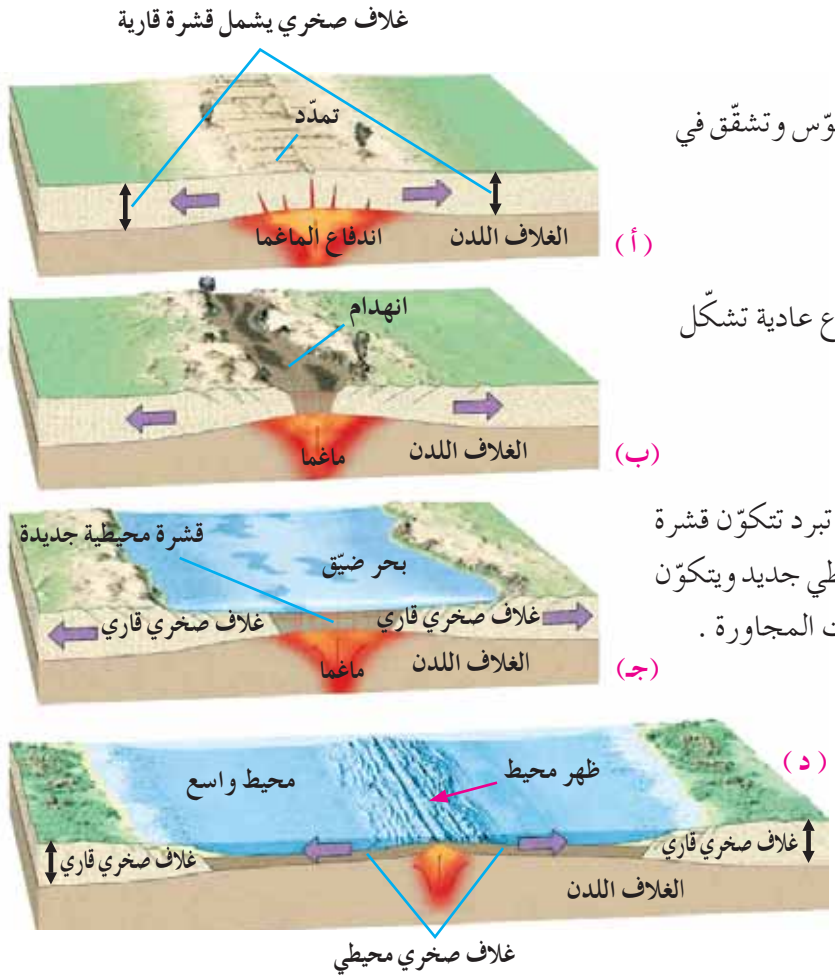
لا تتوسّع المحيطات جميعها بالسرعة نفسها، ابحث في الأسباب المؤدية إلى ذلك.

٣– أنواع حدود الصفائح

صُنّفت حدود الصفائح إلى ثلاثة أنواع اعتمادًا على طبيعة الحركة المميّزة لها؛ وهي: الحدود المتباعدة، والحدود المتقاربة، والحدود التحويلية (الجانبية)، انظر الشكل (٥–١٩). ويُسمّى الحدّ قاريًّا أو محيطيًّا حسب الجزء الذي تشترك به الصفيحة عندما تقابل الصفيحة الأخرى. ويُسمّى الحدّ قاريًّا – قاريًّا عندما يتقابل الجزء القاري للصفيحتين؛ ويُسمّى الحدّ قاريًّا – محيطيًّا عندما يتقابل الجزء القاري للصفيحة الأولى مع الجزء المحيطي للصفيحة المقابلة.

أ – الحدود المتباعدة

تعلّمت سابقًا عند دراستك آلية توسُّع قاع المحيط أن الصفائح تتباعد عن بعضها بعضًا نتيجة اندفاع الماغما من الستار العلوي وبناء قشرة محيطية جديدة عند أظهُر المحيطات، وقد أُطلق عليها اسم الحدود المتباعدة (Divergent Boundaries)، وتُعدّ هذه الحدود من أهم الحدود المسؤولة عن نشأة قيعان المحيطات. ولتعرّف ماهيّة هذه الحدود والمظاهر الجيولوجية الناتجة منها؛ ادرس الشكل (٥–٢١)، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.



(أ) اندفاع الماغما إلى الأعلى، وحدوث تقوّس وتشقّق في الغلاف الصخري القاري.

(ب) تولّد الماغما قوى شدّ؛ فتتكوّن صدوع عادية تشكّل انهدامًا.

(جـ) تندفع الماغما مع تيارات الحمل وحين تبرد تتكوّن قشرة محيطية جديدة ويتم بناء غلاف صخري محيطي جديد ويتكوّن بحر ضيّق نتيجة انسياب المياه من المحيطات المجاورة.

(د) مع الزمن، يستمر اندفاع الماغما ويتطوّر البحر الضيق إلى محيط واسع بفعل استمرار بناء غلاف صخري محيطي جديد (القشرة المحيطية والجزء العلوي من الستار العلوي) ونشأة ظهر المحيط.

الشكل (٥-٢١): مراحل تشكّل ظهر المحيط.

- اذكر مراحل تشكُّل كل من: الانهدام، والبحر الضيّق، والمحيط الواسع؛ متسلسلة.
- ما المراحل التي يُبنى فيها غلاف صخري محيطي جديد؟

يُبنى غلاف صخري محيطي جديد عند الحدود المتباعدة؛ لذا، تُوصف الحدود المتباعدة بأنها **حدود بنّاءة** (Constructive Boundaries). وينتج من تباعدها العديد من المظاهر الجيولوجية وهي: **الانهدام** (Rift) مثل انهدام شرقي إفريقيا (East African Rift)، و**البحار الضيّقة** مثل البحر الأحمر، و**أظهُر المحيطات** (Oceanic Ridges) مثل ظهر وسط المحيط الأطلسي (Mid-Atlantic Ridge) ثمّ **قيعان المحيطات** (Ocean Floors) نفسها.

ب- الحدود المتقاربة

تُعرف **الحدود المتقاربة** (Convergent Boundaries) بأنها الحدود التي تقترب عندها صفيحتان من بعضها بعضًا، وتُصنّف الحدود المتقاربة إلى نوعين اعتمادًا على أنواع

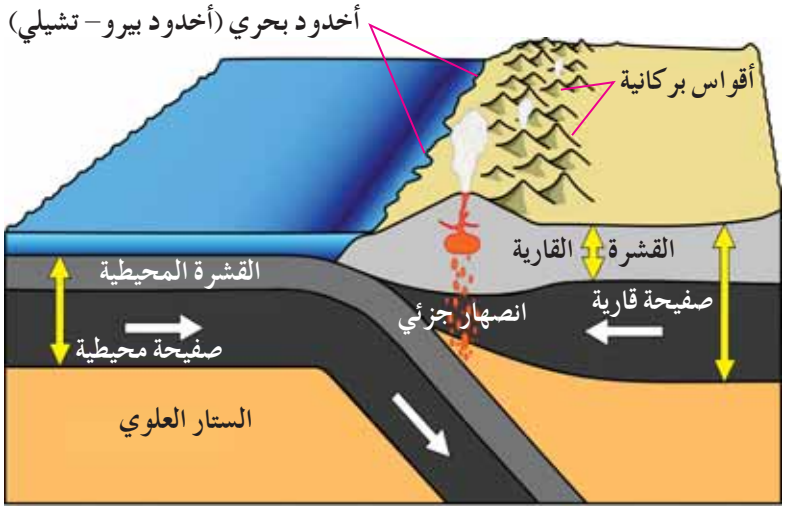
الصفائح المتقاربة، والمظاهر الجيولوجية الناتجة منها، وهما: حدود الغوص، وحدود التصادم.

