المجلة العربية للعلوم الجيولوجية
Arabian Journal of Geosciences

جامعة الملك سعود
King Saud University

الجمعية السعودية لعلوم الأرض
Saudi Society for Geosciences

4

Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences

موسوعة العمري في علوم الأرض

التركيب الداخلي للأرض

عبد الله بن محمد العمري
قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - كلية العلوم - جامعة الملك سعود

١٤٤٤ هـ - ٢٠٢٢ م

ح عبد الله بن محمد العمري، ١٤٤٣هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

العمري ، عبدالله بن محمد سعيد

كتاب التركيب الداخلي للأرض. / عبدالله بن محمد سعيد العمري - ط١.. - الرياض، ١٤٤٣هـ

١٣٦ ص ، ٢١,٥ X ٢٨

ردمك: ٧-٩٩١٤-٠٣-٦٠٣-٩٧٨

١ - الأرض ٢ - الجيولوجيا أ. العنوان ب. الموسوعة

ديوي ٥٥٠ ٧٦٣٨ / ١٤٤٣

رقم الإيداع ٧٦٣٨ / ١٤٤٣

ردمك: ٧-٩٩١٤-٠٣-٦٠٣-٩٧٨

حقوق طبع الموسوعة محفوظة للمؤلف

مع عدم السماح ببيعها .. ويمكن إعادة طباعتها وتوزيعها مجاناً بدون أي تعديل في الاسم أو المحتوى

تطلب النسخة الورقية المجانية من المؤلف على العنوان التالي:

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود ص.ب 2455 الرياض 11451

الإصدار الإلكتروني من خلال الموقع

www.alamrigeo.com

للاستفسارات والملاحظات الاتصال على:

جوال 966505481215+ هاتف 966 11 4676198+

البريد الإلكتروني E.mail : alamri.geo@gmail.com

الطبعة الأولى

١٤٤٤هـ / ٢٠٢٢م

بسم الله الرحمن الرحيم

تمهيد

الحمد والشكر لله الذي ساعدني في إنجاز هذا الجهد المتواضع المرتبط بتأليف الموسوعة العلمية العربية. تهدف الموسوعة العلمية الشاملة في علوم الأرض والبيئة والطاقة إلى تزويد وخدمة الباحثين وطلاب المدارس والجامعات وفئات المجتمع نظراً لمعاناة المهتمين من مشاكل ندرة المراجع العربية في هذا المجال. تشتمل الموسوعة على 30 كتاب علمي ثقافي موثق ومدعم بالصور والأشكال التوضيحية المبسطة في 5000 صفحة تقريباً تغطي خمسة أجزاء رئيسية:

الجـــزء الأول مكون من ستة كتب يناقش عمر الأرض وشكلها وحركاتها وتركيبها الداخلي وثرواتها المعدنية والتعدينية والجاذبية الأرضية وعلاقتها بالمد والجزر:

- تقدير عمر الأرض
- التركيب الداخلي للأرض
- شكل الأرض وحركاتها
- المعادن والتعدين
- الجاذبية الأرضية وتطبيقاتها
- المد والجزر

أما **الجـزء الثانـي** من الموسوعة اشتمل على ستة كتب تربط علاقة الأرض بالنظام الشمسي وبالأخص القمر والأغلفة الجوية والمائية والحيوية المحيطة بالأرض. وكذلك دور الزلازل والتفجيرات والبراكين والتسونامي في التأثير على بنية الأرض وكيفية تقليل مخاطرها:

- موجات التسونامي
- البراكين وسبل مجابهتها
- الزلازل والتفجيرات
- جيولوجية القمر
- تقييم مخاطر الزلازل
- الأغلفة المحيطة بالأرض

الجزء الثالث مؤلف من ستة كتب يرتبط بكل ما يتعلق بالمشاكل والكوارث البيئية وحلولها والتغيرات المناخية وأهمية التشجير ومعالجة الاحتباس الحراري:

- المشاكل البيئية وحلولها
- الانزلاقات والإنهيارات والفيضانات
- التشجير: التحديات والحلول
- التصحر والجفاف
- التغيرات المناخية والاحتباس الحراري
- السيول والسدود المائية

الجزء الرابع من الموسوعة مكون من ستة كتب يناقش ارتباط علوم الأرض بالعلوم الأخرى سياسياً ونووياً وطبياً، وكذلك دور الطاقة المستدامة النظيفة اقتصادياً وبيئياً:

- الطاقة الحرارية الأرضية
- الجيولوجيا الطبية
- هل انتهى عصر النفط؟
- الجيولوجيا السياسية
- الجيوفيزياء النووية
- كتابة الرسائل والمشاريع الجيولوجية

أما **الجزء الخامس** عبارة عن ستة كتب احتوت على 2020 سؤال وجواب لمساعدة طلاب الجامعات والباحثين وتهيئتهم للاختبارات الشاملة والتأهيلية للدراسات العليا ومزاولة المهنة:

321 سؤال وجواب في تطور الأرض

358 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء والاستشعار عن بُعد والـ GIS

358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية

380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية

303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلزالية الهندسية

300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية

المؤلـــــف

مُقَدِّمَة

يحتل كوكب الأرض المركز الثالث من حيث بُعْده عن الشمس. فهو أحد الكواكب الثمانية الرئيسة التي تدور حول أقرب نجم لنا ألا وهو الشمس، إضافةً إلى جانب العديد من الأجرام الصغيرة، بما في ذلك الكواكب القزمة والأقمار والكويكبات والمذنبات، إذْ تشكل هذه المجموعة نظامنا الشمسي. إنه أحد أنظمة النجوم والكواكب التي تدور في مدارات لا حصر لها في الكون. ولكن على حدّ علمنا، فإنّ الأرض هي الكوكب الوحيد الذي يضم جميع الظروف المطلوبة والملائمة لدعم الحياة بفضل اللّه سبحانه وتعالى.

أيضاً تعدّ الأرض خامس أكبر الكواكب في النظام الشمسي، فهي أصغر من الكواكب الغازية الأربعة العملاقة، المشتري وزحل وأورانوس ونبتون، لكنها أكبر من الكواكب الصخرية الثلاثة الأخرى، عطارد والمريخ والزهرة.

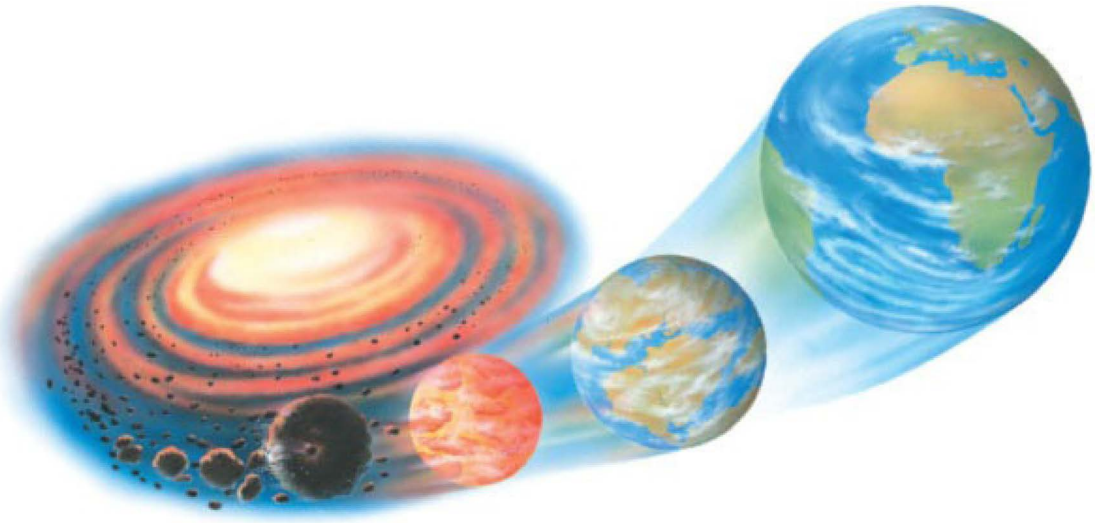
سنأخذك عزيزي القارئ في هذا العمل برحلةٍ يبلغ طولها 6400 كم!، وعبر زمانٍ يمتد لأكثر من 4.5 بليون سنة، تغوص فيها إلى مركز الأرض، لكنك بالتأكيد لن تشاهد هناك أيّ نوع من الحياة على غرار قصة جول فيرن الخيالية العلمية (رحلة إلى مركز الأرض)، وإنما سترى أعماق الأرض على حقيقتها بصخورها ومصهورها.

سنساعدك في عملية الغوص الخيالية هذه باستخدام آلة الزمن ومصعد ينتقل بك من طبقةٍ إلى أخرى، سنمضي برحلتنا حتى تصل إلى مكانٍ ستشعر فيه بالكثير من الحرارة والضغط، وكأنك تلمس سطح الشمس!

شـــــكل الأرض وخصائصـــــها

قبل أن نبدأ رحلتنا في الغوص في أعماق الأرض بمصعدنا الخيالي، سنبدأ رحلة بآلة الزمن إلى أعماق التاريخ، إلى الوقت الذي بدأت فيه الأرض تتشكل، وكيف صارت إلى ما صارت إليه اليوم.

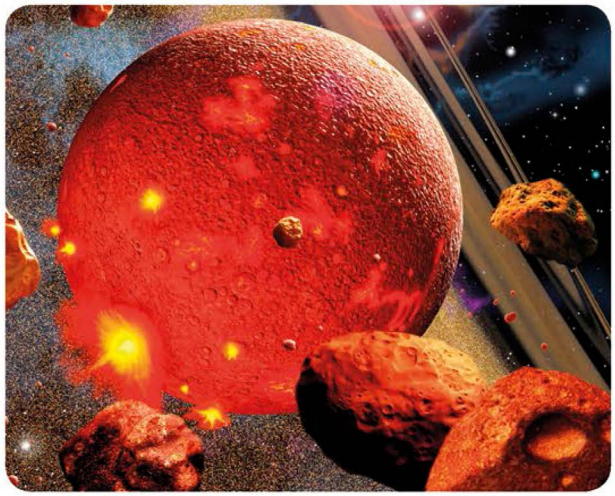
تقترح إحدى النظريات الفلكية أنّ كوكبنا نشأ من سحابة من الغاز والغبار قبل أكثر من 4.6 بليون سنة، والبليون هو ألف مليون، وقد تطور إلى كوكب فريد من نوعه.



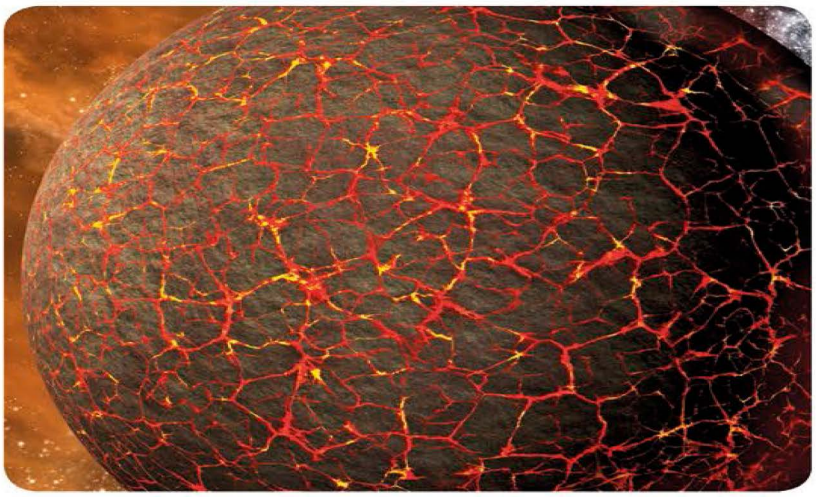
مثل بقية الكواكب الأخرى في النظام الشمسي، تشكلت الأرض من سحابة الصخور والغبار والغاز التي أحاطت بالشمس التي تشكلت حديثاً قبل 4.6 بليون سنة. حيث جرى تلاحم هذه المادة معاً في كتلة كروية من الصخور الحارة، التي انصهرت في النهاية وشكلت طبقات ذات نواة معدنية ثقيلة. بمرور الوقت، برد كوكب الأرض وتصلب، مشكلاً قشرة صخرية مغطاة بالمحيطات وجو متجدد من الهواء.

لقد أسهمت قوة الجاذبية بتشكّل الأرض، وهي القوّة التي تجعل الأجرام العائمة في الفضاء تجذب بعضها بعضاً، وتجعل أجسامنا تنجذب لسطح الأرض. من خصائص الجاذبية أنها تزداد مع زيادة الكتلة، الأمر الذي يمكّن كرةً من الغبار من النمو لتصير كوكباً. اقترب من نافذة آلة الزمن افتحها وستشاهد المناظر البديعة الآتية لكوكب الأرض وهو يتشكل:

كرة نارٍ ملتهبة: عندما اصطدمت بقايا صخور الفضاء بسبب الجاذبية، حيث ولّد الاصطدام الحرارة التي صهرت هذه الصخور الفضائية جزئيّاً ولحمتها معاً. هذه العملية تسمى التنامي.

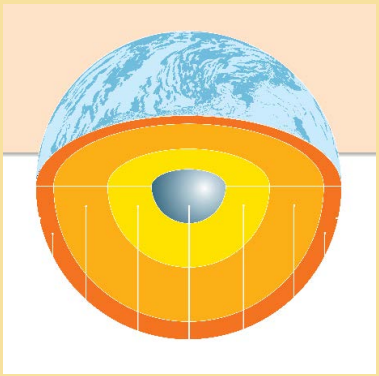


الاندمـــــاج: مع نمو الأرض، أدت الحرارة المتراكمة بفعل تأثير الكثير من الصخور الفضائية إلى ذوبانها، فغرق معظم الحديد الثقيل في المركز ليشكل نواة الكوكب، وبدأت تظهر قشرة على سطح الكوكب.



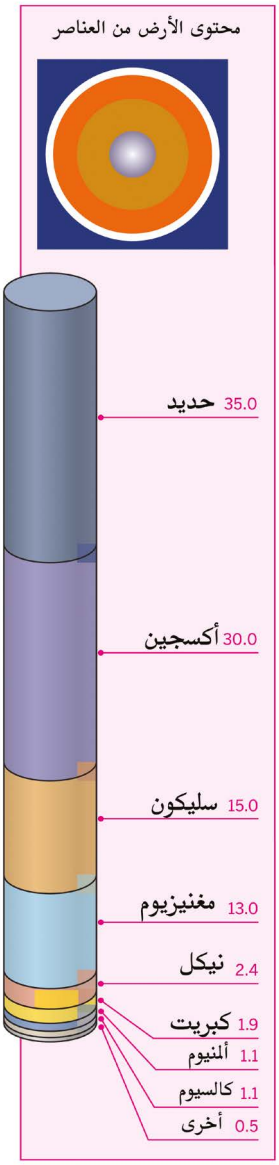
تشـــــكل الهـواء والميـــــاه أدت الانفجـارات البركانيـة الهائلـة خـلال أول 500 مليـون سـنة علـى كوكـب الأرض إلـى إطـلاق بخـار المـاء والغـازات الأخـرى، التي شكلت المحيطات والغلاف الجوي المبكر.

أغلق نافذة آلة الزمن، وعد بنا إلى العصر الراهن، حتى نشاهد ماذا حدث بعد أن تبرّد سطح الأرض.

حقائق علمية مدهشة	صخور قديمة جداً
	اكتشفت إحدى أقدم الصخور حتى الوقت الحالي على الأرض في منطقة جاك هيلز Jack Hills في غرب أستراليا. إذْ يبلغ عمر صخرة جاك هيلز نحو 4.4 بليون سنة. (يبلغ عمر الأرض نفسها نحو 4.6 مليار سنة!).

الخصائص الكيميائية للأرض

تتكون الأرض بشكلٍ عام في الغالب من الحديد (32.1 %) والأكسجين (30.1 %) والسيليكون (15.1 %) والمغنيسيوم (13.9 %) والكبريت (2.9 %) والنيكل (1.8 %) والكالسيوم (1.5 %) والألمنيوم (1.4 %)، بينما تتكون النسبة المتبقية البالغة 1.2 % من كميات ضئيلة من العناصر الأخرى. تنقسم الأرض كيميائيّاً إلى ثلاث طبقات:



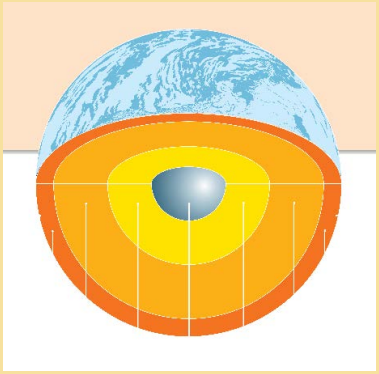
الطبقة الخارجية التي تسمى القشرة الأرضية Crust، وتتكون بالكامل تقريباً من مادة السيليكات الصخرية (الأكسجين والسيليكون)، مع الألومنيوم والحديد والكالسيوم والمغنيسيوم والصوديوم والبوتاسيوم والتيتانيوم وآثار 64 عنصراً آخرَ.

الطبقة الثانية هي الوشاح: وهو قسمين علوي وسفلي، حيث يتكون الوشاح العلوي من سيليكات الحديد والمغنيسيوم. ويتكون الوشاح السفلي من أكاسيد وأكاسيد السيليكون والمغنيسيوم.

أما الطبقة الثالثة: النواة (اللب)، فهي تتكون من معادن الحديد والنيكل وآثار الكبريت والكربون والأكسجين والبوتاسيوم.

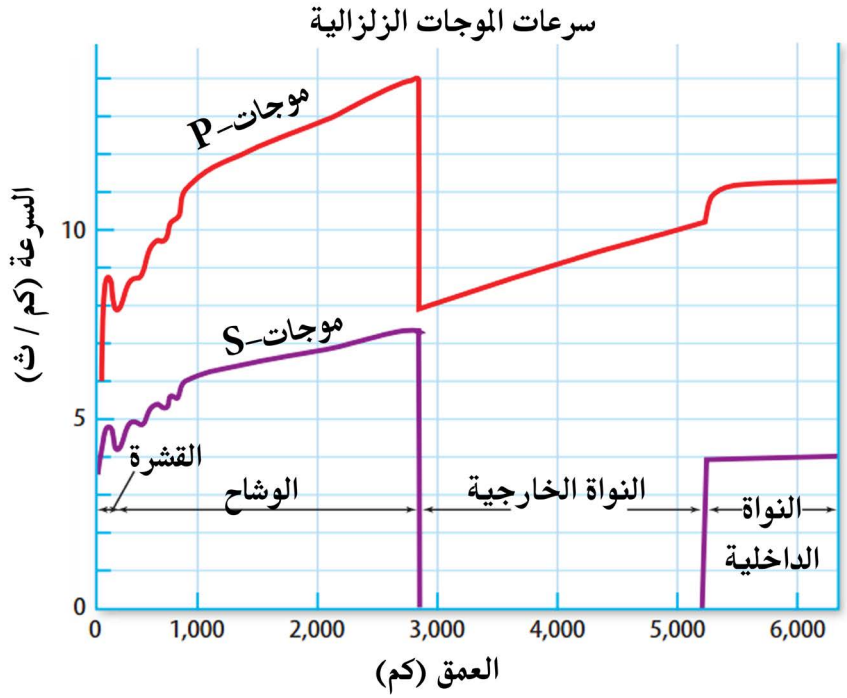
وقد توصل العلماء إلى معرفة كيمياء الأرض من خلال تحليل الكثافات بمساعدة موجات الزلازل ومن خلال دراسة النجوم والنيازك والكواكب الأخرى. من بين كل كيلوغرام من المواد في القشرة القارية للأرض، يوجد 12 عنصراً فقط بكميات أكبر من 1 %، وتمثل العناصر الاثنا عشر الوفيرة 992.3 من 1000 غرام في الكيلوغرام من القشرة القارية للأرض.