١. حدود الغوص (Subduction Boundaries): لمعرفة أنواع حدود الغوص، وأنواع الصفائح المتقاربة، وآلية حدوث عملية الغوص، وأهم المظاهر الجيولوجية الناتجة عند هذا النوع من الحدود، نفّذ النشاط التحليلي (٥-٣).

٥-٣ نشاط تحليلي: أنواع حدود الغوص

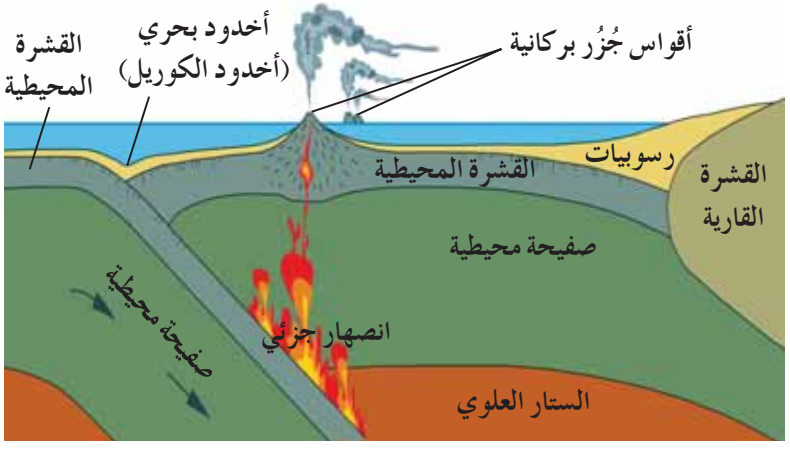
ادرس الشكل (٥-٢٢)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

سلسلة جبال الأنديز؛ نتجت من تقارب وغوص صفيحة نازكا المحيطية تحت الجزء القاري لصفيحة أمريكا الجنوبية.



(أ) حدود غوص من نوع (محيطي - قاري).

أقواس جُزُر الكوريل؛ نتجت من تقارب صفيحة المحيط الهادي والجزء المحيطي من الصفيحة الأوراسية وغوص صفيحة الهادي المحيطية.



(ب) حدود غوص من نوع (محيطي - محيطي).

الشكل (٥-٢٢): أنواع حدود الغوص.

١- ما نوع الصفائح الأرضية المتقاربة في الشكلين (٥-٢٢/أ) و (٥-٢٢/ب)؟

٢- ما المظاهر الجيولوجية الناتجة في الشكلين (٥-٢٢/أ) و (٥-٢٢/ب)؟

٣- أين يتكوّن الأخدود البحري؟ وما علاقته بالأقواس البركانية وأقواس الجُزُر البركانية؟

يوجد نوعان من حدود الغوص، الأول غوص من نوع محيطي- قاري، والآخر غوص من نوع محيطي- محيطي.

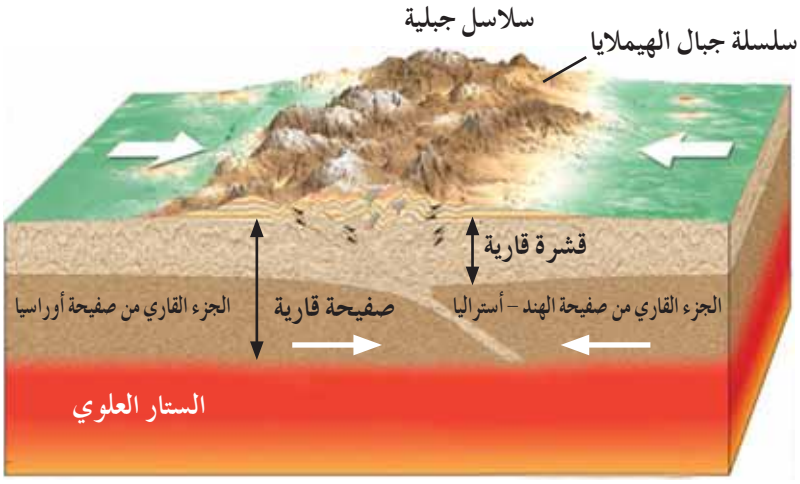
أ . **غوص محيطي - قاري:** عند تقارب صفيحة محيطية من صفيحة قارية، تغوص الصفيحة المحيطية تحت الصفيحة القارية؛ لأن كثافتها أكبر؛ فينتج من انثنائها وغوصها تكوُّن **الأخاديد البحرية** مثل أخدود بيرو - تشيلي، وفي أثناء غوص الصفيحة المحيطية في الستار العلوي فإنها تحمل معها رسوبيات قاع المحيط؛ وهي رسوبيات تتكوّن من أنواع مختلفة من الصخور، تركيبها الكيميائي مشابه لتركيب صخور الغرانيت الحامضية، وتنصهر هذه الرسوبيات والصفيحة المحيطية المكوّنة من صخور قاعدية لتُعطي ماغما من نوع جديد تكون متوسطة التركيب الكيميائي؛ وهي **الماغما الأنديزيتية** (Andesitic Magma)، تندفع إلى الأعلى داخل الصفيحة القارية لتشكّل **أقواسًا بركانية** (Volcanic Arcs) أو **سلاسل جبلية بركانية** (Volcanic Mountain Ranges) مثل سلسلة جبال الأنديز، لاحظ الشكل (٥-٢٢/أ).

ب. **غوص محيطي - محيطي:** عند تقارب صفيحتين محيطيتين، تغوص الصفيحة المحيطية الأكبر عمرًا والأبرد تحت الصفيحة الأخرى؛ لأن كثافتها أكبر. فينتج من انثنائها وغوصها تكوّن **الأخاديد البحرية** مثل أخدود الكوريل، وبالآلية السابقة نفسها تغوص الصفيحة المحيطية الأبرد في الستار العلوي حاملة معها رسوبيات قاع المحيط، وتنصهر هذه الرسوبيات والصفيحة المحيطية مشكّلة ماغما، تندفع داخل الصفيحة المحيطية مكوّنة **أقواس جزُرُ بركانية** (Volcanic Islands)؛ أي جُزُر بركانية محاطة بالماء مثل أقواس جُزُر الكوريل. لاحظ الشكل (٥-٢٢/ب). وتكون كل من الأقواس البركانية والجُزُر البركانية موازية للأخاديد البحرية.

وكما لاحظت في كلا النوعين من حدود الغوص؛ يتم استهلاك الغلاف المحيطي الأقدم في الستار عند نطاق الغوص؛ لذا، فإنها تُسمّى **الحدود الهدّامة** (Destructive Boundaries). وتقابل هذه العملية بناء قشرة محيطية جديدة عند أظهُر المحيطات، وبذلك تبقى المساحة الكلية لسطح الأرض ثابتة.

٢. **حدود التصادم** (Collision Boundaries): ماذا تتوقّع أن يحدث إذا تقاربت صفيحتان قاريتان مع بعضهما بعضًا؟ وما المظاهر الجيولوجية الناتجة من هذا التقارب؟ لمعرفة ذلك؛ ادرس الشكل (٥–٢٣)، ثمّ أجب عن السؤالين بعده.

(أ) سلسلة جبال الهيملايا؛ نتجت من تصادم الجزء القاري من صفيحة الهند – أستراليا، مع الجزء القاري من صفيحة أوراسيا.



(ب) تصادم الجزء القاري من صفيحة الهند – أستراليا، مع الجزء القاري من صفيحة أوراسيا.

الشكل (٥–٢٣): حدود التصادم، والمظاهر الجيولوجية الناتجة منها.

- ما أنواع الصفائح التي تراها في الشكل؟
- ما المظهر الجيولوجي الناتج من تصادم الصفيحتين القاريتين؟ أعطِ مثالًا عليه.

عند تقارب صفيحتين قاريتين متساويتين في الكثافة، لا يحدث غوص لأي من الصفيحتين تحت الأخرى؛ بسبب السماكة العالية لكل منهما فتصطدمان معًا، ويحدث التصادم عند الجزء القاري من كلا الصفيحتين، ويؤدي التصادم إلى طيّ الصخور وتكوين الصدوع العكسية في منطقة التصادم، ثمّ ارتفاع المنطقة تدريجيًّا مكوّنة **سلاسل جبلية** (Mountain Ranges)، مثل جبال الهيملايا.

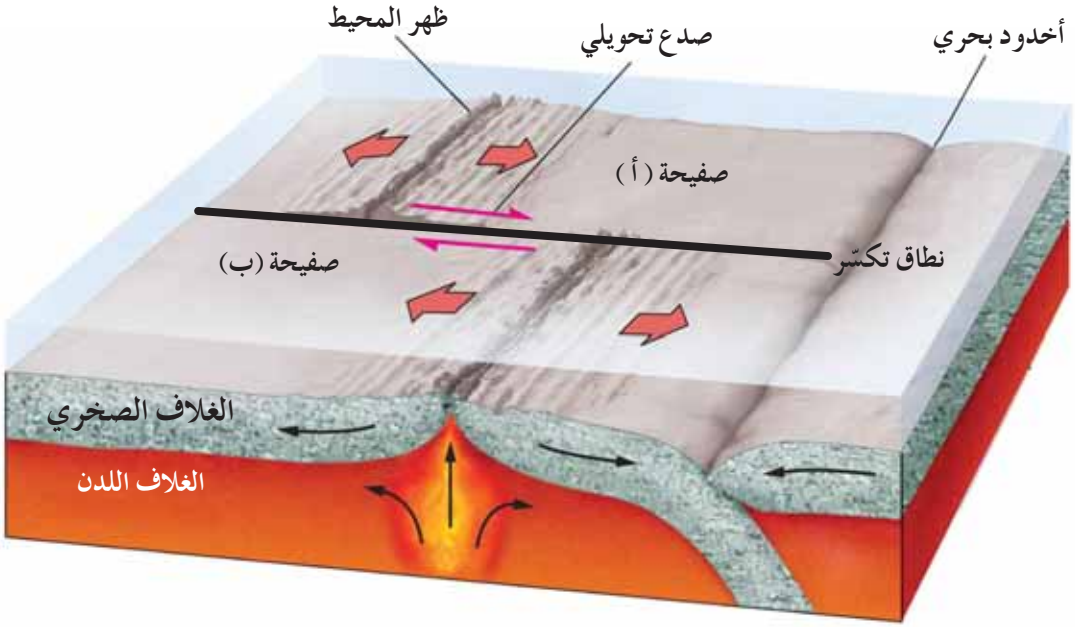
اختبر معلوماتك

١– لماذا لا تغوص أي من الصفيحتين القاريتين تحت بعضهما عند حدود التصادم؟

٢– قارن بين الحدود المتباعدة والحدود المتقاربة من حيث: نوع الصدوع المكوّنة لكل منها، وأثرها في القشرة الأرضية.

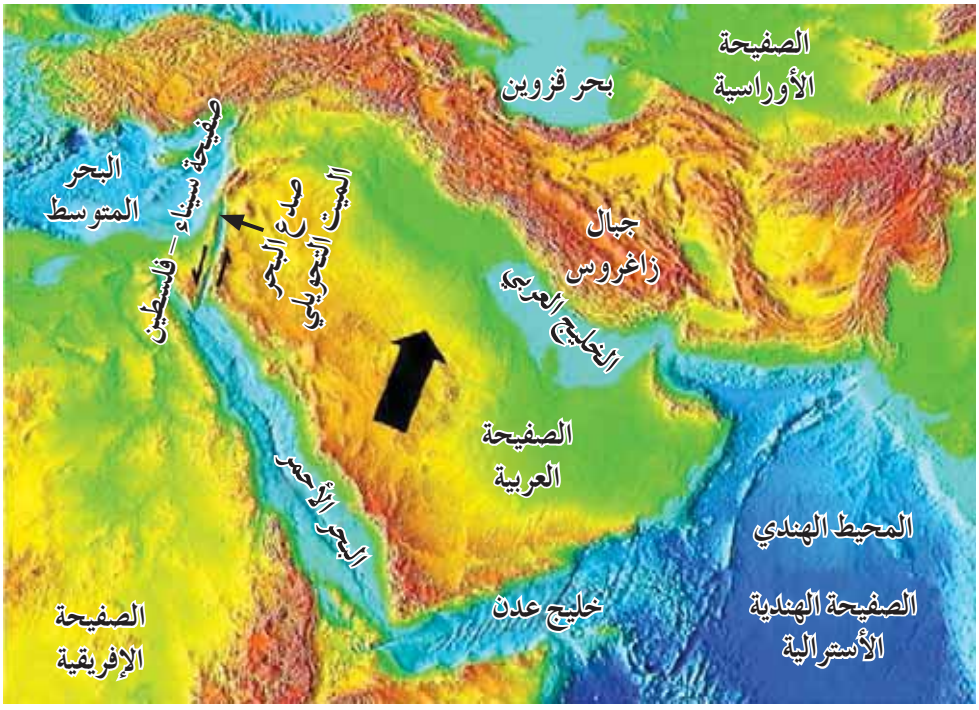
جـ– حدود الصدوع التحويلية

تُعرف **حدود الصدوع التحويلية** (Transform Fault Boundaries) بأنها الحدود التي تتحرّك فيها صفيحتان بجانب بعضها بعضًا أفقيًّا في اتجاهين متعاكسين على طول صدوع التحويل. وقد تكون في قيعان المحيطات أو على القارة. وفي قيعان المحيطات تربط هذه الصدوع بين أجزاء ظهر المحيط غير المتّصلة وتُسهّل عملية توسُّع قاع المحيط، وتُعدّ جزءًا من **نطاق التكسّر** (Fraction Zone) في قاع المحيط، انظر الشكل (٥–٢٤). ومن الأمثلة على صدوع الحدود التحويلية القارية صدع سان أندرياس التحويلي، وصدع البحر الميت التحويلي. ويُعدّ صدع ميندوسينو التحويلي من الأمثلة على صدوع الحدود التحويلية المحيطية.



الشكل (٥–٢٤): حدود الصدوع التحويلية. لاحظ كيف يُسهّل الصدع التحويلي عملية تباعد الصفائح عند ظهر المحيط ويُحوّلها إلى تقاربية على الطرف الآخر للصفيحة.

ولمعرفة طبيعة الحركة على امتداد صدع البحر الميت التحويلي، ادرس الشكل (٥–٢٥)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٥–٢٥): طبيعة الحركة على امتداد صدع البحر الميت التحويلي، ودوره في تحويل نوع الحركة بين الصفائح الأرضية.

١– ما أسماء الصفائح التي تحيط بالصفيحة العربية؟

٢– ما أنواع الحدود التي تحيط بالصفيحة العربية؟ حدّد موقع هذه الحدود.

٣– حدّد اتجاه حركة الصفيحة العربية.

٤– لاحظ أنواع الحدود التي يربط بينها صدع البحر الميت التحويلي. هل لذلك علاقة بسبب تسميته صدعًا تحويليًّا؟

يُطلق على حدود الصدوع التحويلية هذا الاسم؛ لأنها تحوّل الحركة من تباعدية عند ظهر المحيط إلى تقاربية عند نطاق الغوص أو التصادم، لاحظ الشكل (٥–٢٥). إذ يعمل صدع البحر الميت، الذي يفصل الصفيحة العربية عن الصفيحة الصغيرة سيناء – فلسطين، الذي يبلغ طوله ١١٠٠كم، على تحويل الحركة التباعدية في الجنوب في البحر الأحمر إلى حركة تصادم في الشمال. ومن ثم، تتحرّك الصفيحة العربية شمال شرق لتصطدم بالصفيحة الأوراسية مكوّنةً جبال زاغروس (في إيران)، وجبال طوروس (في تركيا).