تحوي جميع المعادن الشائعة على تركيبات تعتمد على عنصر واحد أو أكثر من هذه العناصر الوفيرة. تشكل العناصر الثمانون المتبقية مجتمعة أقل من 1 % من القشرة بالوزن وأقل من 2 % بالحجم. توجد المعادن المصنوعة من العناصر النادرة بكميات صغيرة فقط، كما أن رواسب خام العناصر النادرة مثل الذهب واليورانيوم والقصدير نادرة ويصعب العثور عليها. ومع ذلك، يمكن استخراج هذه العناصر النادرة واستخدامها بتجميع مجموعة واسعة من المواد في المختبر وفي التصنيع للاستخدام اليومي.

حقائق علمية مدهشة	أندر من النادر
	أندر عنصر يحدث بشكل طبيعي على الأرض هو الفرانسيوم. يوجد فقط نحو (25 غرام) من الفرانسيوم على الأرض في أي وقت. إنه شديد النشاط الإشعاعي ويتحول إلى عناصر أخرى بعد دقائق فقط من تكوينه.

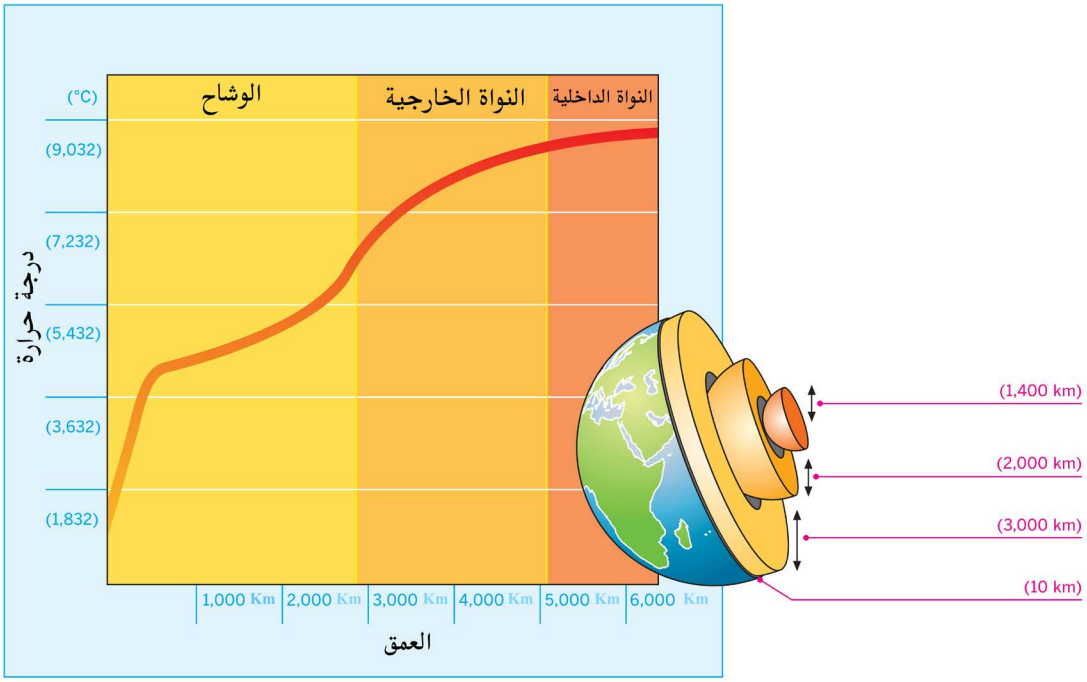
الخصائـــص الفيزيائيـــة للأرض

حسناً، أخذنا فكرة عن الخصائص الكيميائية للأرض، فماذا عن خصائصها الفيزيائية؟ باستخدام طرائق جيوفيزيائية غير مباشرة تمكّن العلماء من دراسة الخصائص الفيزيائية للأرض لكن على مستوى أكبر. فهم يرسلون موجات زلزالية مصطنعة كبيرة من إحدى الجهات، ويستقبلون انعكاساتها عن طبقات الأرض من جهة أخرى، وبتحليل هذه الموجات بوساطة الحاسوب تمكنوا من معرفة ما هي درجات الحرارة والكثافة والسماكة والضغط وغيرها من العوامل الفيزيائية.



منحنياتٍ توضح توزيع سرع الموجات الطولية والقصيرة عبر طبقات الأرض

لقد اكتشف العلماء أن درجة الحرارة داخل الأرض تزداد كلما تعمقنا، لتصل إلى أكثر من 5000 درجة مئوية في المركز أو النواة، ويزداد الضغط أيضاً بشكل كبير مع العمق. ويؤدي الجمع بين هذين العاملين إلى نشوء خمس طبقات أو مناطق مميزة داخل الأرض بالتناوب بين الأطوار الصلبة والسائلة وشبه السائلة أو اللدنة.



منحنٍ يوضح تغير درجة الحرارة مع العمق.

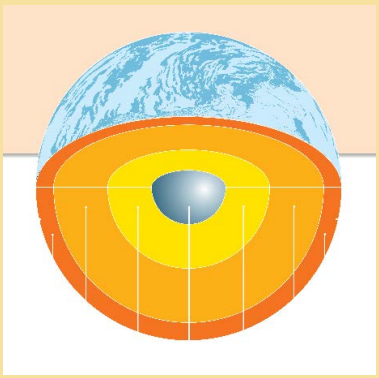
وقد وجد العلماء أن الطبقة الخارجية (الغلاف الصخري) رقيق وبارد وصلب على القشرة وبعض الوشاح، وهو (يطفو) على الغلاف الوهن الأساسي.

الغلاف الوهن أو الموري (أستينوسفير) Asthenosphere وهو أكثر سخونة وفي حالة شبه سائلة. بدءاً من عمق 80 إلى 100 كيلومتر تقريباً، تتدفق الصخور

الموجودة في الغلاف الوهن ببطء في حالة لدنة تتحرك بحركةٍ دائريةٍ مكونة تيارات حرارية من الصخور الساخنة. هذا ينقل الحرارة من أعماق الوشاح نحو السطح. هذه الحركة هي التي تساعد على تحريك القارات وتشكل البراكين وتدفقات الحمم البركانية.

الطبقة التالية الوشاح السفلي (الميزوسفير) Mesosphere وتتألف من الجزء الداخلي من الوشاح، وهي عبارة عن منطقة من الصخور الصلبة شديدة السخونة. هنا، ومع ارتفاع درجة حرارتها أكثر من الغلاف الوهن، إلا أن الضغط مرتفع جداً بحيث لا يمكن تكوين صخور سائلة.

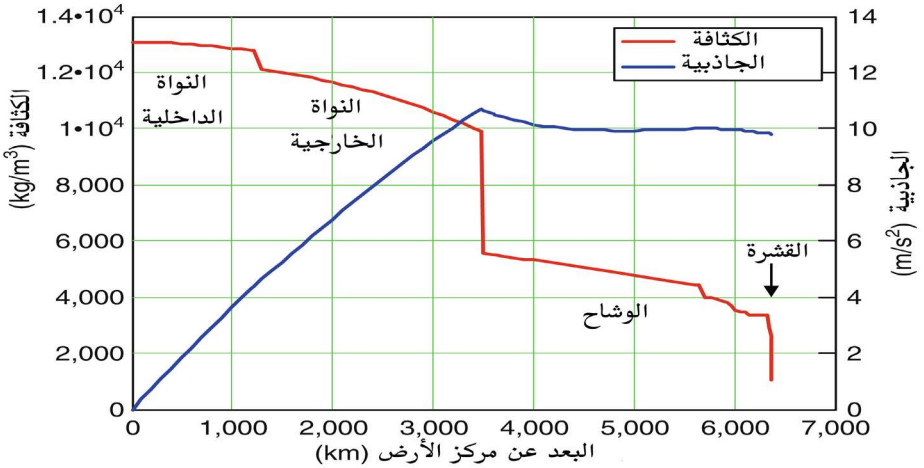
أخيراً؛ تنقسم النواة إلى جزءين النواة الخارجية السائلة، حيث تكسب درجة حرارة بسبب الضغط الزائد، والنواة الداخلية الصلبة حيث يكون الضغط مرتفعاً جدّاً فيتعذر تكوين سائل.

حقائق علمية مدهشة	مناجم حارة
	يعد منجما تاوتونا TauTona ومبوننغ Mponeng للذهب في جنوب إفريقيا الأعمق في العالم، حيث ينخفضان نحو 4 كيلومترات تحت سطح الأرض. مع أنها مناجم عميقة، إلا أنها قشرة ضحلة. ومع ذلك، يمكن أن ترتفع درجات الحرارة في قاع المناجم إلى 55 درجة مئوية. يعمل نظام تكييف الهواء المتطور على خفض درجة الحرارة للسماح لعمال المناجم بالعمل.

ما رأيـــك أن نـــــزن الأرض؟

قال أرخميدس يوماً ما: أعطوني نقطة ارتكاز وعصاً طويلة وأنا سأحرك لكم الأرض. ولكن بعد أكثر من 2000 عام لم يستطع أحد أن يقدم له ذلك المركز ولا تلك العصا الطويلة، لأنها أصلاً فكرة خيالية وتفوق قدرات البشر.

لكنّ عالماً اسمه هنري كافنديش قال له: يا رجل إن أروع الحلول وأجملها هو أبسطها. اسمع أنا لدي فكرة جميلة جدّاً تمكننا من معرفة وزن الأرض باستخدام جهاز اسمه ميزان الالتواء البسيط، الذي يقيس مقدار قوة الالتواء الناتجة عن سحب الجاذبية لكرتين كبيرتين على زوج من كرتين أصغر، ويمكن حساب الجاذبية الضعيفة بين زوجي الكرتين الصغيرتين، ومن خلال مقارنة هذا مع قوة الجاذبية الأرضية، يمكننا حساب كثافة الكوكب (ولما كان حجم الأرض معروفاً بالفعل، أمكننا معرفة كتلته أيضاً).



منحنٍ بياني يعبر عن العلاقة بين حقل الجاذبية الأرضية وكثافة الكتلة داخل الأرض وفقاً لنموذج الأرض المرجعي الأولي (PREM) المتماثل شعاعيّاً

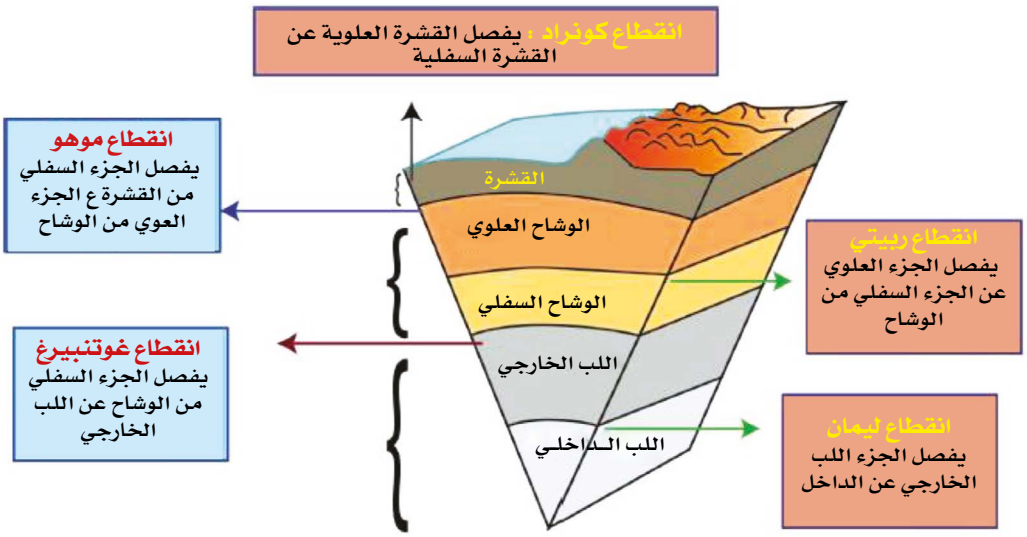
وقد تمكن العلماء من حساب وزن الأرض وأنه يبلغ 5.9736×10^{24} كغ، وبالتالي تبلغ كثافتها 5.514 غرام/ سم^3، لكن رقم الكثافة أظهر أن كوكبنا يجب أن يكون في الغالب صلباً، ما لم تكن هناك مواد غير معروفة كثيفة جدّاً في مكان ما في الأعماق.

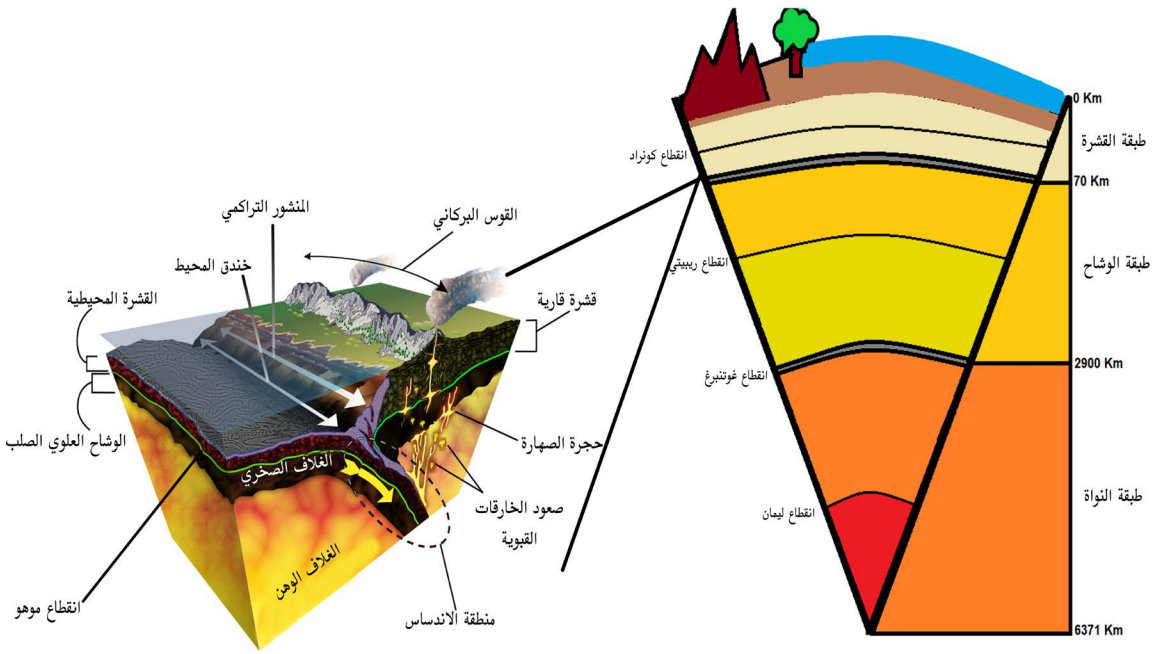
على غرار خيال أرخميدس، لو كان لدينا ميزان عملاق ووضعنا الأرض في إحدى كفتيه، ووضعنا في الكفة الأخرى القمر وعطارد والزهرة والمريخ ستجد أن وزن الأرض يعادل وزن تلك الأجرام مجتمعة

الانقطاعـــات داخـــل الأرض

تنقسم بنية الأرض إلى أربعة مكونات رئيسة القشرة، والوشاح، والنواة الخارجية، والنواة الداخلية. تحوي كل طبقة على تركيبة كيميائية فريدة وحالة فيزيائية يمكن أن تؤثر على الحياة على سطح الأرض. تنفصل كل من هذه الطبقات عن بعضها بعضاً من خلال مناطق تسمى مناطق الانتقال Transition Zones أو الانقطاعات Discontinuities ويوجد داخل الأرض عدة انقطاعات أهمها:

1. انقطاع كونراد Conrad Discontinuity
2. انقطاع موهو Moho Discontinuity
3. انقطاع 410 كم 410 Km Discontinuity
4. انقطاع 660 كم 660 Km Discontinuity
5. انقطاع ريبيتي Repiti Discontinuity
6. انقطاع غوتنبرغ Gutenberg Discontinuity
7. انقطاع ليمان Lehman Discontinuity





مواقع الانقطاعات بين القشرة الأرضية والنواة الداخلية

في الواقع تُستخدم كلمة (انقطاع Discontinuity) في الجيولوجيا للإشارة إلى السطح الذي تتغير فيه سرعة الموجات الزلزالية. ومعظم الانقطاعات سُميت على أسماء العلماء المكتشفين لها، وسنتكلم عن هذه الانقطاعات بالتفصيل فيما يأتي:

انقطـــاع كونـــراد

يفصل هذا الانقطاع القشرة العلوية (الجرانيتية) عن القشرة السفلية (البازلتية). يتوافق انقطاع كونراد مع الحدود شبه الأفقية في القشرة القارية التي تزداد فيها سرعة الموجة الزلزالية بطريقة متقطعة. لوحظت هذه الحدود في مناطق قارية مختلفة على عمق 15 إلى 20 كم، ومع ذلك فهي غير موجودة في المناطق المحيطية. عند المرور عبر انقطاع كونراد، تزداد سرعة الموجات الزلزالية الطولية بشكل مفاجئ من نحو 6 إلى 6.5 كم / ثانية.

انقطـــاع موهـــو

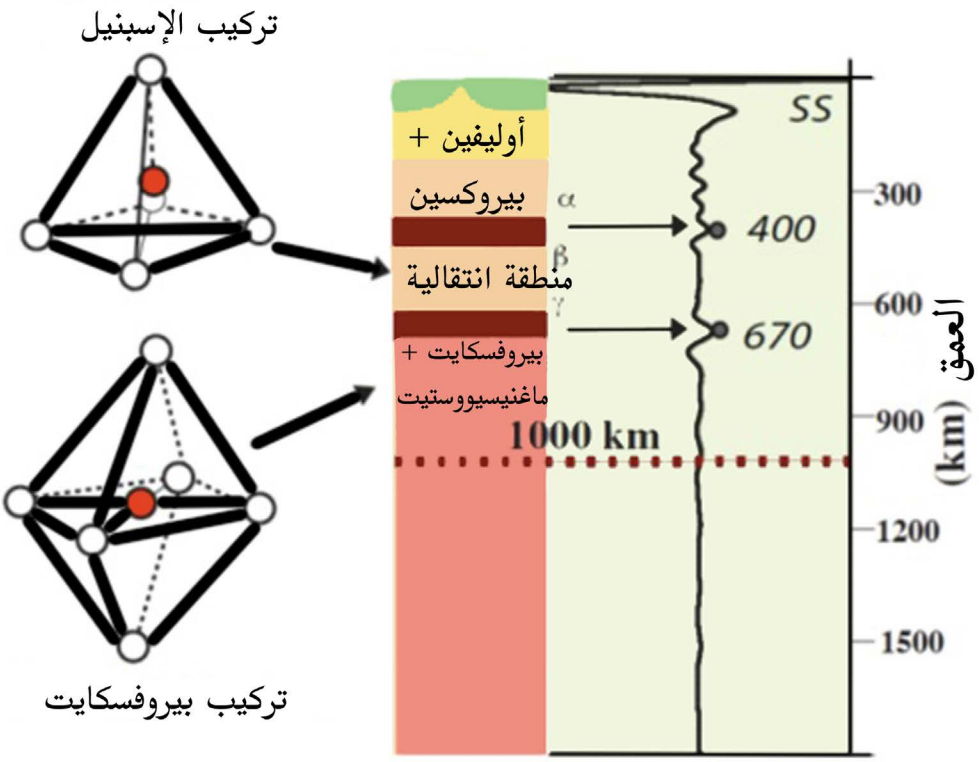
لاحظ عالم الجيوفيزياء موهورفيتش Mohorvicic عام 1909م ازدياد سرعة الموجات الزلزالية وتغير الصفات المميزة لها عند انتقالها من الجزء السفلي لطبقة القشرة الأرضية (وسط منخفض الكثافة) إلى الجزء العلوي من طبقة الوشاح (وسط عال الكثافة) مما يدل على أن هناك وسطاً ذا كثافة عالية وطبيعة غير صلبة تماماً يفصل بين طبقتي القشرة الأرضية والوشاح، وقد تم

تسمية هذا الوسط باسم (Moho Discontinuity) تكريماً لهذا العالم. ويختلف عمق هذا الوسط من مكان إلى آخر دلالة على اختلاف سمك القشرة الأرضية وكثافتها تحت القارات عنها تحت المحيطات. يقع هذا الانقطاع على عمق يتراوح بين 30 و60 كم وذو أهمية خاصة في تفسير السجلات الزلزالية على مسافات مركزية قصيرة تصل إلى بضع مئات من الكيلومترات.