اختبر معلوماتك

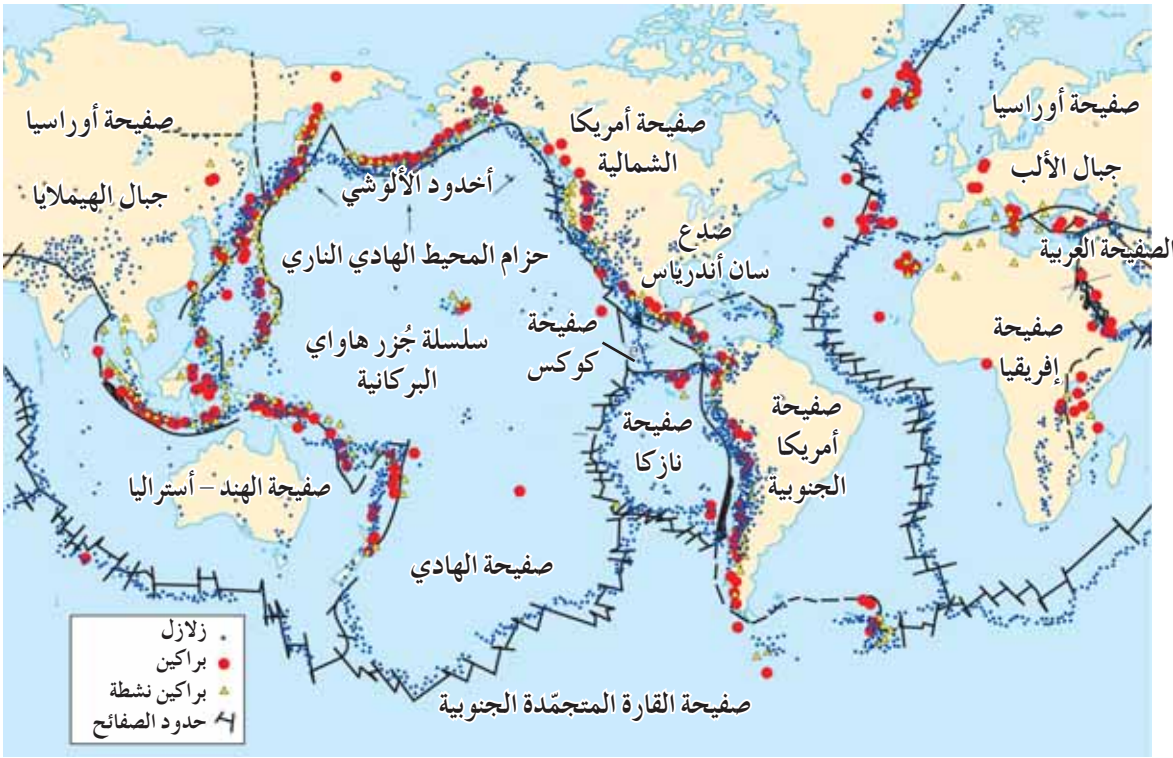
١– تُوصف الحدود التحويلية بأنها حدود محافظة، فسّر ذلك.

٢– مستعينًا بالشكل (٥–٢٥)، واعتمادًا على نظرية تكتونية الصفائح، ما التغيّرات التي يُتوقّع حدوثها مستقبلًا على المظاهر الجيولوجية الآتية: الخليج العربي، والمحيط الهندي، وخليج العقبة، والمسافة بين القدس ومكة؟

٣– ما علاقة هذا الصدع بحدوث الزلازل في خليج العقبة والبحر الميت وغور الأردن؟

رابعًا: البراكين والزلازل وعلاقتها بحركة الصفائح

ركّزت نظرية تكتونية الصفائح على حركة الغلاف الصخري، وقد شملت هذه الحركة كلًّا من الغلافين الصخريين؛ المحيطي والقاري، ويعتقد العلماء أن هذه الحركة هي السبب الرئيس لحدوث معظم البراكين والزلازل في العالم، فما العلاقة بين توزّع البراكين والزلازل وحدود الصفائح؟ لمعرفة ذلك، ادرس الشكل (٥–٢٦).

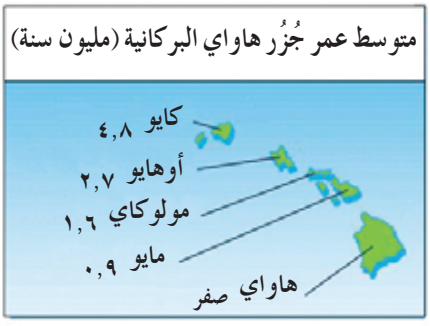


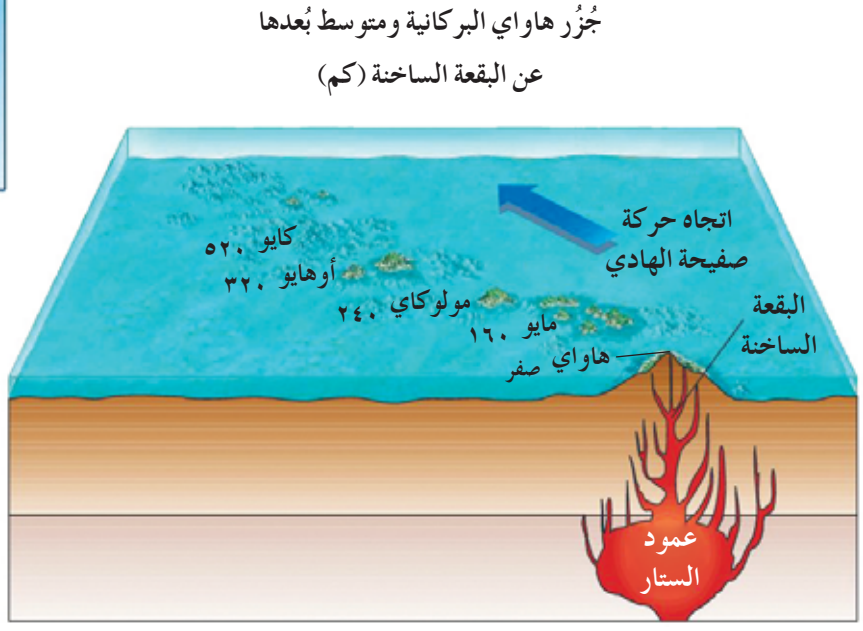
الشكل (٥–٢٦): توزّع البراكين والزلازل على سطح الأرض. لاحظ أن غالبية الزلازل تتوزّع في الحزام الذي يُحيط بالمحيط الهادي، وقليل منها يتوزّع في الحزام الممتد من جبال الألب إلى جبال الهيمالايا وأظهُر المحيطات.

يُلاحظ من الشكل (٥–٢٦) أن أكثر البراكين والزلازل تحدث ضمن أحزمة ينطبق معظمها على حدود الصفائح الأرضية. ويتركّز معظم النشاط البركاني في العالم، بالإضافة إلى غالبية الأنشطة الزلزالية على امتداد حدود صفيحة الهادي، ومن الناحية البركانية، فإن هذه المنطقة تُدعى **حزام المحيط الهادي الناري** (Pacific Ring of Fire)، أما اذا تحدّثنا عن النشاط الزلزالي؛ فإن هذه المنطقة تُدعى **حزام المحيط الهادي الزلزالي** (Circum–Pacific Seismic Belt)، وتختلف الأنشطة البركانية والزلزالية باختلاف نوع الحدود على النحو الآتي:

- **أنواع البراكين المرافقة لحدود الصفائح:** تتوزّع البراكين البازلتية عند أظهُر المحيطات والانهدامات وحدود الغوص من نوع محيطي – محيطي، بينما تتوزّع البراكين الأنديزيتية عند حدود الغوص من نوع محيطي – قاري، وهذه البراكين جميعها مرافقة لحدود الصفائح.

لكن، ما أثار فضول العلماء هو وجود براكين بازلتية داخل الصفائح سواء أكانت قارية أم محيطية، لاحظ الشكل (٥–٢٧). فكيف فسّر العلماء آلية تكوّنها؟





الشكل (٥–٢٧): سلسلة جُزُر هاواي البركانية مرتّبة حسب متوسط بُعدها عن البقعة الساخنة (كم)، ومتوسط أعمارها (مليون سنة).

وقد وجد العلماء عند دراستهم سلسلة جُزُر هاواي التي تقع في داخل صفيحة الهادي، أن أعمار الجُزُر تزداد بالابتعاد شمال غرب عن جزيرة هاواي، وفسّر العلماء ذلك بتصاعد الماغما التي تُسمّى **عمود الستار** (Mantle Plume)، ويكون مصدرها الحد الفاصل بين الستار واللب الخارجي لتكوّن جُزُرًا بركانية في الغلاف الصخري تُسمّى **البقع الساخنة** (Hot Spots). ومن ملاحظتك الشكل (٥-٢٧)، تجد أن عمود الستار ثابت في مكانه بينما الصفيحة تتحرّك فوقه حاملة الجُزُر القديمة، وتتكوّن جزيرة جديدة فوقه.

وقد شكّل اكتشاف البقع الساخنة أهمية كبيرة جدًّا؛ لأنها دعّمت نظرية تكتونية الصفائح وأثبتت وجود حركة للغلاف الصخري، بالإضافة إلى تحديد اتجاه حركة الصفيحة الحاملة للجُزُر البركانية وسرعتها، اعتمادًا على العلاقة بين عمر الجزيرة البركانية وبُعدها عن البقعة الساخنة. ولكن كيف يمكن حساب متوسط سرعة الصفيحة؟ وهل تختلف السرعة التي تتحرّك فيها الجزيرة البركانية عن سرعة الصفيحة ذاتها؟

يمكن استخدام العلاقة الرياضية الآتية، لحساب متوسط سرعة الجزيرة أو الصفيحة:

متوسط سرعة الصفيحة (الجزيرة) (سم/ سنة) = البُعد عن البقعة الساخنة (سم)/ عمر الجزيرة البركانية (سنة)

السرعة (سم/ سنة) = المسافة (سم)/ الزمن (سنة)

مثال

إذا علمت أن جزيرة أوهايو تبعُد ٣٢٠كم عن البقعة الساخنة (جزيرة هاواي)، فاحسب متوسط سرعتها مستعينًا بالشكل (٥-٢٧).

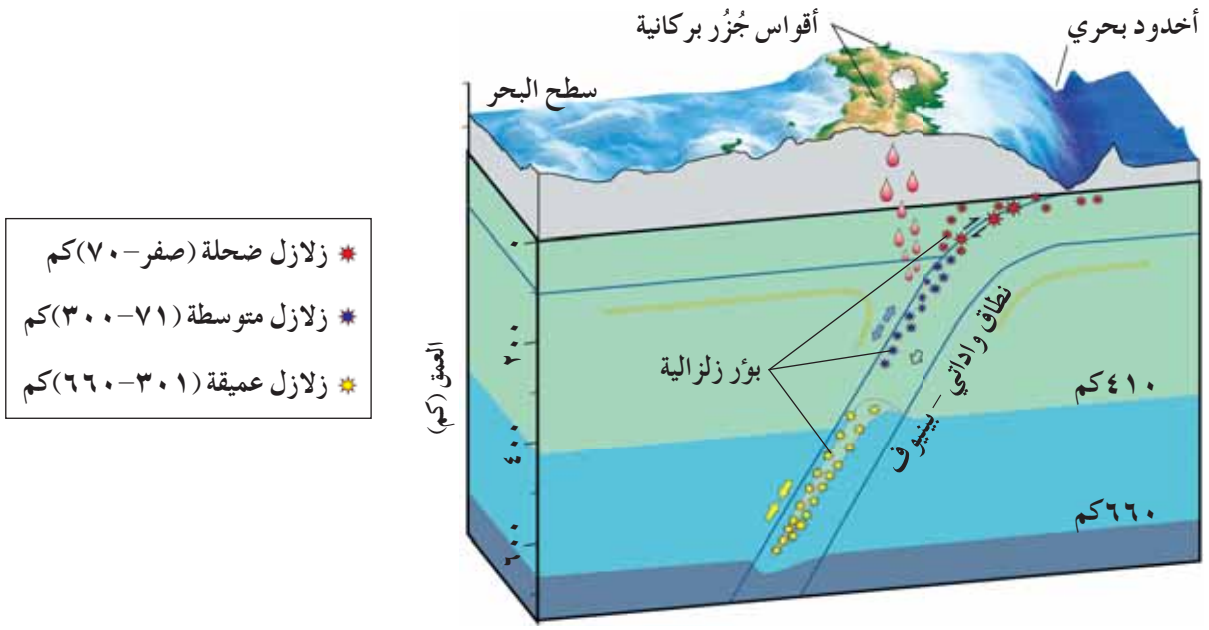
الحل:

متوسط سرعة الجزيرة = البُعد عن البقعة الساخنة / عمر الجزيرة

متوسط سرعة الجزيرة = $٣٢٠ \times ١٠^{٥} / ٢,٧ \times ١٠^{٦}$

= ١١,٨٥ سم/ سنة

• **أنواع الزلازل المرافقة لحدود الصفائح:** تتوزّع الزلازل الضحلة وغير القوية على امتداد الحدود المتباعدة (أظهُر المحيطات) وحدود الصدوع التحويلية (مثل صدع البحر الميت التحويلي)، أما الحدود المتقاربة التصادمية فتسود بها الزلازل الضحلة والقليل منها متوسطة العمق كسلاسل الجبال الممتدة من جبال الألب إلى الهيمالايا، انظر الشكل (٥–٢٦)، بينما تُرصد الأنواع الثلاثة من الزلازل؛ الزلازل الضحلة والمتوسطة والعميقة عند نُطق الغوص (الحزام الزلزالي الذي يُحيط بالمحيط الهادي) وما يميّزها أنها تكون قوية ومدمّرة، وقد أُثيرت تساؤلات كثيرة حول هذا الموضوع. فكيف تُرصد زلازل على عمق (٦٦٠)كم على الرغم من أن المادة لدنة عند هذا العمق، ولا يمكن حدوث الزلازل فيها. ولمعرفة كيف تمكّن العلماء من الإجابة عن هذه التساؤلات؛ ادرس الشكل (٥–٢٨)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٥–٢٨): توزُّع البؤر الزلزالية عند نطاق الغوص (نطاق واداتي– بينيوف).

- كيف تتوزّع البؤر الزلزالية في الشكل؟
- ماذا يحدث لعمق البؤر الزلزالية كلما ابتعدنا عن الأخاديد البحرية باتجاه أقواس الجُزُر البركانية؟
- ما أقصى عمق يمكن أن تُرصد عنده البؤر الزلزالية؟
- كيف تُفسّر حدوث الزلازل على أعماق أكبر من سماكة الغلاف الصخري؟