انقطاعي المنطقة الانتقالية في الوشاح (عند 410 كم و 660 كم)

تقع المنطقة الانتقالية (MTZ) بين الوشاحين العلوي والسفلي بين عمق 410 كم و 660 كم، وتعتبر البنية الزلزالية للمنطقة الانتقالية مهمة لفهم البنية الحرارية للوشاح العلوي ونماذج ديناميكية باطن الأرض. تفسّر الانقطاعات البالغة عند 410 كم و 660 كم على أنها انتقالات طور معدني.

- عند انقطاع 410 كم يكون التغير في الطور موجباً ناتجاً عن تغير الضغط من معدن الأولوفين-أو البيروكسين Mg_2SiO_4 إلى سبينل.
- عند انقطاع 660 كم فان تغير الطور المعدني من سبينل إلى بيروفسكايت و ماغنيسيووستيت يصير سالباً على منحنى كلابيرون، ويعتبر هذا التفاعل ماصاً للحرارة ويحدث قفزة في اللزوجة ويمكن ملاحظة ذلك من خلال انعكاس وانكسار الموجات الزلزالية علاوة على تغير درجة الحرارة والكثافة مع العمق. سيؤدي هذا التغير في الطور إلى ارتفاع عند 410 كم وانخفاض عند 660 كم في المناطق ذات درجات الحرارة المنخفضة مثل تلك المرتبطة بألواح المحيطات المنحدرة.



الانقطاعان في المنطقة الانتقالية من الوشاح عند 410 كم و 660 كم.

انقطـــــاع ريبيتـــــي

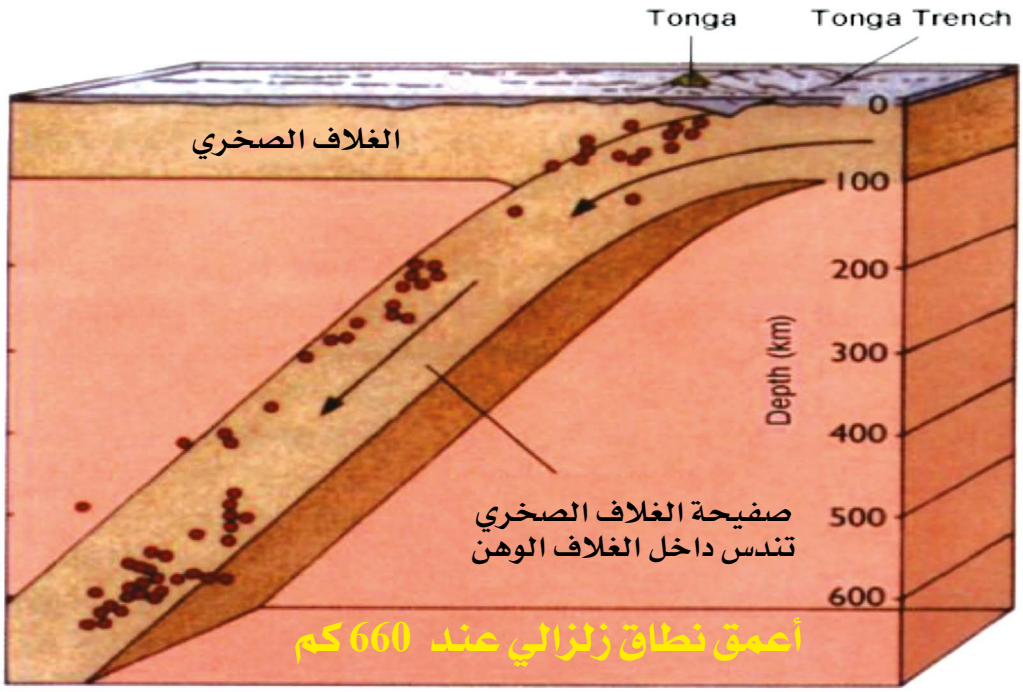
يقسـم الوشـاح العلـوي عـن السـفلي، ويتـراوح عمقهـا بـين 660 و 700 كـم تقريباً. مروراً بهذا الانقطاع، تزيد الموجات الزلزالية من سرعتها. يكون الوشاح السفلي أكثر سخونة وتسييلاً بينما يكون الجزء العلوي أكثر برودة وعجيناً.

تشير الدراسات الزلزالية ببيانات قصيرة المدة إلى أن المنطقة الانتقالية لها سمك صغير نسبياً (نحو 10 كم). لا يزال سبب انقطـــاع ريبيتي غير واضح وظهوره حتى الوقت الحالي فقط من خلال عدد قليل نسبيّاً من الملاحظات المشـــغولة. وقد عثـــر على مثـــل هذا الانقطـــاع خـــارج منطقـــة الاندساس Subduction. لذلك يُفترض إمكان أن يكون انقطاعاً عالميّاً.

منطقـــة Wadati – Benioff

تحدث أكثر الزلازل وأقواها على امتداد انزلاق الصفائح تحت بعضها البعض مناطق Benioff هي مناطق غمس، مناطق مستوية تقريباً من نشاط زلزال متزايد ناتج عن تفاعل صفيحة قشرة محيطية متجهة إلى أسفل مع صفيحة قارية أو محيطية سائدة. تحدث عند حدود الصفائح القشرية تسمى مناطق الاندساس. يمكن أن تحدث الزلازل عن طريق الانزلاق على طول صدع دفع الاندساس أو عن طريق الانزلاق داخل الصفيحة الهابطة، نتيجة الانحناء والتمدد حيث يتم سحب الصفيحة في الوشاح. تتراوح الانخفاضات في المناطق عادةً بين 40 و60 درجة. تُعرف هذه المناطق أيضاً باسم (منطقة Wadati–Benioff)؛ تيمناً بالعالم الأمريكي Benioff والعالم الياباني Wadati اللذين تعرفا على هذا النطاق. تأتي أعمق الزلازل المسجلة إلى أعماق تصل إلى 660 كم بحد أقصى.

تم العثور على مناطق Benioff في مناطق الاندساس التي تتشكل عن طريق اصطدام صفيحتين من القشرة الأرضية بكثافة وسمك متباينين، على سبيل المثال الصفيحة المحيطية والقارية. يتم دفع القشرة الأثقل (الرقيقة) للصفيحة المحيطية أو تنغمس تحت القشرة الأخف والأكثر سمكاً للصفيحة القارية. ينتج خندق عميق في المحيط حيث تلتقي هاتان الصفيحتان. على طول خندق بيرو-تشيلي، يتم غرس صفيحة المحيط الهادئ تحت صفيحة أمريكا الجنوبية، التي تستجيب عن طريق الانهيار لتشكيل جبال الأنديز.



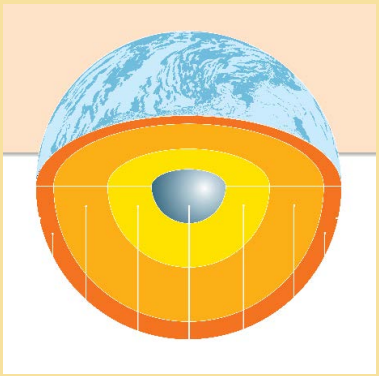
نطاق Wadati – Benioff الواقعة في مناطق الاندساس

انقطـــــاع غـــوتنبـــــــرغ

تم اكتشاف الدليل على هذا الانقطاع عند عمق 2900 كم تقريباً من قبل Wiechert و Oldham في عام 1906، ولكن تم التحديد الصحيح وتحديد عمق هذا الانقطاع بواسطة Gutenberg (1914)، ومن ثم سمي بانقطاع Gutenberg ويقع عند الحد الفاصل بين الوشاح واللب الخارجي (CMB). عند هذا الانقطاع يوجد تغير مفاجئ في الموجات الزلزالية التي تنتقل عبر الأرض. حيث تنخفض سرعة الموجات الزلزالية الأولية (موجات P) بينما تختفي الموجات الزلزالية الثانوية (موجات S) تماماً. أثبت الانقطاع أنه تحت هذه الطبقة، يجب أن يكون باطن الأرض سائلاً، وفوق هذه الطبقة، سيكون باطن الأرض صلباً. في الواقع، اللب الخارجي، الذي يقع تحت انقطاع غوتنبرغ، سائل بكثافة أعلى بكثير من الوشاح. يحتوي على كميات عالية من الحديد. فوق انقطاع جوتنبرج يقع الوشاح السفلي، وهو صلب بطبيعته لكنه أقل كثافة من اللب الخارجي. تعد حدود الوشاح الأساسي، أو CMB، حاجزاً مميزاً بين اللب والغطاء الذي تم تحديده من خلال الاختلاف في الموجات الزلزالية عند هذا المستوى. إنها منطقة ضيقة وغير منتظمة مع تموجات يصل عرضها إلى 5–8 كيلومترات. يؤثر نشاط الحمل الحراري داخل الوشاح العلوي على هذه التموجات، التي يمكن أن تكون العامل الدافع وراء حركة الصفائح التكتونية – حركة أجزاء من الغلاف الهش للأرض.

انقطـــــاع ليمـــــان

تمثل منطقة الانتقال بين اللب الخارجي والداخلي. انقطاع ليمان هو زيادة مفاجئة في سرعات الموجة P و S على عمق 220 ± 30 كم، اكتشفها عالم الزلازل إنجي ليمان، وهي تظهر تحت القارات، ولكن ليس عادةً تحت المحيطات، ولا تظهر بسهولة في المتوسط العالمي.

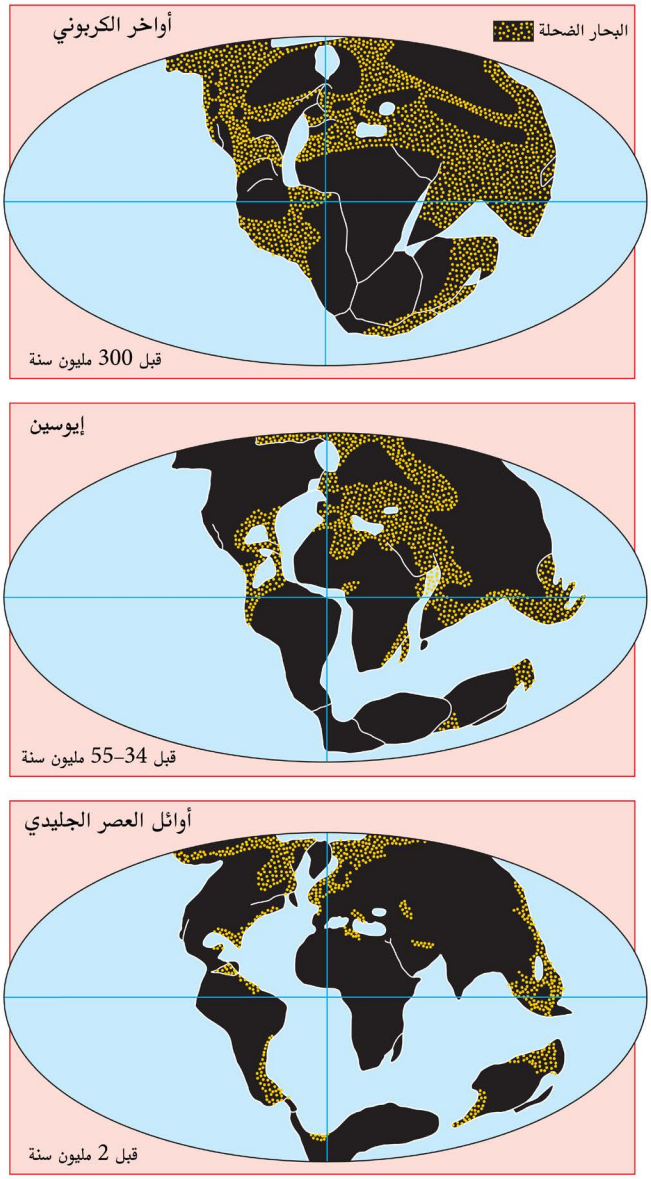
حقائـــق علميـــة مدهشـــة	يوجـد من هـو أكـــبر من الأرض
	إن شمسنا ضخمة لدرجة أنها أكبر بمليون مرة من الأرض! وبالتالي أثقل منها بما يعادل 330000 مرة!

الزحـــف القـــاريّ والصفائـــح التكتونيـــة

حتى نفهـــم عملية الزحف (الانزيـــاح) القارّي ونقربها لأذهاننـــا، أخرج بالون أحمر من حقيبة مستلزمات الرحلة، وألصق عليه مجموعة نجوم ملونة تمثل قارات العالم المعروفة حالياً لكن بشكل متقارب جداً، ثم ابدأ بعملية نفخ البالون وتوقف قليلاً وانظر كيف تتغير مواقع النجوم (القارات) كلما زادت عملية النفخ، زاد التباعد بين النجوم (القارات).

أما التوزيع الجغرافي لشكل الأرض فقد استدل عليه عام 1915 من خلال نظرية الانجراف القاري التي تفترض وجود قارة عملاقة قبل حوالي 200 مليون سنة أطلق عليها اسم بانجيا Pangea يحيط بها محيط عظيم أطلق عليه اسم بانثالاسا Panthalassa وتفككت هذه القارة العظيمة إلى:

- **قارة شمالية سميت لاروسيا** Laurasia وتضم حالياً قارات أمريكا الشمالية وأوراسيا (أوروبا وآسيا) ما عدا الهند وجرينلاند.
- **قارة جنوبية أطلق عليها قوندوانالاند** Gondowana land وتضم حالياً قارات أمريكا الجنوبية، وأفريقيا، وأستراليا – الهند، والقارة المتجمدة الجنوبية. ويفصل بين هاتين القارتين بحر كبير يسمى التثيس Tethys ويُعتقد أن قارة القوندوانالاند بدأت تتفكك حيث انفصلت أفريقيا وأمريكا الجنوبية ككتلة واحدة وبدأ بعدها المحيط الأطلسي في التكوين. وخلال تلك المرحلة أيضاً انفصلت أستراليا من القارة المتجمدة الجنوبية.



تتجذر القارات في الصفائح المتحركة للقشرة، التي تحملها ببطء شديد حول الكرة الأرضية. على مدى ملايين السنين، جرى تقسيمها ودفعها معاً في ترتيبات مختلفة. القارات التي نعرفها اليوم هي أجزاء من شبه القارة العملاقة التي كانت موجودة قبل 270 مليون سنة، وانفصلت خلال عصر الديناصورات.

مع اكتشاف العلماء للحمل الحراري في الوشاح، والدليل على انتشار قاع البحر، صار من السهل جداً رؤية أن القارات قد تحركت عبر الزمن الجيولوجي بالنسبة لبعضها بعضاً. لكن هذه الأفكار لم تكن مقنعةً دائماً تماماً. مع أنّ أفكار جيمس هوتون حول بناء الجبال ودورة الصخور، قد مر وقت طويل عليها قبل أن يجري اقتراح أي آلية أخرى.

بين عامي 1910 و 1915، اقترح عالم الجليد الأمريكي فرانك تايلور وعالم الأرصاد الجوية الألماني ألفريد فيغنر فرضية الانزياح (الانجراف) القاري. ومع

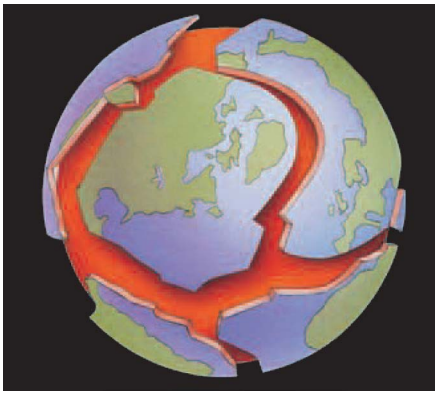
ذلك، لا يمكن لأحد أن يتخيل طريقة يمكن للقارات من خلالها الانزياح مثل السفن في البحر عبر الوشاح الصخري الصلب على ما يبدو.

لما يقرب من نصف قرن، كان مؤيدو نظرية الانزياح القاري يمثلون الأقلية. لكن قلّةً من مؤيدي النظرية كانوا يعملون بجد. حيث كان أليكس دو تويت في جنوب إفريقيا يجمع أدلة على هياكل صخرية مماثلة بين جنوب إفريقيا وأمريكا الجنوبية، بينما اقترح آرثر هولمز، عالم جيوفيزيائي بريطاني، الحمل الحراري Convection في الوشاح كآلية للانزياح. ولم يُسوَّ الجدل بين العلماء إلا في ستينيات القرن العشرين، عندما بدأ علماء المحيطات العمل. حيث اقترح هاري هيس أن الحمل الحراري تحت قشرة المحيط قد يتسبب في انتشار قاع البحر من خلال تلال وسط المحيط، وقد قدم فريد فاين ودرم ماثيوز الدليل المغناطيسي لانتشار قاع البحر. كما كانت أوراق توزو ويلسون في كندا، وجيسون مورغان في برينستون، ودان ماكنزي في كامبريدج هي التي جمعت الأدلة معاً في نظرية الصفائح التكتونية.

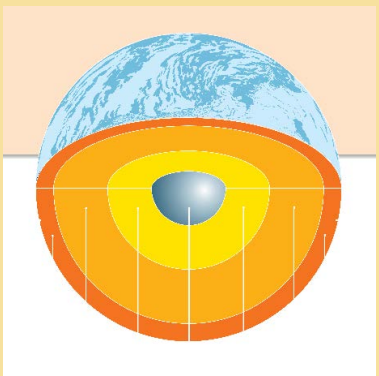
تفسّر لنا نظرية الصفائح التكتونية سطح الأرض من ناحية حركات عدد صغير من الصفائح الصلبة التي تتحرك بالنسبة لبعضها بعضاً، وكيف تتفاعل وتتشوه على طول حدودها. لا يعني ذلك أن القارات تنزاح بحرية وإنما تُحمل على صفائح تمتد أعمق بكثير لتشمل الغلاف الصخري والوشاح، الذي يبلغ سمكه عادةً 100 كيلومتر. لا تقتصر الصفائح على القارات اليابسة، لكنها تشمل أيضاً صفائح قاع المحيط.

يوجد حالياً سبع صفائح رئيسية: الصفائح الأفريقية، والأوروبية الآسيوية، وأمريكا الشمالية، وأمريكا الجنوبية، والمحيط الهادئ، والهندو الأسترالية،

والقارة القطبية الجنوبية. كما يوجد أيضاً عدد من الصفائح الصغيرة، بما في ذلك ثلاث صفائح كبيرة جدّاً حول المحيط الهادئ، بالإضافة إلى بعض الأجزاء الأكثر تعقيداً حيث تنضم صفائح أخرى.



تحوي كل صفيحة تكتونية على طبقة سفلية من الصخور الصلبة وطبقة عُليا تسمى القشرة. تركب الصفائح فوق الأرض التي تتحرك ببطء، ومعظمها من الوشاح الصلب. عندما تكون القشرة رقيقة، يكون سطح الأرض منخفضاً ومغطىً بالبحار والمحيطات. تتشكل القارات حيث تكون القشرة أكثر سمكاً. عندما تتحرك الصفائح التكتونية، تحمل القارات معها وتغير المحيطات شكلها.

حقائق علمية مدهشة	اصطدام سكاي وارد
	أدى تصادم شبه القارة الهندية والقارة الآسيوية إلى إنشاء سلسلة جبال الهيمالايا، موطناً لأعلى قمم الجبال في العالم، بما في ذلك تلك التي يزيد ارتفاعها عن 7300 متر. لأن الانزياح القاري لا يزال يدفع الهند إلى آسيا، فإن جبال الهيمالايا لا تزال تنمو.

الأدلة العلمية على صحة نظرية الصفائح التكتونية

منذ نحو 225 مليون سنة، بدأت التضاريس بالتحرك شمالاً بسرعة 10 سنتيمترات في السنة. استمر هذا لمدة 135 مليون سنة، وعندها بدأت أحافير أمريكا الشمالية في الظهور عندما وصلت التضاريس إلى خط العرض الحالي واصطدمت بألاسكا. من المحتمل أيضاً أنها تجاوزت ساحل كاليفورنيا في طريقها، وكشطت المواد من الحزام الذهبي لولاية كاليفورنيا (ماذر لود). إذا كان هذا صحيحاً، فربما يكون اندفاع الذهب في ألاسكا على الصخور نفسها مثل اندفاع الذهب في كاليفورنيا، لكنه انحرف 2400 كيلومتر إلى الشمال.

طبعاً لا يقبل العلماء أية نظرية تُطرح هكذا، وإنما لا بُدَّ أن تدعمها إثباتات علمية حقيقية تبرهن على صحتها، وسنورد فيما يأتي عدداً من هذه الأدلة.

دليل جغرافي: التلاؤم القاري

عندما اقترح عالم الأرصاد الجوية الألماني ألفريد فيغنر في عام 1915 أن القارات قد انزاحت حول العالم، كان أحد الأدلة التي اعتمدها هو الملاءمة القارية: أمريكا الجنوبية وأفريقيا تكاد تتلاءم معاً على طول الحواف المغمورة للأرفف القارية. إنها مثل قطع أحجية الصور المقطوعة العملاقة، يبدو أيضاً أن معظم القارات وجزءاً من آسيا تتلاءم معاً. وقد عزز هذا الاعتقاد بأن القارات هي أجزاء من قارةٍ واحدة عملاقة في عصور ما قبل التاريخ أطلق عليها اسم بانجيا.

قد تتشابك سواحل بعض القارات تقريباً إذا جرى إعادة ترتيبها مثل قطع أحجية ذات صور مقطوعة. على سبيل المثال، أمريكا الجنوبية تتلاءم مع إفريقيا.

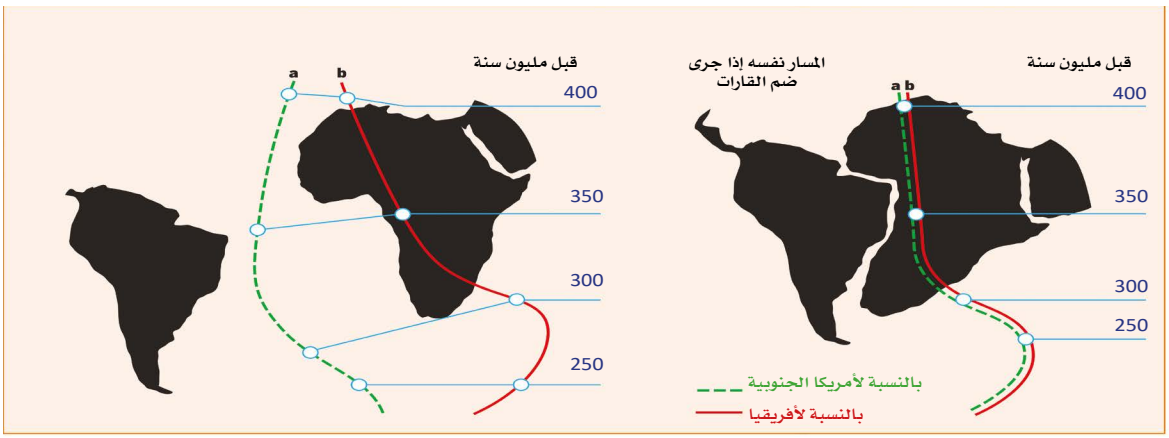
دليل جيوفيزيائي تغير مسار القطب المغناطيسي الشمالي

يوجد دليل آخر على حدوث الانزياح القاري يكمن في الأدلة المغناطيسية القديمة. إذ تحوي بعض الصخور على حبيبات مغناطيسية تتماشى مع مواضع الأقطاب المغناطيسية عند تشكل تلك الصخور. وتظهر الدراسات التي أجريت على مثل هذه المحاذاة أن القطب المغناطيسي الشمالي تجول على ما يبدو عبر شمال المحيط الهادئ على مدار 250 مليون سنة الماضية.

لقد أظهرت الاختبارات التجريبية المغناطيسية أن القارات قد تجولت في الماضي.

دليل جيوفيزيائي تغير مسار القطب المغناطيسي الجنوبي

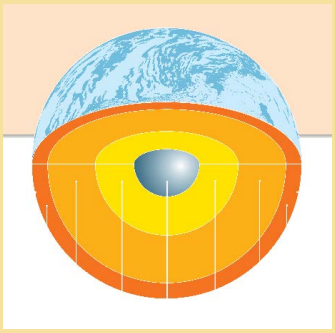
تكشف الدراسات المغناطيسية القديمة في قارات مختلفة عن مسارين ظاهريين للتجول القطبي، وليس مساراً واحداً. وتظهر صخور أمريكا الجنوبية مساراً قطبيّاً مختلفاً عن المسار الذي تظهره صخور إفريقيا. وإذا جرى ضم القارتين، فسيظهر مسار تجول واحد، مما يشير إلى أن القارتين قد جرى ضمهما مرة واحدة لكنهما تباعدتا عن بعضهما منذ ذلك الحين.



دليل من علـــم الأحياء انتشـــــار السرخـس اللسانـــي

ظهرت نباتات وحيوانات برية أحفورية تنتمي إلى العصر البرمي متطابقة في القارات الجنوبية، التي يفصلها البحر حالياً على نطاق واسع.

عندما صرح العالم الألماني ألفريد فيغنر في عام 1915 بأن قارات اليوم كانت ذات يوم جزءاً من كتلة واحدة، سخر الناس منه، لكن فيغنر كان على حق، وقال إنه مع وجود حفريات نباتية قديمة، مثل السرخس اللساني Glossopteris fern (في الصورة أعلاه) في قارات متباعدة على نطاق واسع، وأنها لا يمكن أن تأتي إلا من قارة أصلية واحدة. يتفق الجيولوجيون اليوم مع فيغنر على أن القارات قد تباعدت عن بعضها بالفعل.

حقائق علمية مدهشة	قـــارة أوركونتينينتس Urkontinent
	كان الاسم الأصلي الذي اقترحه الفريد فيغنر للقارة القديمة المقترحة هو أوركونتينينتس (Urkontinent) – معناها (الأول أو الأصلي)، و kontinent تعني (القارة) في لغة فيغنر الأصلية الألمانية. الاسم الأكثر شيوعاً لهذه الكتلة الأرضية القديمة الضخمة حالياً هو بانجيا Pangea، الذي يعني (جميع الأراضي) باللغة اليونانية.

البحـــث عن القـــــارات المفقـــودة

إذا كانت البقايا القارية قد تراكمت على سطح الكوكب في معظم تاريخها، فمتى بدأت؟ وأين هي القارة الأولى؟ ليس من السهل الإجابة على ذلك. لقد جرى إعادة صياغة الصخور القارية القديمة، وطيها، وتكسيرها، ودفنها، وصهرها جزئيّاً، وثنيها، وتكسيرها مرة أخرى، وإطلاقها من خلال عمليات الاقتحام الأصغر عمراً، بحيث يصعب فهمها. إنها تشبه محاولة التعرف على بقايا سيارة فردية داخل الخردة المضغوطة من ساحة الخردة.

لكن البحث عن أقدم الصخور على الأرض قد يقترب من نهايته. فقد ظهر بعض المتنافسين الأوائل من حزام باربرتون غرينستون في جنوب إفريقيا. عمر صخورها أكثر من 3.5 بليون سنة، لكنها بقايا حمم وجزر المحيط، وليست قارات. جرى اكتشاف صخور مماثلة حالياً في منطقة بيلبارا في غرب أستراليا، وهناك صخور في جنوب غرب غرينلاند تعطي تواريخ تصل إلى 3.75 بليون سنة، لكنها مرة أخرى صخور بركانية في المحيط.

يقع أفضل مرشح للقارة الأولى في قلب شمال كندا. في الأراضي القاحلة غير المأهولة على بعد نحو 250 كيلومتراً شمال يلونايف، بالقُرْب من نهر أكستا، توجد سقيفة منعزلة مليئة بالمطارق الجيولوجية ومعدات التخييم. فوق الباب توجد لافتة خشنة مكتوب عليها (Acasta City Hall)، التي تأسست قبل 4 بليونات سنة) . بعض الصخور الموجودة هناك يزيد عمرها على 4 بليونات سنة.

لقد تخلت عن أسرارها بفضل حبيبات الزركون المعدنية، التي تحبس داخل ذرات اليورانيوم الشبكية، والتي تتحلل إلى رصاص. يمكن أن تتعطل الحبيبات

من خلال إعادة الانصهار، والنمو اللاحق، وتلف الأشعة الكونية، ولكن ثمة أداة جرى تطويرها في أستراليا تُعرف باسم SHRIMP (مسبار أيوني دقيق حسَّاس عالي الدقة) تستخدم شعاعاً ضيقاً من أيونات الأكسجين لتفجير الذرات لأجزاء صغيرة. من الزركون يمكن تحليل مناطق مختلفة من الحبيبات بشكل فردي. أعطت مراكز بعض الحبيبات عمراً يصل إلى 4.055 بليون سنة، مما يجعلها من أقدم الصخور على الأرض، ودليل على وجود قارات عمرها أقل من 500 مليون سنة من تكوين الأرض.

في عام 2008، عُثر على بعض الصخور بالقُرْب من إينوكجواك Inukjuak، في خليج هدسون، كندا، يرجع تاريخها إلى 4.28 بليون سنة، مما يجعلها من أقدم الصخور في العالم. تظهر شريحة عبر إحدى التكوينات الصخرية أعلاه. يعطي عمرها فكرة عن الوقت الذي بدأ فيه سطح الأرض يصبح أكثر استقراراً. يعتقد الجيولوجيون أن الصخور تشكلت في الأصل على شكل حمم بركانية في قاع المحيط. ومنذ ذلك الوقت تحولت بشكل كبير (تغيرت بسبب الحرارة والضغط).

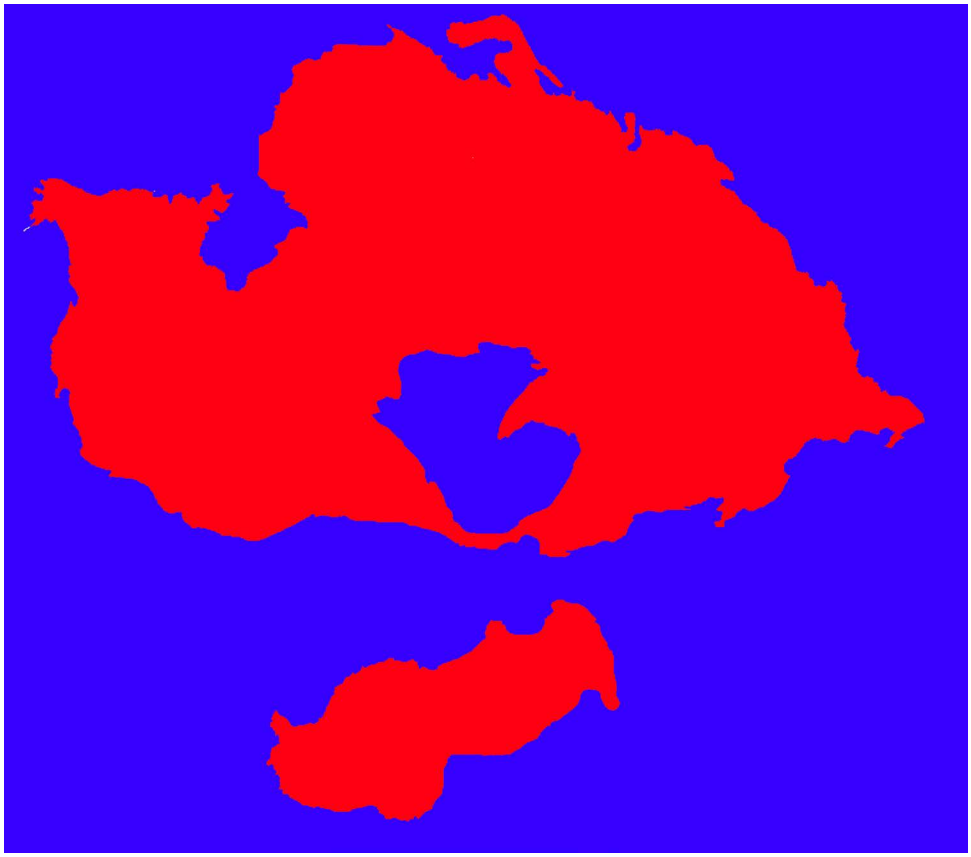
قـــــارات المســـــتقبل الفائقـــــة

لقد أمضينا معظم الوقت ننظر إلى الوراء، في الوقت المناسب على الحركة القارية في الماضي. لكن القارات لا تزال تتحرك، فكيف ستبدو خريطة العالم بعد 50 مليون سنة أو 100 مليون سنة أو أكثر؟

في البداية، من المعقول أن نفترض أن الأمور ستستمر في اتجاهاتها الحالية. حيث إنّ المحيط الأطلسي سيستمر في الاتساع، أما المحيط الهادئ فإنه سينكمش. ستستمر العملية التي أغلقت محيط تيثيس، مع المزيد من الزلازل وارتفاعات الجبال في البلد الخطر بين جبال الألب وجبال الهيمالايا.

ستستمر أستراليا بالصعود شمالاً، لتلحق ببورنيو وتدور حولها لتتصادم مع الصين. في المستقبل، قد تنعكس بعض الحركات. نحن نعلم سلفاً أنّ المحيط الأطلسي انفتح وأغلق في الماضي، ومن المحتمل أن تبرد قشرة المحيط الأطلسي في النهاية وتتقلص وتبدأ في الغرق مرة أخرى، وربما تنخفض تحت الساحل الشرقي للأمريكيتين. ثم سوف تتجمع القارات مرة أخرى.

يتوقع كريستوفر سكوتيز من جامعة تكساس في أرلينغتون أنه بعد 300 مليون سنة في المستقبل، ستكون هناك قارة عملاقة جديدة، أطلق عليها اسم بانجيا ألتيما Pangaea Ultima أو بانجيا بروكسيما Pangaea Proxima، ربما ببحر داخلي، كل ذلك سيبقى من المحيط الأطلسي الذي كان يوماً ما عظيماً.



بعد 300 مليون سنة هكذا سيصير حال القارات التي نعرفها اليوم. محيط كبير وقارتين فقط تحتجز الكبيرة منهما بداخلها بحر.

القشرة الأرضية Earth Crust

قشـــــــرة الأرض عبـــــــــارة عن طبقة رقيقة على ســـــــطح الأرض، تساهم بنسبة 1.1 – 0.2 % من العمق الكلي. إنها مكونة من العديد من أنواع الصخور المختلفة، معظمها خفيف نسبيّاً وغني بالسيليكون، بمتوسط كثافة (2.7–3 غرام لكل متر مكعب). تنقسم القشـــــــرة الأرضية إلى نوعين رئيسين: إحداهما تسمى بالقارية، والأخرى تسمى بالمحيطية. تتكون القشرة القارية في الغالب من صخـــــور منخفضـــــة الكثافة، مثل الغرانيت. أما القشرة المحيطية الرقيقة فهي تتكون أساســـــاً من صخور عالية الكثافة نسبيّاً، مثل البازلت. وتسمى المنطقة الانتقالية بين هذين النـــــوعين من القشـــــرة أحياناً بانقطـــــاع كونراد Conrad Discontinuity.

سنتعرف معاً على نوعي القشرة الأرضية كلٍ على حدة وأهم الفروقات فيما بينهما.