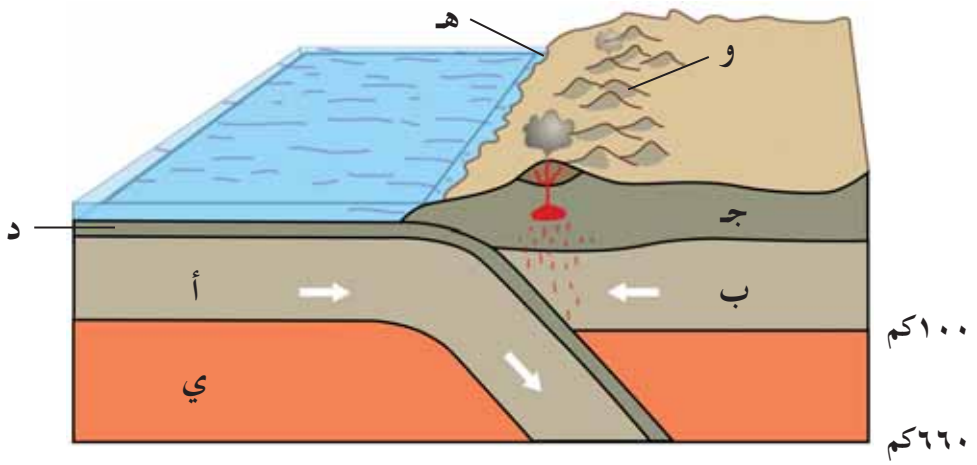
عند غوص الصفيحة المحيطية الباردة، فإنها ترتطم بالصفيحة المقابلة وتحتكّ بها، فينشأ ضغط كبير وكسر للصخور تتحرّر منه الطاقة فتحدث الزلازل الضحلة، وبزيادة عمق غوص الصفيحة؛ فإنها تتعرّض لضغوط أكبر تؤدّي إلى تكسّر أجزاء منها داخل الغلاف اللدن تتحرّر منها طاقة تسبّب حدوث زلازل متوسطة وهكذا، إلى أن تنصهر كليّة تحت عمق (٦٦٠)كم.

ولأن الزلازل لا تحدث إلا في الغلاف الصخري، فقد توصّل عالم الزلازل الأمريكي بينيوف (Benioff) عام ١٩٥٤م، وبعد تحليله البيانات الزلزالية على طول امتداد الأخاديد البحرية إلى أن البؤر الزلزالية المتوسطة والعميقة تنحصر على طول امتداد السطح العلوي في نطاق صُلب مائل يبدأ من الأخدود البحري، وينحدر نحو الغلاف اللدن حتى عمق (٦٦٠)كم، وقد أُطلق على هذا النطاق اسم **نطاق بينيوف** (Benioff Zone) أو **نطاق واداتي – بينيوف** (Wadati–Benioff Zone) نسبة إلى عالم الزلازل الياباني (واداتي) والأمريكي (بينيوف)، فبهذه الدراسات، أمكن تحديد الشكل الذي تتّخذه الصفيحة المحيطية عند غوصها وزاوية الغوص.

١– كيف فسّر العالمان (فاين) و(ماثيوس) تماثل الحزم المغناطيسية على جانبَي ظهر المحيط، من حيث القطبية المغناطيسية والعرض والعمر؟

٢– قارن بين فرضية انجراف القارات ونظرية تكتونية الصفائح، من حيث القوى المحرّكة والأجزاء المتحرّكة.

٣– ادرس الشكل (٥–٢٩)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٥–٢٩): السؤال (٣).

أ – ماذا تُمثّل الرموز (أ، ب، جـ، د، هـ، و، ي)؟

ب– ما نوع حركة الصفائح في هذا الشكل؟ وما نوع الحدود؟

جـ– ما نوع الماغما المتدفقة في هذا النوع من الحركة؟

د – وضّح آلية تشكّل المظهرين الجيولوجيين (و، هـ)، مع إعطاء أمثلة عليها.

٤– ما نوع حدود الصفائح المسبّبة لتكوّن كل من الآتية:

أ – جبال زاغروس.

ب– البحر الأحمر.

جـ– صدع سان أندرياس.

د – أقواس جُزُر الكوريل.

هـ– ظهر وسط المحيط الأطلسي.

و – أخدود بيرو– تشيلي.

٥– ادرس الجدول (٥–٢)، الذي يوضّح متوسط أعمار ثلاث جُزُر بركانية، ومتوسط بُعدها عن البقعة الساخنة، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.

الجدول (٥–٢): السؤال (٥).

الجزيرة البركانية	متوسط العمر (مليون سنة)	متوسط البُعد عن البقعة الساخنة (كم)
أ	صفر	صفر
ب	١	٥٠
جـ	٢	١٠٠

أ – أيُّ الجُزُر البركانية الثلاث تقع فوق بقعة ساخنة في الوقت الحالي؟

ب– أيُّ الجُزُر البركانية أكثر استقرارًا من الناحية التكتونية؟ فسّر إجابتك.

جـ– كيف أثبتت دراسة الجُزُر المتكوّنة فوق عمود الستار، وجود حركة للغلاف الصخري؟

د – ما سرعة حركة الصفيحة الحاملة للجُزُر؟

هـ – هل ستبقى الجزيرة (أ) في موقعها بعد (٥) مليون سنة؟ فسّر إجابتك.

و – ماذا سيحدث للجزيرة (جـ) بعد مُضيّ مليون سنة أخرى؟

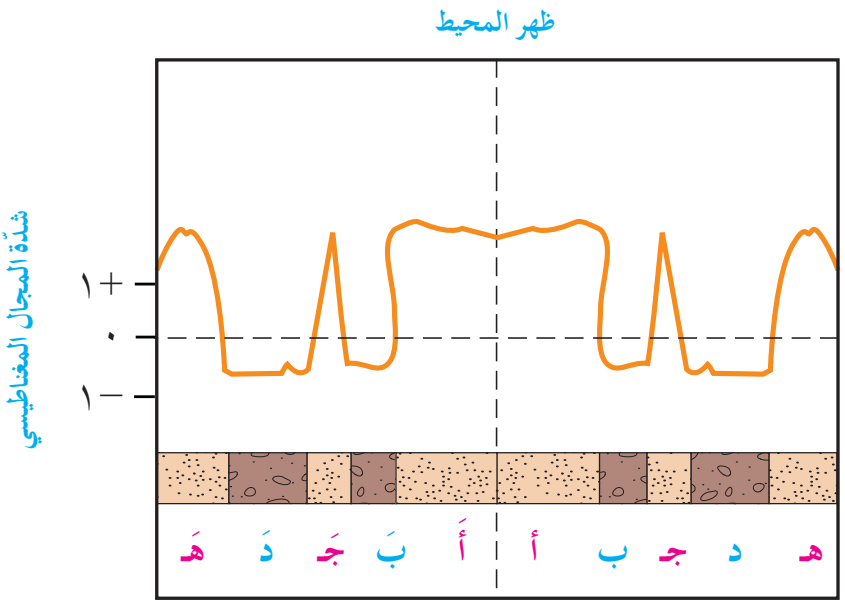
٦– من المشاهدات التي اعتمدها (هِس) أدلة داعمة لتوسُّع قاع المحيط، أعمار صخور القشرة المحيطية:

أ – صِفْ أعمار صخور القشرة المحيطية على جانبَي ظهر المحيط.

ب– فسّر عدم وجود أحافير تعود للعصر الكامبري (مثل أحفورة الترايلوبيت)، في رسوبيات قاع المحيط.

٧– قارن بين الأقواس البركانية وأقواس الجُزُر البركانية من حيث؛ نوع الحدود والماغما المسؤولة عن تكوّن كل منهما.

٨– ادرس الشكل (٥–٣٠)، ثمّ أجب عن الأسئلة التي تليه.



الشكل (٥–٣٠): السؤال (٨).

أ – ما نوع قطبية كل من الحُزَم المغناطيسية (ب، جـ، هـ)؟

ب– اذكر ثلاث خصائص مشتركة بين الحُزمتين (ب) و (بَ).

جـ– رتّب الحزم المغناطيسية (أ، بَ، جَـ، د) حسب العمر، من الأقدم إلى الأحدث.

د – إذا علمت أن معدّل التوسّع لهذا المحيط = ٢ سم/ سنة، وأن عمر أقدم الصخور فيه (٤) مليون سنة، احسب عرض هذا المحيط بالكيلومترات.

٩– فسّر ما يأتي تفسيرًا علميًّا دقيقًا:

أ – تُعدّ نظرية تكتونية الصفائح، أهم النظريات التي فسّرت دينامية الأرض.