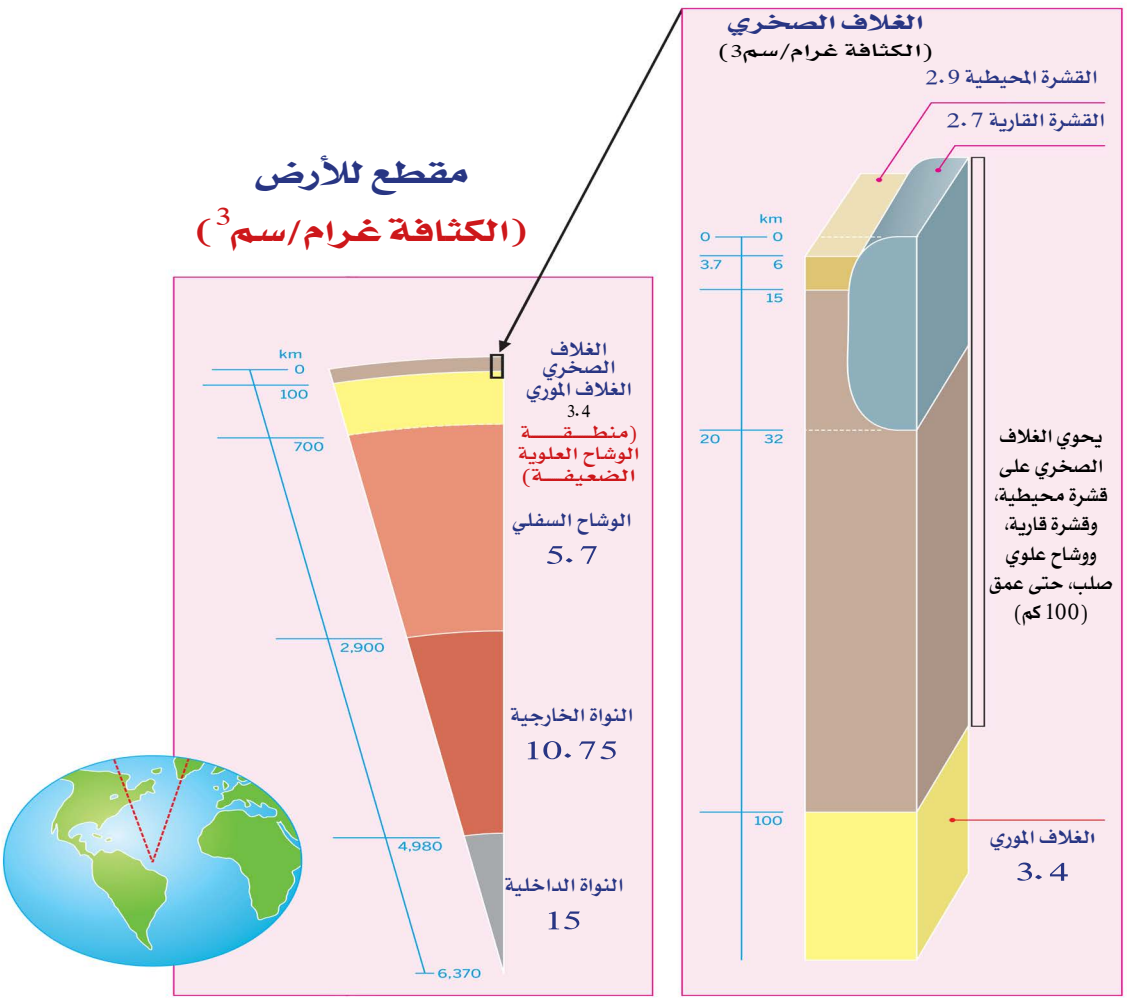
القشـــــــرة القـــــــارية Continental Crust

يستخدم مصطلح الغلاف الصخري (ليثوسفير) Lithosphere لوصف الجزء الخارجي الصلب من الأرض، الذي يتكون من القشرة القارية والقشرة المحيطية والجزء العلوي من الوشاح. لقد تسبب الانصهار الجزئي للمواد المتطايرة في النواة الخارجية والوشاح بإطلاق الغازات على السطح أثناء تكوين الكوكب. وقد أدى هذا إلى تكوين القشرة الأولى، الذي أدى –من خلال عملية إعادة التدوير– إلى إعادة تكوين قشرة أكثر سمكاً اليوم.

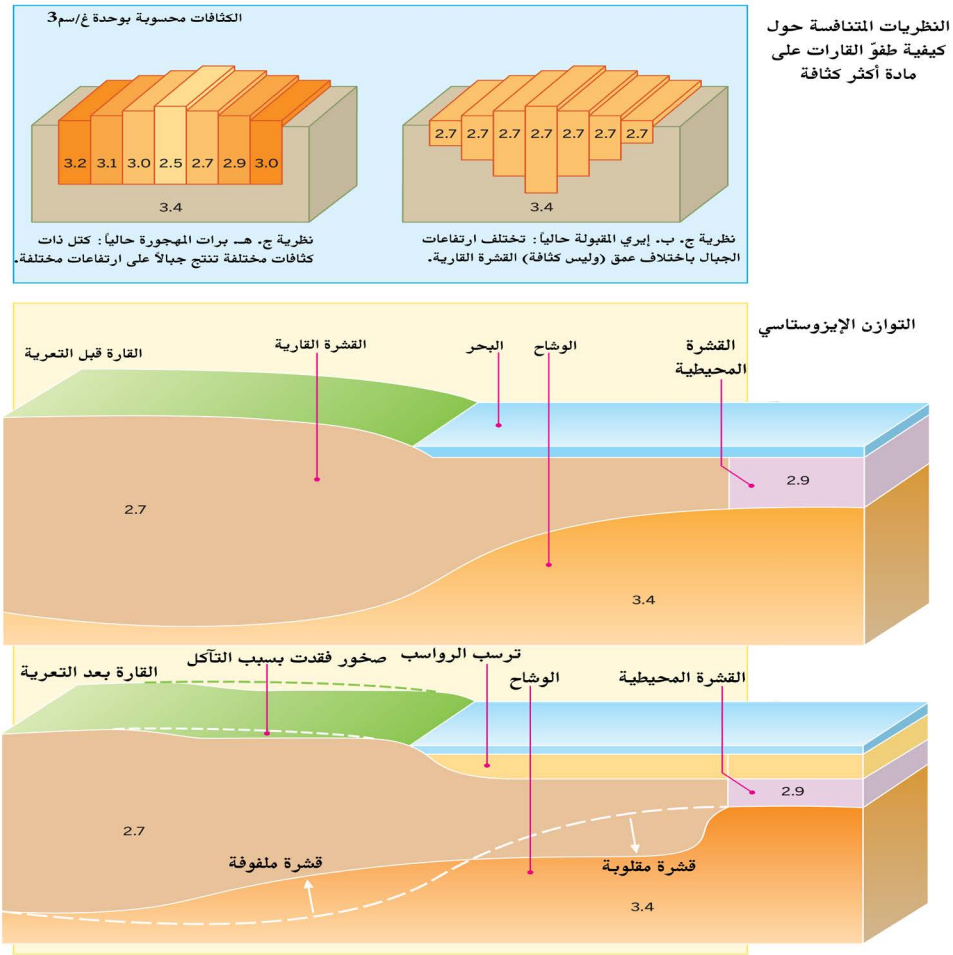
ومقارنةً مع طبقـــــات الأرض الأخرى، فإنّ الغلاف الصخري عبارة عن قشرة صلبة وباردة نسبيّاً يبلغ متوسط سمكها نحـــــو (100 كم)، ولكن قد يكون سمكها نحو (250 كم) أو أكثر تحت الأجزاء القديمة من القارات. لكن قد يختلف سمك القشرة الأرضية من مكانٍ إلى آخر، حيث يبلغ سمكها أكثر من 60 كم في بعض

المناطق الجبلية وأقل من 5 كيلومترات تحت بعض أجزاء المحيطات. بالمقارنة مع الوشاح، تحوي القشرة على قدر أكبر من السيليكون والألمنيوم وكمية أقل من المغنيسيوم والحديد. تكون قشرة الأرض عموماً أقل كثافة من الوشاح تحتها.

يفصل بين قشرة الأرض والطبقات الداخلية طبقة تسمى انقطاع موهوروفيتش (أو موهو) Moho Discontinuity، وهي طبقة تنعكس وتنكسر عندها الموجات الزلزالية بسرعة أعلى، ربما نتيجة لتغير في تكوين الصخور الكثيفة للوشاح تحتها.



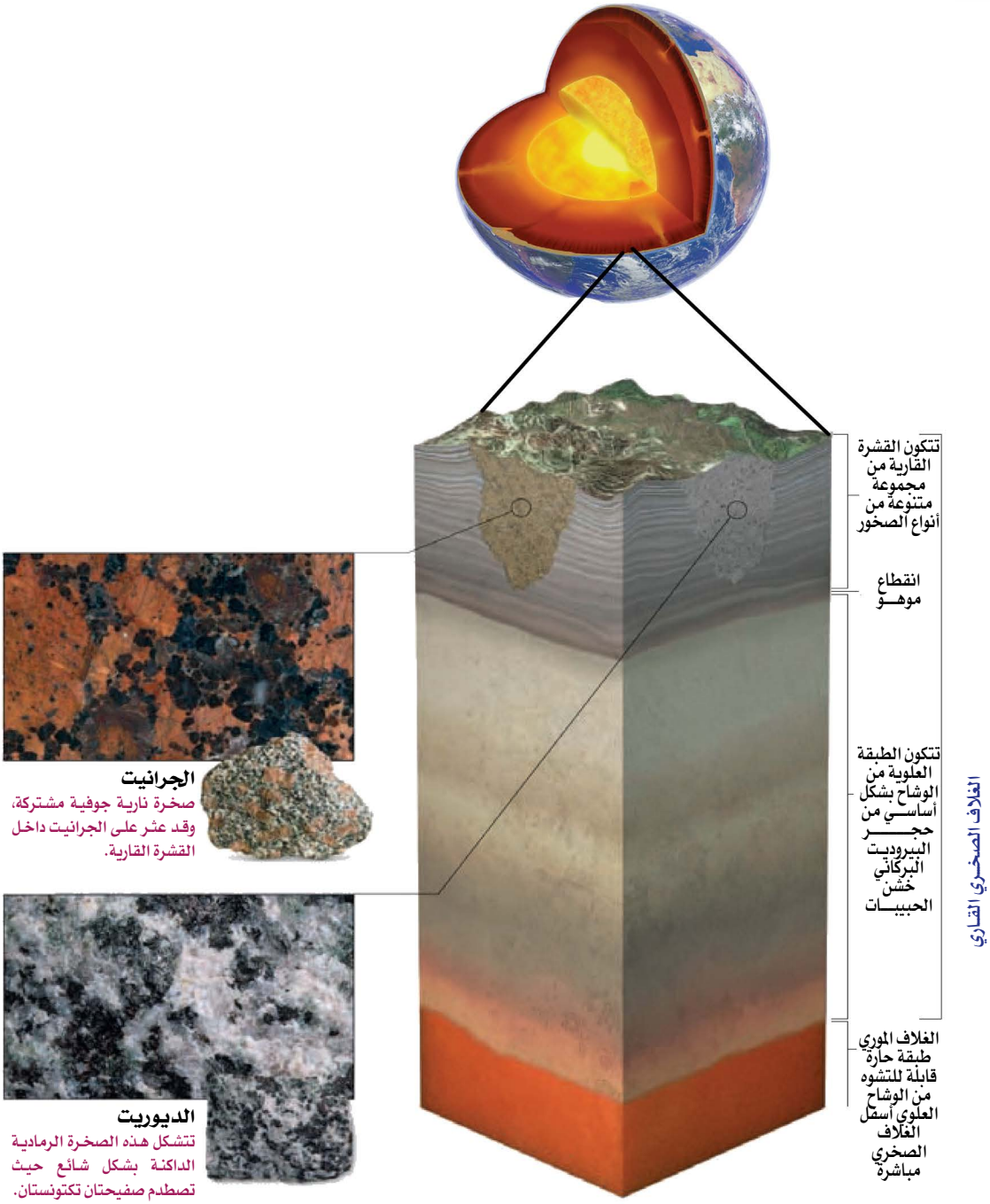
يصف مصطلح التوازن المتساوي السكون (الإيزوستاسي) Isostasy الاختلافات الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية بين الوشاح والقشرة التي تسمح للقشرة بأن (تطفو) على الوشاح الأكثر مرونة. ليست كل مناطق الأرض متوازنة بشكلٍ متساوي السكون. يعتمد التوازن المتساوي السكون على كثافة وسمك القشرة والقوى الديناميكية المؤثرة في الوشاح.

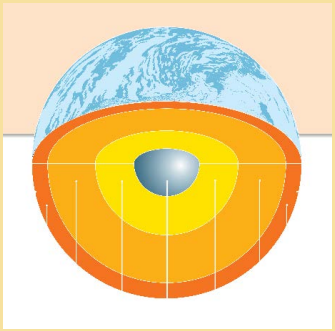


الإيزوستاسي هو حالة توازن القشرة الأرضية التي تطفو على المادة الأكثر كثافة في الوشاح. (الأرقام داخل الشكل تشير إلى الكثافة بوحدة غرام/ سم^3).

كما يختلف عمق القشرة، تختلف درجة حرارتها أيضاً. حيث تتحمل القشرة العلوية درجة الحرارة المحيطة للغلاف الجوي أو المحيط، فهي حارة في الصحاري القاحلة ومتجمدة في خنادق المحيط. بالقُرْب من انقطاع موهو، تتراوح درجة حرارة القشرة بين 200 درجة مئوية و 400 درجة مئوية.

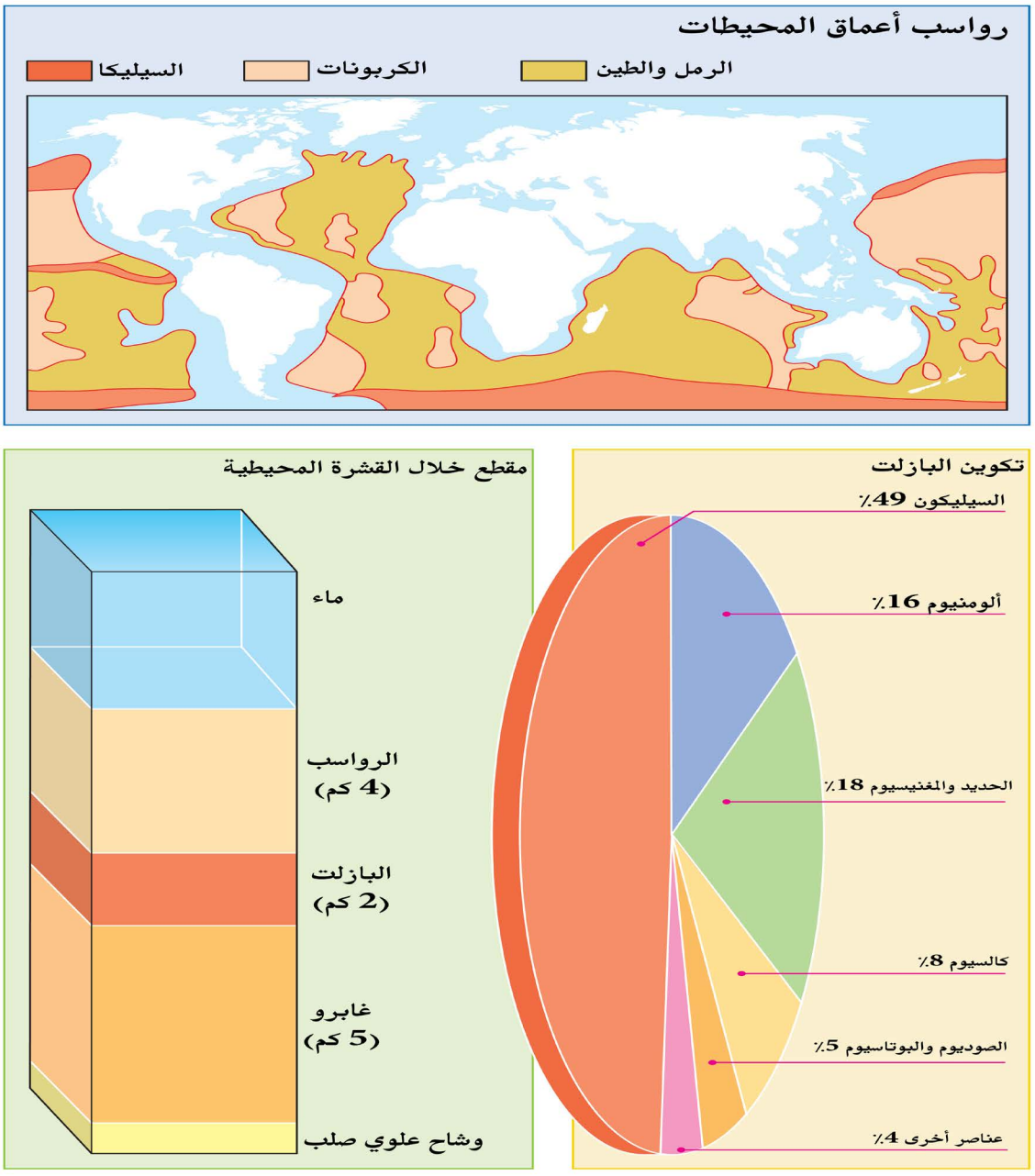
إنّ القشرة القارية أقدم بكثير من القشرة المحيطية، نظراً لأن القشرة القارية نادراً ما يجري تدميرها وإعادة تدويرها في منطقة الاندساس Subduction، كما أنّ بعض أجزاء القشرة القارية تكون قديمة قدم الأرض نفسها تقريباً. إذْ لا توجد قشرة محيطية يزيد عمرها على 200 مليون سنة، في حين أن بعض الصخور القارية عمرها أكثر من 4 بلايين سنة.


تتكون القشرة القارية من مجموعة متنوعة من أنواع الصخور
انقطاع موهو
تتكون الطبقة العلوية من الوشاح بشكل أساسي من حجر البيروديت البركاني خشن الحبيبات
الغلاف الموري طبقة حارة قابلة للتشوه من الوشاح العلوي أسفل الغلاف الصخري مباشرة
الغلاف الصخري القاري
الجرانيت
صخرة نارية جوفية مشتركة، وقد عثر على الجرانيت داخل القشرة القارية.
الديوريت
تتشكل هذه الصخرة الرمادية الداكنة بشكل شائع حيث تصطدم صفيحتان تكتونستان.

حقائق علمية مدهشة	قشـــــرة الأرض والأظـــافـــــر
	تتحرك قشرة الأرض بسرعة نمو أظافر يدك نفسها تقريباً، أي 3.47 ملليمتر كل شهر.

القشـــرة المحيطيـــة Oceanic Crust

تختلف القشرة القارية تماماً عن القشرة المحيطية التي تغلف المحيطات. حيث تتكون القشرة المحيطية في الغالب من سيليكات المغنيسيوم، بينما تحوي القارات على نسب أعلى من سيليكات الألومنيوم. كما أنها تحوي على كمية من الحديد أقل من النسب الأكثر كثافة من سيليكات الألومنيوم. كما أنها تحوي على كمية أقل من الحديد من المادة الأكثر كثافة في الوشاح أو قاع المحيط. ونتيجة لذلك، فإنها تطفو، وإن كان ذلك على الوشاح شبه الصلب، ويمكن أن تكون سميكة.



نسب مكونات القشرة المحيطية من المعادن والصخور.

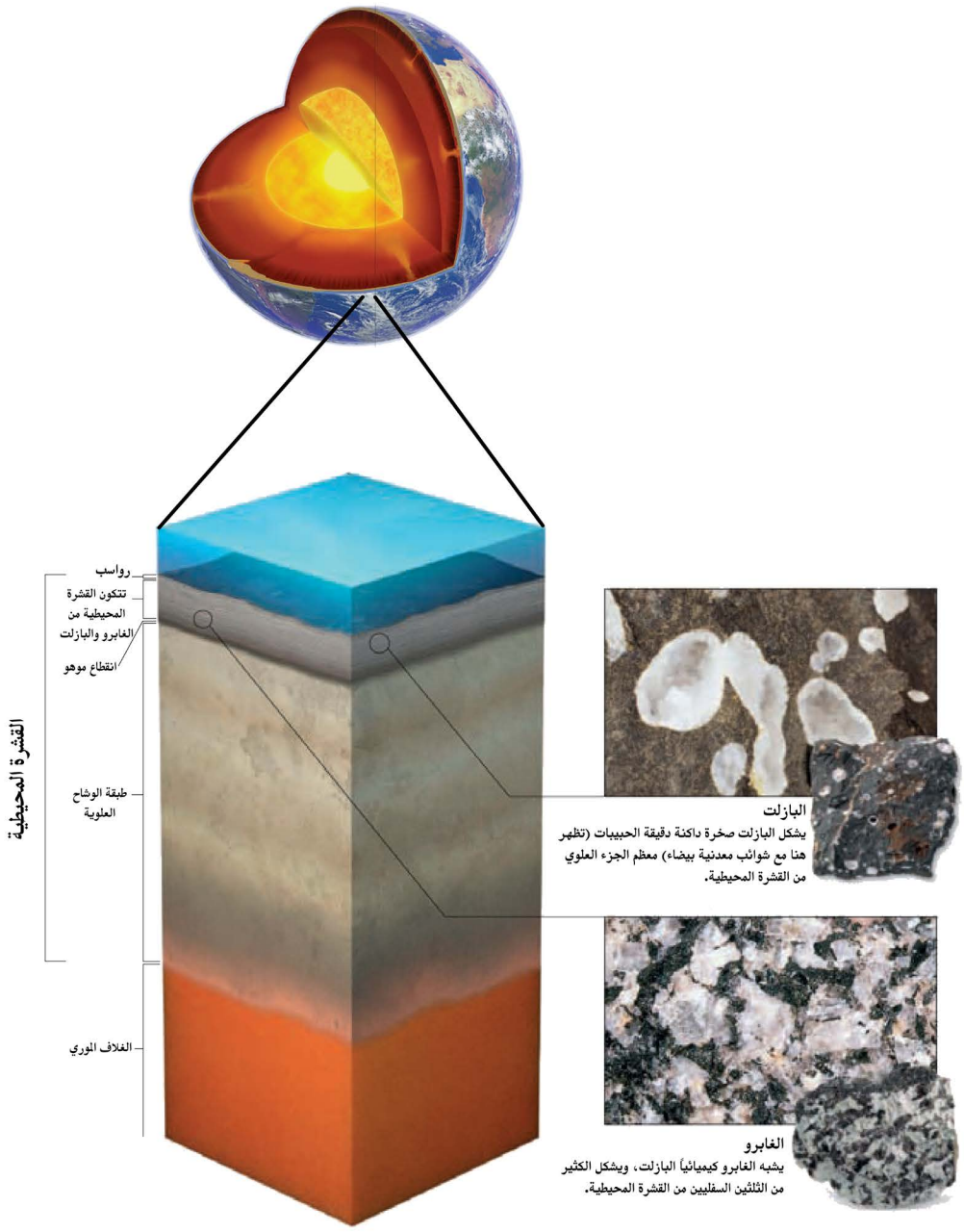
القشرة المحيطية متجانسة إلى حد ما بسمك 7 كيلومترات. لكن لا يزال مدى عمق جذور القارات مثيراً للجدل؛ إذْ يقول البعض إنّ سمكها يتراوح بين (6 و 11 كيلومتراً).

تتشكل القشرة المحيطية باستمرار عند تلال وسط المحيط، حيث تنفصل الصفائح التكتونية عن بعضها بعضاً. عندما تبرد الصهارة التي تخرج من هذه الصدوع في سطح الأرض، تصبح قشرة محيطية صغيرة. يزداد عمر وكثافة القشرة المحيطية مع زيادة المسافة من التلال وسط المحيط.

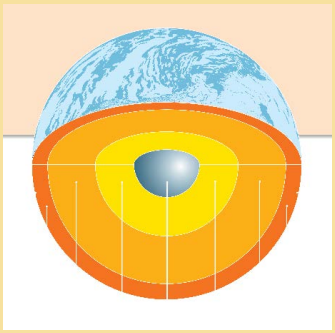
ومع تشكل القشرة المحيطية عند تلال وسط المحيط، يجري تدميرها في مناطق الاندساس: والاندساس هو العملية الجيولوجية المُهمَّة التي تذوب فيها الصفيحة التكتونية المصنوعة من مادة الغلاف الصخري الكثيفة، أو تسقط أسفل صفيحة مصنوعة من الغلاف الصخري الأقل كثافة عند حدود صفيحة متقاربة.

عند حدود الصفائح المتقاربة بين الغلاف الصخري القاري والمحيطي، فإن الغلاف الصخري المحيطي الكثيف (بما في ذلك القشرة) ينزل دائماً تحت القارات. في شمال غرب الولايات المتحدة، على سبيل المثال، تنحدر صفيحة خوان دي فوكا المحيطية أسفل صفيحة أمريكا الشمالية القارية. وعند الحدود المتقاربة بين صفيحتين تحملان الغلاف الصخري المحيطي، ينزلق الغلاف الأكثر كثافة (عادةً ما يكون حوض المحيط الأكبر والأعمق). ففي خندق اليابان، تنحدر صفيحة المحيط الهادئ الكثيفة تحت صفيحة أوخوتسك الأقل كثافة.

عندما ينغرس الغلاف الصخري، يغرق في الوشاح، ويصبح أكثر مرونة وقابلية للدك. من خلال الحمل الحراري في الوشاح، قد يحدث في نهاية المطاف (إعادة تدوير) للمعادن الغنية في الوشاح حيث تظهر على شكل حمم بركانية تصنع القشرة عند التلال والبراكين في منتصف المحيط


رواسب
تتكون القشرة المحيطية من الغابرو والبازلت
انقطاع موهو
القشرة المحيطية
طبقة الوشاح العلوية
الغلاف الموري
البازلت
يشكل البازلت صخرة داكنة دقيقة الحبيبات (تظهر هنا مع شوائب معدنية بيضاء) معظم الجزء العلوي من القشرة المحيطية.
الغابرو
يشبه الغابرو كيميائياً البازلت، ويشكل الكثير من الثلثين السفليين من القشرة المحيطية.

يجمع الجيولوجيون عينات من قشرة المحيطات من خلال الحفر في قاع المحيط، باستخدام الغواصات، ودراسة الأفيوليتات Ophiolites التي هي أجزاء من القشرة المحيطية جرى دفعها فوق مستوى سطح البحر من خلال النشاط التكتوني، والتي تظهر أحياناً على شكل سدود في القشرة القارية. غالباً ما يكون وصول العلماء إلى الأفيوليتات أكثر سهولة من القشرة المحيطية في قاع المحيط.

حقائق علمية مدهشة	قشـــــرة متجـــــددة
	تنشأ 10 كيلومترات مكعبة جديدة من القشرة المحيطية في مرتفعات منتصف المحيط كل عام.

الـــوشـــــاح Mantle

يمثل الوشاح الجزء الأكثر صلابة من باطن الأرض. لكن هذا الوشاح الأرضي يقع بين نواة الأرض (اللب) شديدة الحرارة والقشرة الأرضية. يبلغ سمك الوشاح نحو 2900 كيلومتر، ويشكل 84 % من الحجم الإجمالي للأرض، فهو أكبر طبقة تقع مباشرة فوق النواة الخارجية. يتكون الوشاح في الغالب من عناصر السيليكون والأكسجين والمغنيسيوم والحديد. وغالباً ما يقسّم الوشاح إلى جزء علوي وجزء سفلي بناءً على سرعة الموجة الزلزالية المتغيرة. ينقسم الوشاح إلى عدة طبقات: الوشاح العلوي، ومنطقة الانتقال، والوشاح السفلي، وأخيراً المنطقة (D")، وهي المنطقة الغريبة التي يلتقي فيها الوشاح السفلي بالنواة الخارجية. سنتعرف فيما يأتي وبشكلٍ مفصل على هذه الطبقات.

الوشـــــاح العلـــــوي

يمتد الوشاح العلوي من الحد السفلي للقشرة الأرضية إلى عمق نحو 410 كيلومترات. يكون الوشاح العلوي صلباً في الغالب، لكن مناطقه الأكثر مرونة تساهم في النشاط التكتوني ويدخل في نطاقه الغلاف الصلب والغلاف الوهن.

الغـــــلاف المـــوري (الغـــلاف الوهـــن) Asthenosphere

اشتق اسم الأستينوسفير من الكلمة اليونانية التي تعني ضعيفاً، الأستيس، بسبب الطبيعة الهشة نسبياً للمواد التي صنع منها. تم تسميته لأول مرة في عام 1914 من قبل الجيولوجي البريطاني جيه باريل، الذي قسم الهيكل العام للأرض إلى ثلاثة أقسام رئيسة: الغلاف الصخري، أو الطبقة الخارجية من مادة تشبه الصخور؛ الأستينوسفير والكرة المركزية، أو الجزء المركزي من الكوكب.

يُعتقد أن الجزء العلوي من الغلاف الموري هو المنطقة التي تتحرك عليها ألواح الغلاف الصخري الصلبة والهشَّة من قشرة الأرض. يقع الغلاف الموري بشكل عام بين 72–250 كم تحت سطح الأرض، على الرغم من أنه عادة ما يكون أقرب بكثير من السطح تحت المحيطات، وفي وسط المحيط ترتفع التلال إلى مسافة أميال قليلة من قاع المحيط

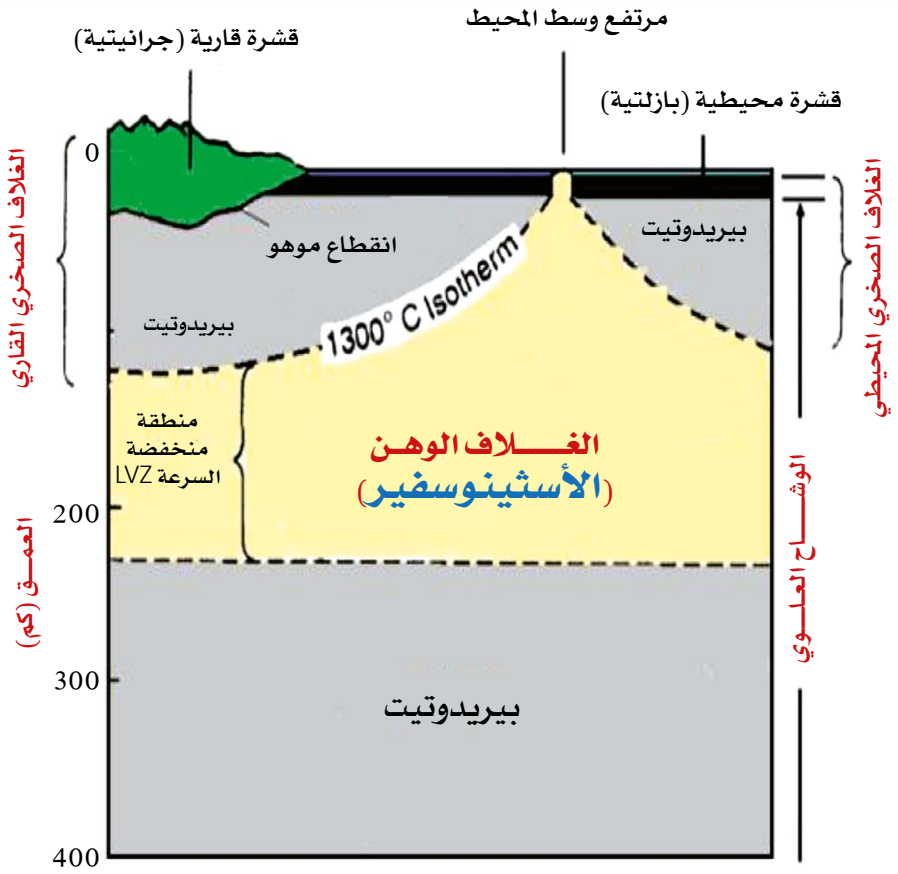
يشير مصطلح الغلاف الوهن إلى طبقة شبه سائلة تحت الغلاف الصخري (داخل الوشاح العلوي)، وتقع تحت الغلاف الصخري الخارجي الصلب (القشرة المحيطية والقارية) التي تشكل جزءاً من الوشاح. مع صلابة الغلاف الموري، إلا أنه شديد الحرارة ويُعتقد أنه قادر على التدفق عموديّاً وأفقيّاً، مما يتيح لأجزاء من الغلاف الصخري الخضوع للحركات المرتبطة بالصفائح التكتونية.

يستخدم الجيولوجيون مصطلح (اللدونة) Plastics لوصف كيف يمكن للمواد الصلبة الساخنة، بما في ذلك الصخور، أن تتشوه وتتدفق ببطء بدلاً من أن تتكسر تحت الضغط. يكاد يكون الغلاف الوهن (الموري) صلباً، على الرغم من أن بعض مناطقه يمكن أن تكون منصهرة (على سبيل المثال، أسفل تلال منتصف المحيط). لم يتم تحديد الحد السفلي من الغلاف الموري بشكل جيد. يعتمد سمك الغلاف الموري بشكل أساسي على درجة الحرارة. في بعض المناطق، يمكن أن يمتد الغلاف الموري إلى عمق 700 كيلومتر.

الغلاف الصخري (الليثوسفير) Lithosphere

الغلاف الصخري (الليثوسفير) يمثل الطبقة الخارجية الصلبة لمعظم الأرض و هو غلاف صلب وبارد نسبياً و يتكون من القشرة والأعلى من 80 إلى 100 كيلومتر من الوشاح و يبلغ سمكه حوالي 200 كيلومتر (تحت القشرة القارية) ويتكسر في الصفائح التكتونية. الغلاف الليثوسفير هو (صفيحة) نظرية الصفائح التكتونية. تتميز قاعدة الليثوسفير بمنطقة زلزالية (منخفضة السرعة) حيث تتباطأ الموجات الزلزالية عند دخولها الغلاف الأستينوسفير البلاستيكي الدافئ.

يُعد Asthenosphere (الغلاف الوهن) جزءاً من الوشاح الذي يتدفق، وهي خاصية تسمى السلوك البلاستيكي. قد يبدو غريباً أن مادة صلبة يمكن أن تتدفق. يعد تدفق الغلاف الأستثيني جزءاً من الحمل الحراري في الوشاح، الذي يلعب دوراً مُهمّاً في تحريك ألواح الغلاف الصخري. غلاف Asthenosphere هو الجزء البلاستيكي الدافئ نسبياً (ربما المنصهر جزئيّاً) من الوشاح العلوي الذي يمتد من عمق 10 كم (في حواف منتصف المحيط) إلى 700 كم تقريباً.



الحد الفاصل بين الغلافين الصخري والوهن LAB

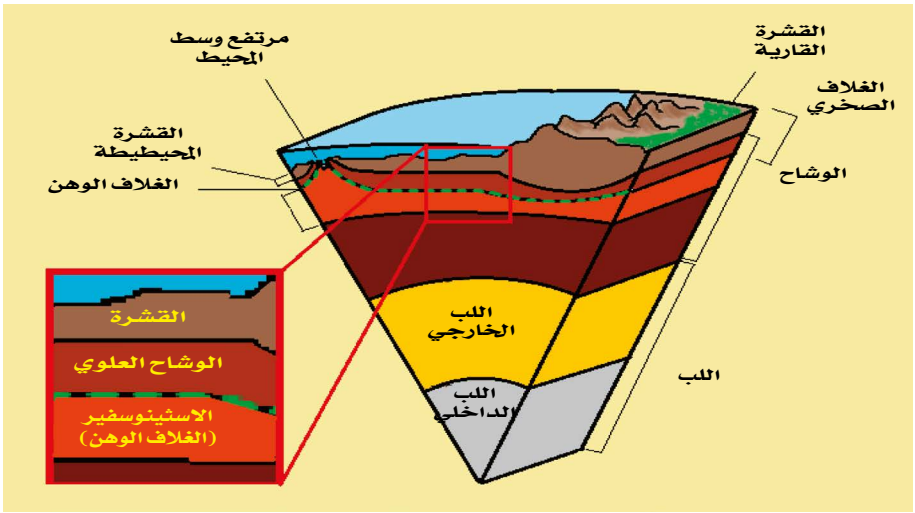
يشار عادة إلى حدود الغلافين الصخري والوهن باسم LAB. على الرغم من الاشتباه في وجودها في وقت مبكر من عام 1926، تم تأكيد حدوث المنطقة البلاستيكية في جميع أنحاء العالم من خلال تحليلات موجات الزلزال من زلزال تشيلي في 22 مايو 1960. الموجات الزلزالية، التي تقل سرعتها مع نعومة الوسط، مرت ببطء نسبيًا على الرغم من الغلاف الموري، وبالتالي تم تسميتها منطقة السرعة المنخفضة LVZ، أو دليل الموجات الزلزالية. قد تكون زلازل

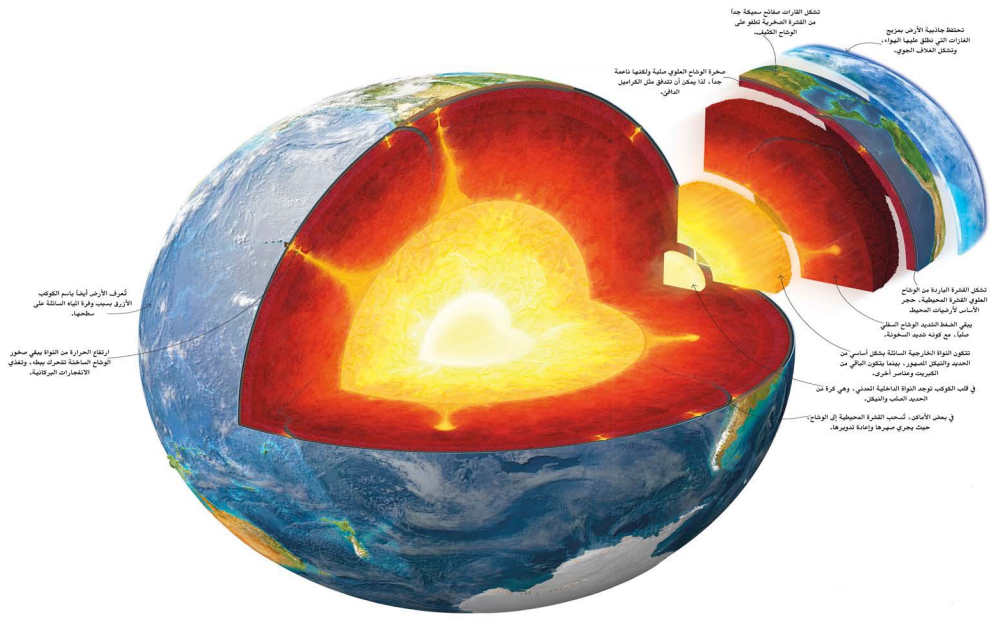
المنطقة العميقة، أي تلك التي تحدث في الغلاف الموري أو تحته، ناتجة عن غرق الصفائح القشرية في الوشاح على طول حدود القشرة الأرضية المتقاربة.

LAB هو الطبقة الحدودية الميكانيكية التي تفصل الغلاف الخارجي الصلب للأرض عن الوشاح المشوه بشكل لزج، وبالتالي يتم تحديده من خلال الزيادة المفاجئة في معدل الإجهاد. أنه طبقة انتقالية في قاعدة طبقة الحدود الحرارية التي تفصل الغطاء الموصل أعلاه عن عباءة الحمل الحراري أدناه حيث تكون درجة الحرارة ثابتة. يحدد علماء الزلازل LAB من خلال وجود منطقة سرعة منخفضة للموجة S أسفل غطاء السرعة العالية. علاوة على ذلك، تم العثور على تغيير في تباين الخواص الزلزالية في الوشاح العلوي لتقليد LAB. نظراً لأن الغلاف الصخري الصلب يجب أن يكون مقاوماً كهربائيّاً بينما يجب أن يكون الغلاف الموري اللزج موصلاً، فإن الحد الفاصل بين طبقة المقاومة العالية فوق طبقة الميزوسفير ذات المقاومة المنخفضة يتم تفسيرها على أنها LAB. غالباً ما يُنظر إليه على أنه انقطاع بنيوي من الدرجة الأولى يسمح بالحركة التفاضلية بين الصفائح التكتونية والغطاء السفلي.