ب– انتشار الرسوبيات الجليدية في إفريقيا وأمريكا الجنوبية، على الرغم من أن مناخيهما الحاليين غير ملائمين لتشكّلها.

جـ– تُعدّ أحفورة الميزوسورس دليلًا على انجراف القارات.

مسرد المصطلحات

الآثار الأحفورية	طريقة التحفُّر الوحيدة التي لا وجود لبقايا أصداف أو عظام أو هياكل صُلبة للكائنات الحية فيها، وإنما مجرّد آثار لذلك الكائن الحي.	(Trace Fossils)
الأحفورة المرشدة	أحفورة تتميّز بأن عمرها الجيولوجي قصير، وانتشارها الجغرافي واسع، وتُستخدم في تحديد أعمار الصخور.	(Index Fossil)
الأخاديد البحرية	المظهر الجيولوجي الناتج من غوص صفيحة محيطية تحت صفيحة أخرى، ويكون موازيًا دائمًا للأقواس البركانية وأقواس الجُزُر البركانية.	(Trenches)
الإزاحة	انزياح طول الموجة تبعًا لتغيّر درجة الحرارة قِصَرًا أو طولًا.	(Displacement)
الاستكشاف الجيوفيزيائي	البحث عن الخامات بالاعتماد على الاختلاف في الخصائص الفيزيائية للخامات عن الصخور التي حولها، مثل القابلية للتمغنط، والموصلية الكهربائية، والكثافة، وخصائص المرونة وغيرها.	(Geophysical Exploration)
الاستكشاف الجيوكيميائي	البحث عن الخامات بالاعتماد على اختلاف الخصائص الكيميائية للموارد، عن الخصائص الكيميائية للصخر المضيف، حيث إن وجود قيم كيميائية عالية يدلّ على وجود المورد، التي تكون دائمًا أعلى من القيم الجيوكيميائية الطبيعية، وتُسمّى الشواذ الجيوكيميائية.	(Geochemical Exploration)
الأقواس البركانية	سلسلة من الجبال البركانية توجد على القارة وموازية للأخاديد البحرية، وتكوّنت بفعل غوص صفيحة محيطية تحت صفيحة قارية.	(Volcanic Arcs)
أقواس الجزُرُ البركانية	سلسلة من الجُزُر البركانية موازية للأخاديد البحرية، وتكوّنت بفعل غوص صفيحة محيطية تحت صفيحة محيطية أخرى.	(Volcanic Island Arcs)
التأريخ النسبي	ترتيب الأحداث الجيولوجية من الأقدم إلى الأحدث نسبة إلى بعضها بعضًا، اعتمادًا على الشواهد الجيولوجية المتوافرة، وباستخدام مجموعة من المبادئ.	(Relative Dating)

التأريخ المطلق	تحديد الأعمار المطلقة للمعادن والصخور والأحداث الجيولوجية، وذلك باستخدام عملية الاضمحلال الإشعاعي للنظائر المشعّة.	(Absolute Dating)
التشتّت الجيوكيميائي	نقل الخام المتكشّف على سطح الأرض أو بالقرب منه، إلى المواقع المجاورة لموقع الخام بفعل عمليات التجوية والتعرية، ما يؤدي إلى انتشاره في مناطق أوسع.	(Geochemical Dispersion)
الثابت الشمسي	كمية الطاقة الشمسية الساقطة عموديًّا على المتر المربع الواحد من السطح الخارجي للغلاف الجوي للكوكب في الثانية الواحدة، ومثالها الثابت الشمسي للأرض ويبلغ متوسطه للأرض (١٣٧٢) واط/ م^{٢} تقريبًا.	(Solar Constant)
الجيولوجيا التاريخية	علم يهتم بدراسة تاريخ الأرض، وتفسير الأحداث الجيولوجية التي حدثت في الماضي، وأسهمت في تشكيل سطح الأرض ومعالمه والتغيّرات التي حدثت عليه، وترتيبها زمنيًّا.	(Historical Geology)
الزلازل الضحلة	الزلازل التي لا يتجاوز عمق البؤرة الزلزالية فيها (٧٠) كم.	(Shallow Earthquakes)
الزلازل المتوسطة	الـزلازل التي ينحصر عمق بـؤرة الزلزال فيها بين (٧١–٣٠٠)كم.	(Intermediate Earthquakes)
الزلازل العميقة	الـزلازل التي ينحصر فيها عمق بـؤرة الزلزال ما بين (٣٠١–٦٦٠)كم.	(Deep Earthquakes)
الساعة الإشعاعية	الساعة التي تُمثّل لحظة إغلاق النظام الإشعاعي في الصخر، حيث تحدث عملية الاضمحلال داخل النظام المغلق؛ لنستطيع حساب عمر الصخر.	(Radiometric Clock)
سلّم الزمن الجيولوجي	ترتيب زمني تصاعدي يعرض الأحداث الجيولوجية التي تعاقبت في أثناء تاريخ الأرض الطويل، ويُقدّم وصفًا لتغيّر أنواع الكائنات الحية وأشكالها.	(Geological Time Scale)
الشاذّة	القيم الجيوفيزيائية أو الجيوكيميائية غير الطبيعية في منطقة ما.	(Anomaly)
صخر البيرودوتيت	صخر ناري باطني فوق قاعدي يمتاز بنسيجه الخشن، ويتكوّن بصورة رئيسة من معدِنَي الأوليفين والبيروكسين.	(Peridotite)

الطبقة المرشدة	طبقة ذات صفات مميّزة، تتكوّن في ظروف خاصة وتنتشر في المقاطع العمودية جميعها، مثل طبقة الفحم الحجري، ويمكن استخدام الجبس أو الفوسفات وغيرها كطبقات مرشدة.	(Index Bed)
العتبة	القيمة التي يحدث عندها تغيّر من القيم الطبيعية إلى القيم الشاذّة.	(Threshold)
علم الأحافير	العلم الذي يهتم بدراسة أشكال الحياة القديمة التي تتابعت على سطح الأرض، على مرّ العصور الجيولوجية المختلفة.	(Paleontology)
عملية التحفُّر	عملية حفظ الكائنات الحية الحيوانية أو النباتية أو بقاياها أو آثارها على شكل أحفورة.	(Fossilization)
العمود الجيولوجي	وصف التسلسل في الطبقات الصخرية المختلفة في منطقة ما، التي ترسّبت عبر ملايين السنوات مرتبة من الأقدم إلى الأحدث، اعتمادًا على مبادئ التأريخ النسبي والمطلق.	(Geological Column)
الغلاف اللدن	منطقة لدنة تقع تحت الغلاف الصخري مباشرة، المنطقة العلوية منه منصهرة جزئيًا بمعدّل يصل إلى (٢٪)، ويمتدّ من عمق (١٠٠)كم ويضع كثير من العلماء نهايته عند نهاية الستار العلوي؛ أي (٦٦٠)كم.	(Asthenosphere)
الغلاف الصخري	الجزء الصُّلب الذي يشمل القشرة الأرضية، والجزء الأعلى من الستار بسمك (١٠٠)كم تقريبًا، ويتّصف بالصلابة والقابلية للتصدّع، ويحدث عنده تغيّر مفاجئ في خصائص الصخور، وينتهي عندما تبلغ درجة الحرارة (١٢٨٠) °س.	(Lithosphere)
القَدْر الظاهري	شدّة إضاءة النجم، كما تبدو بالعين المجرّدة.	(Apparent Magnitude)
القَدْر المطلق	القَدْر الظاهري للنجم، عندما يكون على بُعد ١٠ فراسخ فلكية.	(Absolute Magnitude)
القطبية العادية	قطبية الصخور التي تتمغنط فيها المعادن المغناطيسية باتجاه المجال المغناطيسي الحالي.	(Normal Polarity)
القطبية المقلوبة	قطبية الصخور التي تتمغنط فيها المعادن المغناطيسية باتجاه معاكس لاتجاه المجال المغناطيسي الحالي.	(Reverse Polarity)
المضاهاة	مطابقة التتابعات الصخرية ذات العمر الواحد على امتداد الحوض الرسوبي، في أماكن متباعدة من سطح الأرض.	(Correlation)

معامل المرونة	ثابت يربط بين الإجهاد والمطاوعة، وتعتمد قيمته على طبيعة الصخر.	(Elastic Modulus)
ملليغال	وحدة قياس تسارع الجاذبية الأرضية.	(MilliGal)
منطقة احتجاب الأمواج الأولية	منطقة لا تُرصد فيها الأمواج الزلزالية، وتقع على بُعد زاوي (١٠٣°– ١٤٣°) من المركز السطحي للزلزال.	(P–Waves Shadow Zone)
الموصلية الكهربائية	قدرة المادة على نقل الشحنات الكهربائية من مكان إلى آخر. ومن ثمّ، السماح بمرور التيار الكهربائي.	(Conductivity)
النشاط الإشعاعي	اضمحلال النظيرة المشعّة تلقائيًا مع مرور الزمن، ويؤدي ذلك إلى تحوّل نوى ذرات هذه النظيرة إلى نوى ذرات نظيرة أخرى.	(Radioactivity)
النطاق الانتقالي	الجزء من الستار العلوي الممتد من العمق (٤١٠)كم إلى العمق (٦٦٠)كم، وفي هذه المنطقة تغيّر المعادن المكوّنة للصخور من بِنيتها البلورية، استجابة لظروف الضغط والحرارة.	(Transition Zone)
نطاق التصادم	منطقة التقاء الجزء القاري من صفيحة قارية مع الجزء القاري من صفيحة قارية أخرى، وتتكوّن في هذه المنطقة السلاسل الجبلية.	(Collision Zone)
نطاق السرعة المنخفضة	جزء من الستار العلوي يقع ضمن الغلاف اللدن تنخفض فيه سرعة الأمواج الزلزالية بسبب وجود صخور منصهرة جزئيًا، ويمتدّ من عمق (١٠٠)كم إلى عمق (٢٥٠)كم تقريبًا.	(Low Velocity Zone)
نطاق واداتي – بينيوف	الجزء الغاطس من الصفيحة المحيطية في الغلاف اللدن عند حدود الغوص، وتحدث فيه الزلازل الضحلة والمتوسطة والعميقة.	(Wadati–Benioff Zone)
نظرية تكتونية الصفائح	نظرية تنص على أن "الغلاف الصخري للكرة الأرضية بنوعَيه القاري والمحيطي، مُقسّم إلى قِطَع أرضية تُسمّى الصفائح، تتحرّك كل صفيحة منها بصورة مستقلة نسبة إلى الأرض فوق الغلاف اللدن، ويرافق ذلك تغيّر في أشكالها وحجومها".	(Plate Tectonics Theory)

المراجع

أولًا: المراجع العربية

١– أحمد محمد خليل، **الإشعاع المؤين: خصائصه واستخداماته وتأثيراته الحيوية**، جامعة اليرموك، إربد، الأردن، ١٩٩٩م.

٢– إيان بليمر، **السماء والأرض: الاحترار الكوني: العلم المفقود**، ترجمة عبد الله مجير العمري، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، الرياض، السعودية، ٢٠١١م.

٣– بيتر كولز، **علم الكونيات**، ترجمة محمد فتحي خضر، مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة، القاهرة، مصر، ٢٠١٥م.

٤– جون فانشي، **الطاقة: التقنية والتوجهات للمستقبل**، ترجمة عبد الباسط علي صالح كرمان، مركز دراسات الوَحْدة العربية، بيروت، لبنان، ٢٠٠٤م.

٥– جون جريبين، **المجرات**، ترجمة محمد فتحي خضر، مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة، القاهرة، مصر، ٢٠١٥م.

٦– خليل عبدالله وشاح، **الفيزياء العامة (الكهرباء والمغناطيسية)**، مكتبة العلاج للنشر والتوزيع، الكويت، ٢٠٠٦م.

٧– خير شواهين، **مدخل إلى علم الفلك**، عالم الكتب الحديث، إربد، الأردن، ٢٠١٥م.

٨– ريتشارد هاموند، **من الكواركات إلى الثقوب السوداء**، ترجمة المنظمة العربية للترجمة، بيروت، لبنان، ٢٠٠٩م.

٩– عبد القادر عابد، **جيولوجية الأردن وبيئته ومياهه**، الطبعة الثانية، نقابة الجيولوجيين الأردنيين، عمان، الأردن، ٢٠١٠م.

١٠– محمد باسل الطائي، **صيرورة الكون**، عالم الكتب الحديث، إربد، الأردن، ٢٠٠٨م.

١١– محمود عصام الميداني، **الأطلس الفلكي**، دار دمشق للنشر والتوزيع، سوريا، ٢٠٠١م.

١٢– نيل ديجراستايسون ودونالد جولد سميث، **البدايات**، ترجمة محمد فتحي خضر، كلمات للترجمة والنشر، القاهرة، مصر، ٢٠١٤م.

ثانيًا: المراجع الأجنبية

1. Alan, G., **Invisible Universe: The Electromagnetic Spectrum from Radio Waves to Gamma Rays**, Lawrence Hall of Science, University of California, 2002.
2. Aleshire, P., **Ocean Ridges and Trenches**, Chelsea House, United States of America, 2009.
3. Anderson, M., **Investigating Plate Tectonics, Earthquakes, and Volcanoes**, The Rosen Publishing Group, 2011.
4. Brown, D. and Ryan, P., **Arc - Continent Collision**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
5. Chaisson, E. and McMillan, S., **Astronomy Today**, 8th ed., Pearson, 2013.
6. Craig, S., **What Is the Theory of Plate Tectonics?**, Crabtree Publishing Company, New York, 2011.
7. Dana, B., and Michael, A., **Foundations of Astronomy**, 13th ed., Cengage learning, 2015.
8. Frisch, W., Meschede, M., Blakey, R., **Plate Tectonics, Continental Drift and Mountain Building**, Springer Heidelberg Dordrecht, London, New York, 2011.
9. Graham, P., **Introducing Tectonics, Rock Structures and Mountain Belts**, Dunedin Academic Press Ltd, Scotland, 2012.
10. Keltha, K., **Global Tectonics,** Wiley-Blackwell, USA, 2009.
11. Kurt, S., **Geodynamics of the Lithosphere**, Springer Heidelberg Dordrecht, London, New York, 2007.
12. Lisa, Y., **Alfred Wegener: Creator of the Continental Drift Theory**, Chelsea House, New York, 2009.
13. Lutgens, F. and Tarbuck, E. **Foundations of Earth Science**, 7th ed., Pearson, 2014.
14. Mark, E., and Chris, H. **Mechanics and Radioactivity**, Nelson Thornes. Wallingford, United Kingdom, 2003.
15. Moon, C., Whateley, M., Evans, A., **Introduction to Mineral Exploration**, 2nd ed., Wiley Blackwell, USA- UK- Australia, 2006.
16. Murck, B., and Skinner, B., **Visualizing Geology**, 3rd ed., Wiley, 2012.
17. Roger, M., **Geological Methods in Mineral Exploration and Mining**, 2nd ed., Australia, Springer, 2010.
18. Shearer, P., **Introduction to Seismology**, Cambridge University Press, UK, 2009.
19. Smylie, E., **Earth Dynamics**, Cambridge University Press, UK, 2013.
20. Stephen, M., **Plate Tectonics**, Infobase Publishing, New York, 2009.
21. Wicander, R., **Historical Geology: Evolution of Earth and Life Through Time**. New York, NY: Brooks/Cole, 2003.

تم بحمد الله تعالى