يعد رسم خرائط عمق حدود الغلاف الصخري والأستينوسفير LAB أمراً مُهمّاً، نظراً لأنه يمثل قيداً أساسيّاً في نماذج تكوين وتطور المناطق المحيطية والقريبة. تعتمد النماذج التفصيلية للحمل الحراري في الوشاح على المعرفة الدقيقة لتغيرات العمق في حدود الغلاف الجوي والأستينوسفير. في المناطق المحيطية، غالباً ما يتم تفسير الاختلافات الكبيرة في تدفق الحرارة وقياس الأعماق على أنها مؤشر على الزيادة المنهجية في عمق حدود الغلاف الصخري

والغلاف الموري مع المسافة من مراكز الانتشار. في المناطق القارية، يبدو أن جذور الغلاف الصخري السميكة تظهر اختلافات كبيرة في السماكة، ومن المرجح أن تمثل المناطق التي توجد بها الصفائح بقوة. مقترناً بتدفق الوشاح.



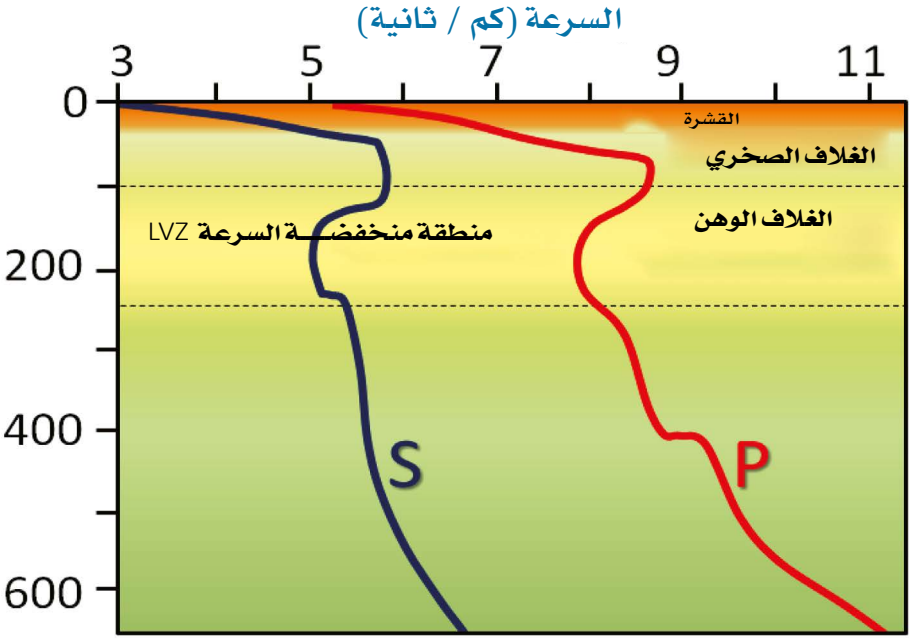


منطقة السرعة المنخفضة (LVZ)

المنطقة الواقعة داخل الوشاح العلوي تحت المحيطات التي يتم فيها إبطاء الموجات الزلزالية P وتباطؤ الموجات S وامتصاصها جزئيّاً. يبلغ عمق الجزء العلوي من المنطقة حوالي 40–60 كم بالقُرب من التلال المحيطية الممتدة، ويزداد هذا العمق إلى 120–160 كم تحت القشرة المحيطية الأقدم. الجزء السفلي من المنطقة غير محدد بشكل جيد، ولكن في منطقة يتراوح عمقها بين 250 و 300 كيلومتر. تحت القارات، توجد منطقة منخفضة السرعة مقيدة تحت مناطق القشرة المعرضة للتكوين خلال الـ 600 مليون سنة الماضية أو نحو ذلك، ولكن لا توجد تحت مناطق Cratonic. يُعزى إلى وجود طور سائل بنسبة 0.1 % ويُعزى عادةً إلى الذوبان الجزئي لصخور الوشاح في هذه الأعماق. غالباً ما يُعتبر متزامناً مع الغلاف الموري (الوهن)، ولكن من المحتمل أن يكون هذا صالحاً فقط للمناطق المحيطية.

تتميز منطقة السرعة المنخفضة بسرعات زلزالية منخفضة وتوهين زلزالي عالي وموصلية كهربائية عالية. تكون التأثيرات الزلزالية أكثر وضوحاً بالنسبة للموجات S مقارنة بالموجات P. يمكن أن تنشأ السرعات الزلزالية المنخفضة من عدد من الآليات المختلفة، بما في ذلك درجة حرارة عالية بشكل غير طبيعي، وتغير في الطور، وتغير تركيبي، ووجود تشققات أو شقوق مفتوحة، وذوبان جزئي. ومن المقبول عموماً أن السرعات الزلزالية المنخفضة تنشأ بسبب وجود مادة منصهرة. من المحتمل أن يحدث الذوبان في هذه المنطقة مدعوم بحقيقة أنه في هذا المستوى تقترب مادة الوشاح من نقطة انصهارها.

تعتبر منطقة السرعة المنخفضة للوشاح ذات أهمية كبيرة لتكتونية الصفائح؛ لأنها تمثل طبقة منخفضة اللزوجة يمكن على طولها استيعاب الحركات النسبية للغلاف الصخري والغلاف الموري.



المنطقة الانتقالية Transition Zone

من نحو 410 كيلومترات إلى 660 كيلومتراً تحت سطح الأرض، تخضع الصخور لتحولات جذرية، هذه هي المنطقة الانتقالية Transition Zone للوشاح. في المنطقة الانتقالية، لا تذوب الصخور ولا تتفكك، وإنما يتغير هيكلها البلَّوري بطرائق مهمة. تصبح الصخور أكثر كثافة بكثير. تمنع منطقة الانتقال التبادلات الكبيرة للمواد بين الوشاح العلوي والسفلي. يعتقد بعض الجيولوجيين أن الكثافة المتزايدة للصخور في المنطقة الانتقالية تمنع الصفائح المنحدرة من الغلاف

الصخري من السقوط أكثر في الوشاح. تتوقف هذه القطع الضخمة من الصفائح التكتونية في المنطقة الانتقالية لملايين السنين قبل أن تختلط مع صخور الوشاح الأخرى وتعود في النهاية إلى الوشاح العلوي كجزء من الغلاف الموري، وتندلع كحمم بركانية، وتصبح جزءاً من الغلاف الصخري، أو تظهر كقشرة محيطية جديدة في مواقع انتشار قاع البحر.

ومع ذلك، يعتقد بعض الجيولوجيين وعلماء الريولوجيا (علم جريان المواد غير العادية Rheologia) أن الصفائح المنقسمة يمكن أن تنزلق من تحت المنطقة الانتقالية إلى الوشاح السفلي. تشير أدلة أخرى إلى أن الطبقة الانتقالية قابلة للاختراق، وأن الوشاح العلوي والسفلي يتبادلان قدراً من المواد.

ربما يكون أهم جانب في المنطقة الانتقالية للوشاح هو وفرة المياه فيها. إذْ تحوي البلَّورات في المنطقة الانتقالية على قدر من الماء يعادل جميع المحيطات على سطح الأرض.

لكن الماء في المنطقة الانتقالية ليس (ماءً) كما نعرفه. إنه ليس سائلاً أو بخاراً أو صلباً أو حتى بلازما، وإنما يوجد على شكل هيدروكسيد متحد مع المواد. والهيدروكسيد هو أيون من الهيدروجين والأكسجين بشحنة سالبة. في منطقة الانتقال، تحتجز أيونات الهيدروكسيد في التركيب البلَّوري للصخور مثل الرينغووديت والوادسلايت. تتشكل هذه المعادن من الزبرجد الزيتوني عند درجات حرارة وضغط مرتفعين جداً.

بالقُرْب من الجزء السفلي من المنطقة الانتقالية، تؤدي زيادة درجة الحرارة والضغط إلى تحويل الرينغووديت والوادسلايت. تتكسر هياكلها البلَّورية ويتسرب الهيدروكسيد وكأنه (يذوب). تتدفق الجزيئات الذائبة لأعلى باتجاه المعادن التي

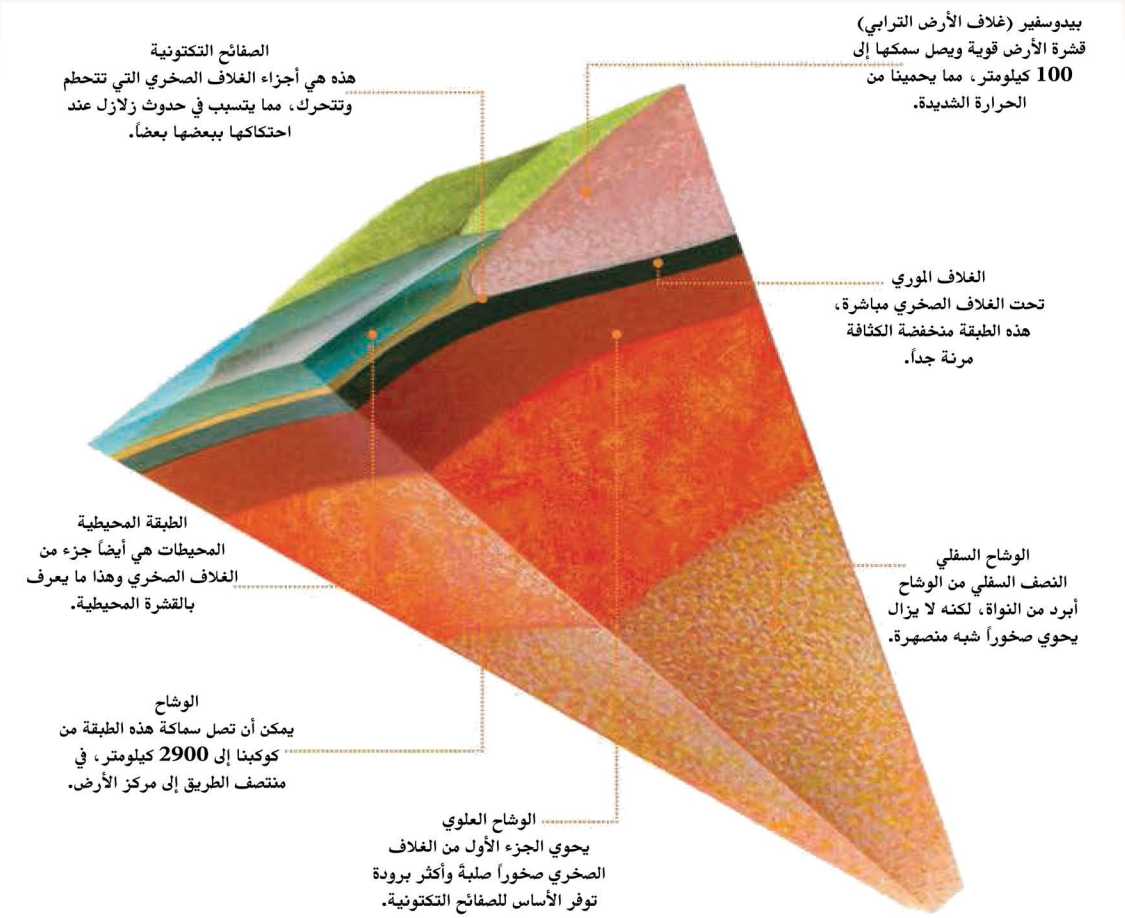
يمكنها الاحتفاظ بالمياه. هذا يسمح للمنطقة الانتقالية بالحفاظ على خزان ثابت للمياه.

يعتقد الجيولوجيون وعلماء الريولوجيا أن الماء دخل الوشاح من سطح الأرض في أثناء عملية الاندساس. إلى جانب الصخور والمعادن الموجودة في الغلاف الصخري، تُنقل أيضاً أطنان من الماء والكربون إلى الوشاح. يجري إرجاع الهيدروكسيد والماء إلى الوشاح العلوي والقشرة وحتى الغلاف الجوي من خلال الحمل الحراري في الوشاح والانفجارات البركانية وانتشار قاع البحر.

الوشـــــاح السفـــــلي Lower Mantle

يمتد الوشاح السفلي من نحو 660 كيلومتراً إلى نحو 2700 كيلومتر تحت سطح الأرض. الوشاح السفلي أكثر سخونة وكثافة من الوشاح العلوي والمنطقة الانتقالية، وهو أقل مرونة بكثير من الوشاح العلوي والمنطقة الانتقالية. مع أن الحرارة عادةً ما تتوافق مع تليين الصخور، إلا أن الضغط الشديد يحافظ على صلابة الوشاح السفلي.

لا يتفق الجيولوجيون على هيكل الوشاح السفلي. يعتقد بعض الجيولوجيين أن الصفائح المقوسة من الغلاف الصخري قد استقرت هناك؛ في حين يعتقد جيولوجيون آخرون أن الوشاح السفلي غير متحرك تماماً ولا ينقل الحرارة حتى بالحمل الحراري.

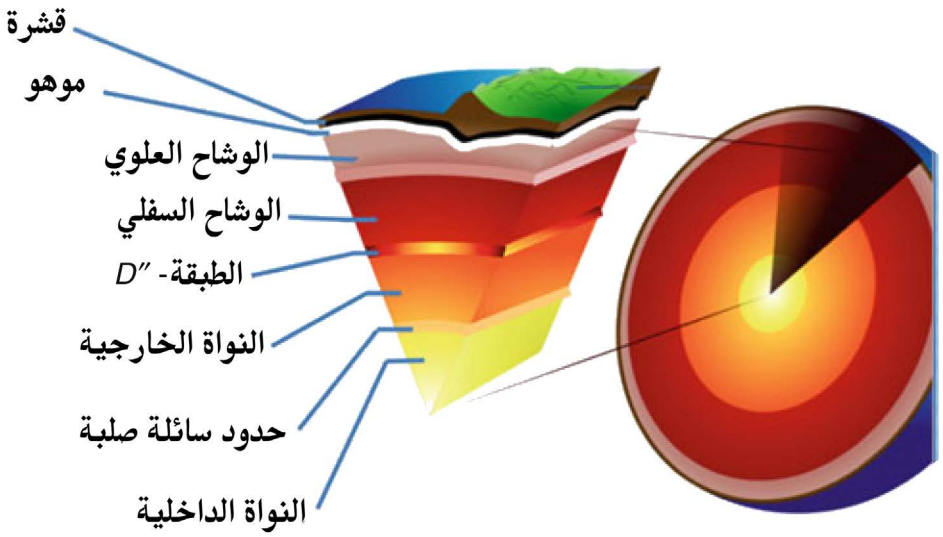


هكذا ستبدو الأرض إذا قمت بقطع مسافة 100 كيلومتر منها.

المنطقة (D″)

تحت الوشاح السفلي توجد منطقة ضحلة تسمى (D″) أو المزدوجة (Double Prime). في بعض المناطق، يكون (D″) حدّاً رقيقاً تقريباً مع اللب الخارجي. في مناطق أخرى، يحتوي (D″) على تراكمات كثيفة من الحديد والسيليكات. في مناطق أخرى، اكتشف الجيولوجيون وعلماء الزلازل مناطق ذوبان ضخمة.

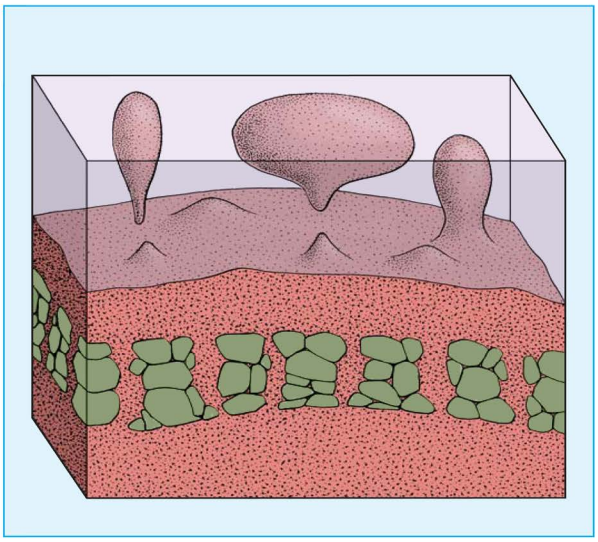
طبقة (D″) عبارة عن طبقة تبلغ سماكتها حوالي 200 كم في الجزء السفلي من الوشاح السفلي (على عمق حوالي2700–2900كم). لديها تدرجات سرعة منخفضة للموجة S وتشتت متزايد في أوقات السفر والسعات. من الناحية التركيبية، هناك مصدران لطبقة (D″) طبقة الأكسيد السفلي واللب الخارجي. أكاسيد من مرحلة تجربة الوشاح السفلي والتغيرات الفيزيائية داخل طبقة (D″).



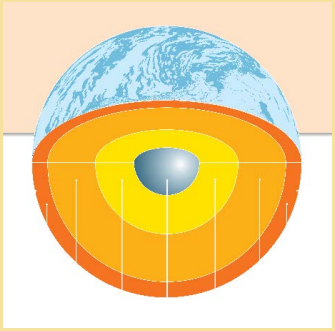
موقع الطبقة (D″) بين طبقات الأرض.

تتأثر الحركة غير المتوقعة للمواد في المنطقة (D″) بالوشاح السفلي والنواة الخارجية. يؤثر الحديد الموجود في النواة الخارجية على تكوين الانبثاقات الصهارية Plumes، وهي معالم جيولوجية تكون على شكل قبة تدفع المزيد من المواد السائلة إلى الصخور العلوية الهشة. ينبعث من الانبثاق الحديدي حرارة وقد يطلق نبضاً ضخماً منتفخاً من أي مادة أو طاقة، تماماً مثل مصباح الحمم البركانية. تزاد هذه الطاقة باتجاه الأعلى، ناقلة الحرارة إلى الوشاح السفلي والمنطقة الانتقالية، وربما تندلع كانبثاق صهاري للوشاح.

تتأثر الحركة غير المتوقعة للمواد في (D″) بالغطاء السفلي واللب الخارجي. يؤثر الحديد الموجود في اللب الخارجي على تكوين الحفاضات Diapir، وهي سمة جيولوجية على شكل قبة (التسلل البركاني) حيث يتم دفع المزيد من المواد السائلة إلى الصخور العلوية الهشَّة. ينبعث الحفاض الحديدي حرارة وقد يطلق نبضاً ضخماً منتفخاً من أي مادة أو طاقة - تماماً مثل مصباح الحمم البركانية. تزدهر هذه الطاقة لأعلى، ناقلة الحرارة إلى الوشاح السفلي والمنطقة الانتقالية، وربما تندلع كعمود وشاح.



يشبه مبدأ عمل مصابيح الحمم (إلى اليمين) الانبثاقات الصهارية التي تحدث في الوشاح. عند إيقاف تشغيلها، توجد طبقة من السائل الأحمر اللزج أسفل طبقة الزيت الشفاف. وعند تشغيل المصباح يقوم السلك الموجود في قاعدته بتسخين الكرة الحمراء بحيث تتمدد وتصير أقل كثافة وتبدأ في الارتفاع بشكل كتل ممطوطة إلى الجزء العلوي من الزيت. عندما تبرد الكرة الحمراء بدرجة كافية، فإنها تغوص للأسفل مرة أخرى.

حقائق علمية مدهشة	تفجيـــرات نوويـــة
	تسبب الانفجارات، مثل الزلازل، موجات زلزالية. قد تكون موجات الجسم من الانفجارات النووية القوية قد كشفت عن أدلة حول باطن الأرض، ولكن مثل هذه الدراسة الزلزالية محظورة كجزء من معاهدة الحظر الشامل للتجارب النووية.

عند قاعدة الوشاح، على بُعْد نحو 2900 كيلومتر تحت السطح، توجد حدود الوشاح الأساسي، أو CMB. هذه النقطة، التي تسمى انقطاع غوتنبرغ، تمثل نهاية الوشاح وبداية النواة الخارجية السائلة للأرض.

طرائـــق استكشـــاف الوشـــاح

لم يقم العلماء باستكشاف وشاح الأرض مباشرة. حتى معدات الحفر الأكثر تعقيداً لم تصل إلى ما بعد القشرة الأرضية. وإنما بدلاً من ذلك، يقوم العلماء بتخطيط المناطق الداخلية من خلال مشاهدة كيفية انحناء أو انعكاس أو تسريع أو تأخير الموجات الزلزالية الناتجة عن الزلازل بسبب الطبقات المختلفة، كما توجد عدة طرائق للكشف عن بنية الوشاح سنتعرف عليها فيما يأتي.

إيكـــو لتصـــويـر باطـــن الأرض

الأمـواج الزلزاليـة تنتقـل بـين طبقـات الأرض وتكشـف عـن المناطـق السـائلة والصلبـة ويقـوم العلمـاء بالتقـاط الانعكاسـات ومعالجتهـا حاسـوبيّاً وإظهارهـا بشـكل صـور ملونـة تبـين لهـم أدق التفاصيـل. فعليّـاً كيـف يمكـن للأمـواج الزلزاليـة أن تخبرنا عن بنية الأرض؟

تخيّـل شـكل موجـة، ربمـا تفكـر في موجـة مائيـة سـطحية، مثـل الموجـة التـي تراهـا علـى سـطح البحـر. لكـن العديـد مـن الموجـات – مثـل الصـوت، علـى سـبيل المثـال – تنتقـــل عبـر المـــادة. مـع أن الموجـات الزلزاليـــة التـي تسـبب ضـرراً عنـد حـدوث الزلـــزال هـي تلـك التـي تنتقـل علـى السـطح، إلا أن هنـاك نوعين من (موجات الجسم Body waves) التي تتحرك عبر الأرض:

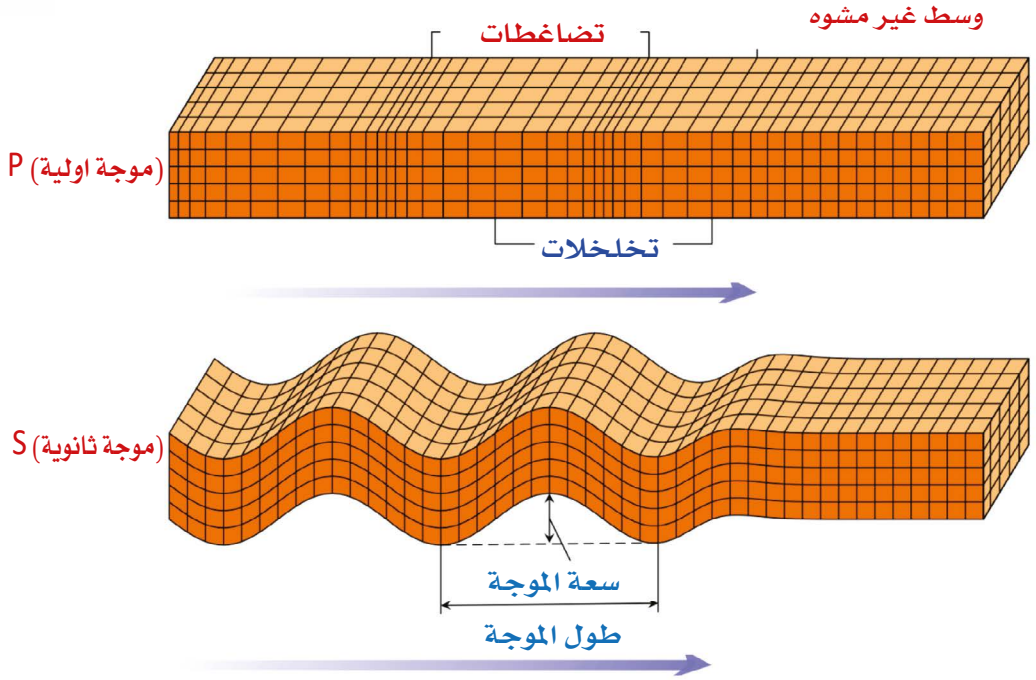
- النـوع الأول هـو الموجـات P (P تعنـي أوليـة Primary) وهـي موجـات طوليـة، تمامـاً مثـل موجـات الصـوت. وتهتـز في اتجـاه الحركـة، ممـا يتسـبب في سـحق الأرض وتوسـعها أثنـاء مرورهـا بهـا. وتنتقـل الموجـات P بسـرعة نحـو 5 كيلومتـرات في الثانيـة في صخـرة مثـل الغرانيـت، ومـا يصـل إلـى 14 كيلومتـراً في الثانيـة في أكثـر أجزاء الوشاح كثافة.

- النـوع الثانـي هـو الموجـات S (S تعنـي ثانويـة Secondary)، هـي موجـات عرضيـة أبطـأ مـن الموجـات الأوليـة، تتحـرك مـن جانـب إلـى آخـر. وعلـى عكـس الموجـات P، فإنهـا لا تسـتطيع السـفر عبـر الجسـم السـائل، ولهـذا السـبب أثبـت هـذان النوعان من الموجات أنهما ضروريان في مساعدتنا على فهم باطن الأرض.

ولكن كيف تتحرك الموجتان P و S؟

ذكرنا أن الموجات P الأولية (الانضغاطية) هي أسرع الموجات الناتجة عن الزلزال. ترتحل عبر باطن الأرض ويمكنها المرور عبر كل من الصخور الصلبة والمصهورة. إنها تهز الأرض ذهاباً وإياباً – مثل نابض سلينكي Slinky – في اتجاه سفرها، لكنها تتسبب في أضرار طفيفة لأنها تحرّك المباني فقط للأعلى وللأسفل.

أما موجات S (القص) الثانوية فهي تتأخر عن الموجات P لأنها تسافر أبطأ 1.7 مرة ويمكن أن تمر فقط عبر الصخور الصلبة. ومع ذلك فهي تسبب المزيد من الضرر لأنها أكبر وتهز الأرض عمودياً وأفقياً.



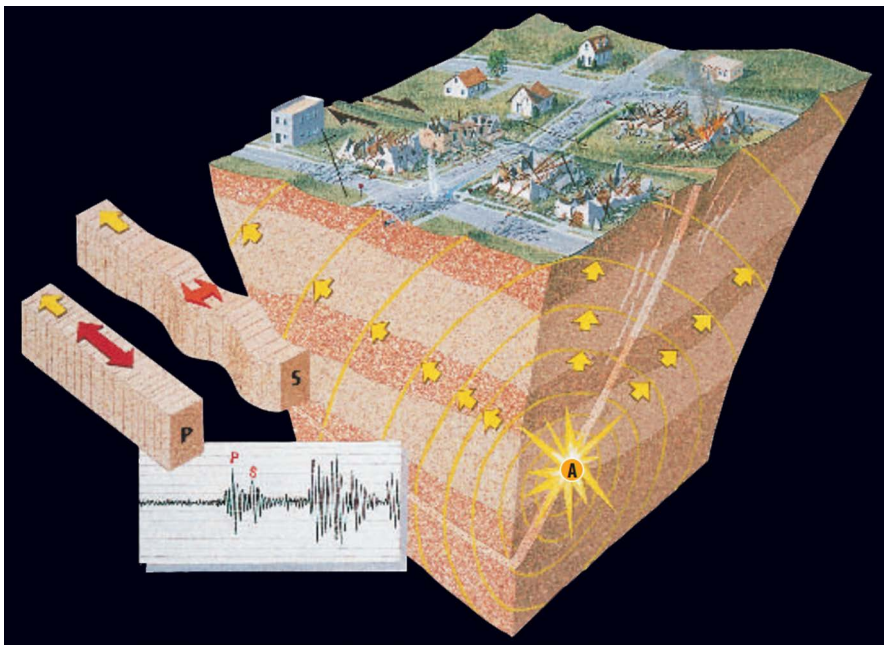
ميكانيكية انتشار الموجات P (الانضغاطية) الأولية الموجات S (القص) الثانوية.

الآن تخيل وقوع زلزال هائل، تبدأ الأمواج بالتحرك عبر الأرض، حيث تنطلق الموجات P إلى الأمام، بينما تتبعها موجات S في الخلف بنحو نصف السرعة.

ولكن عندما تمر الموجات عبر النواة لتصل إلى محطة قياس بعيدة، يوجد ما يسمى بمنطقة الظل. تسافر نحو 104 درجات حول محيط الأرض من مركز الزلزال وتختفي. ولكن ابتداءً من 140 درجة فصاعداً، تعود الموجات P إلى الظهور دون وجود موجات S مصاحبة.

تغير الموجات الزلزالية سرعتها أثناء مرورها عبر طبقات الأرض. تتسارع الموجات الزلزالية عندما تمر عبر قاع القشرة وتدخل الوشاح العلوي، تسمى هذه الحدود بين القشرة والوشاح العُليا بانقطاع موهو.

في وقت مبكرٍ من عام 1906، أدرك العالم ريتشارد أولدهام الآثار المترتبة على هذا الظل الغريب. لقد أدرك أنه يمكن تفسير سلوك الموجة P و S الملحوظ إذا اعتبرنا أن مركز الأرض سائل. في مثل هذه الحالة، تنكسر الموجات P بوساطة السائل، وتنحني كما يفعل الضوء عندما ينتقل من الماء إلى الهواء، تاركاً ظلاً مميزاً. على النقيض من ذلك، سيجري إيقاف الموجات S تماماً بوساطة النواة السائلة.



عندما تتحرك الصفائح التي تشكل الغلاف الصخري للأرض، يحدث ضغط كبير على الصخور. إنها تنحني، وتمتد، وتضغط. من حين إلى آخر، تتكسر الصخور، مما ينتج عنه زلازل تولد موجات زلزالية. كما هو موضح هنا، يتحرك نوعان مختلفان من الموجات الزلزالية هما P و S - لكل منها خصائص مميزة - إلى الخارج من بؤرة الزلزال (الموقع A في الشكل).

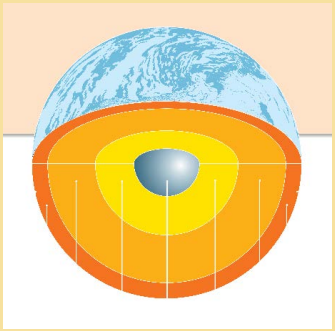
أدى اكتشاف أولدهام Oldham إلى إيجاد صورة مقبولة على نطاق واسع للنواة المنصهرة، ولكن بعد 30 عاماً، أدركت العالمة الدنماركية إنجي ليمان أن فكرة أولدهام كانت بسيطة جدّاً. إذ يجب أن ينتج عن انكسار الموجات P بوساطة السائل الكثيف الموجود في مركز الأرض ظلٌ كاملٌ.

في الواقع، أظهرت القياسات التي أجريت باستخدام مقاييس الزلازل الأكثر حساسية المتوفرة في زمن ليمان أن موجات P الخافتة لا تزال تصل إلى منطقة الظل. من خلال دراسة البيانات التي تمر عبر الكوكب من زلزال نيوزيلندا عام 1929، اقترحت ليمان أن هذه الموجات تنعكس على الحدود بين النواة الصلبة الداخلية والسائلة الخارجية.

جرى تأكيد نتائجها، التي نُشرت في عام 1936، بعد ذلك بعامين من قبل بينو غوتنبرغ وتشارلز ريختر، اللذين صاغا بدقة تأثيرات النواة الصلبة. وجاءت القياسات المباشرة لهذه الموجات الزلزالية المنعكسة أخيراً في عام 1970.

وبشكل مثير، كشفت القياسات المتتالية عن كتلة ضخمة من مادة حرارية كثيفة شديدة السخونة تقع في قاع الوشاح بالقُرْب من حدودها مع نواة الأرض المنصهرة. إحداهما تحت جنوب المحيط الهادئ والأخرى تحت أفريقيا. يبلغ طول كل منها آلاف كيلومتر، وفوق كل منها يبدو أن هناك كمية كبيرة من المواد الأكثر سخونة تتجه نحو السطح.

يمكن أن يفسر هذا سبب وجود قاع المحيط في منتصف جنوب المحيط الهادئ على ارتفاع 1000 متر فوق التضاريس المحيطية تحت سطح البحر، وهو أمر يصعب تفسيره عن طريق حركة الصفائح التكتونية. وإذا ذهبت إلى جنوب الكونغو على طول الطريق وصولاً إلى جنوب جنوب إفريقيا، بما في ذلك مدغشقر، فإن هذه المنطقة بأكملها مدعومة من هذا التيار الفائق.

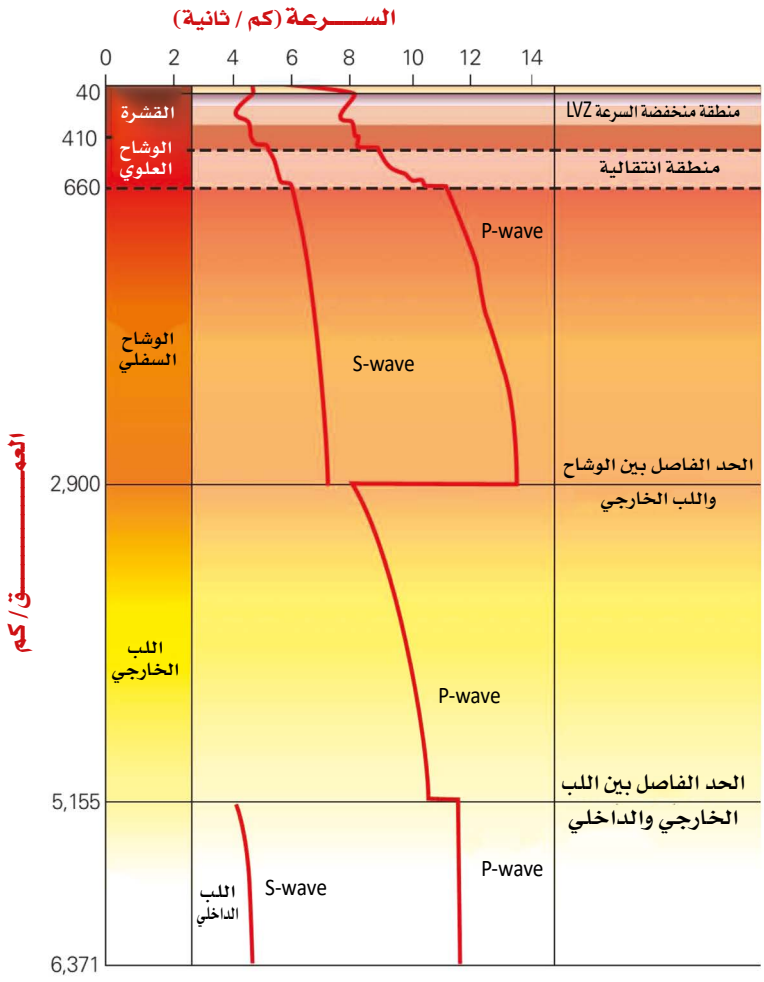
حقائق علمية مدهشة	عـــدد مـــزلـــزل
	حتى يتمكن علماء الجيولوجيا من رسم خرائط للوشاح المعقد فإنهم يحتاجون إلى وقوع 6000 زلزال بقوة 5.5 درجة على الأقل. لكن قد تكون خرائط الوشاح هذه قادرة على تحديد الصفائح القديمة من المواد المغمورة والموقع الدقيق وحركة الصفائح التكتونية.

العلاقـــــة بين ســـرعة الموجـــات والعمـــق

تم استخدام التصوير المقطعي باستخدام موجات S أو موجات P أو مزيج من الاثنين في السنوات الأخيرة لإنشاء صور رائعة للهيكل الداخلي. ما يتم تصويره هو تغيرات في السرعة الزلزالية ترتبط بتغيرات درجة حرارة الأرض. تعتبر سرعة انتشار الموجات S حسَّاسة جدّاً لدرجة الحرارة بشكل خاص حيث ترتبط المناطق الأسرع بمواد أكثر برودة وأكثر دفئاً بسرعات أبطأ. تم تحديد معدل تغير الموجات الزلزالية مع العمق في الأرض من خلال تحليل الإشارات الزلزالية لإظهار ما يلي:

- تكـــون السرعات في صخور الوشاح أكبر منها في القشرة.
- تـــزداد السرعات بشكل عام مع زيادة الضغط، وبالتالي مع العمق.
- تتباطأ السرعات في المنطقة بين عمق 100 كم و 250 كم (تسمى منطقة السرعة المنخفضة؛ أي ما يعادل الغلاف الموري).
- تـــزداد السرعات بشكل كبير عند عمق 660 كم (بسبب التحول المعدني).

- **تتباطأ السرعات** في المنطقة الواقعة فوق حد الوشاح الأساسي (الطبقة "D أو «منطقة السرعة المنخفضة جدّاً»).
- **لا تمر موجات** S عبر الجزء الخارجي من القلب.
- **تزداد سرعات** الموجة P بشكل كبير عند الحدود بين اللب الخارجي السائل واللب الداخلي الصلب.

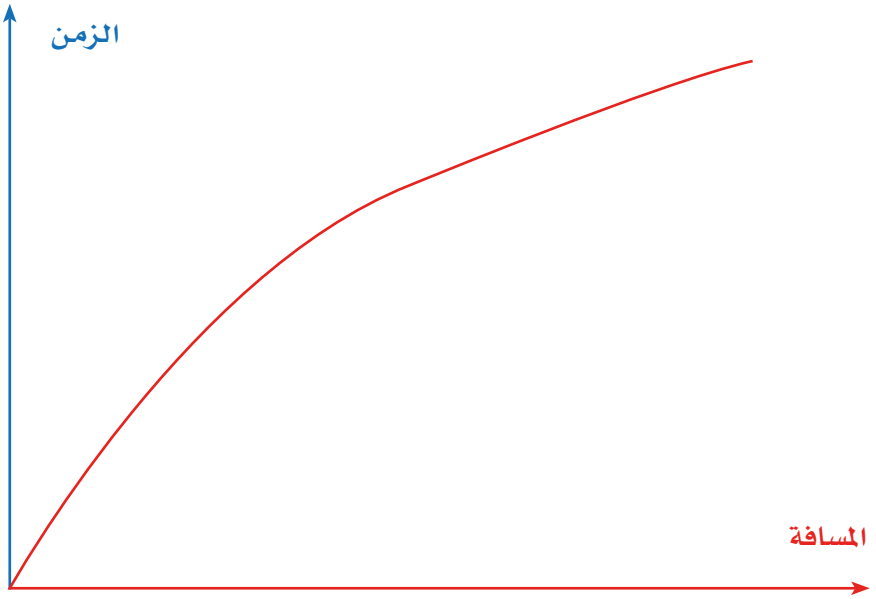


تغير السرعة السيزمية مع العمق من السطح إلى مركز الأرض

إن تقييد الخصائص الزلزالية للانقطاعين 410 و 660 كم اللتين تحددان منطقة انتقال الوشاح أمر بالغ الأهمية في فهم تكوين الوشاح وديناميكيات الحمل الحراري. تتمثل إحدى طرق دراسة المنطقة الانتقالية في استخدام وصول (ثلاثي) Triplicated للبيانات الزلزالية. التوزيعات المختلفة للسرعة مع العمق تنتج منحنيات وقت سفر مميزة. يوضح الشكل التالي الوضع المعتاد.

أولاً: تزداد السرعة ببطء مع العمق

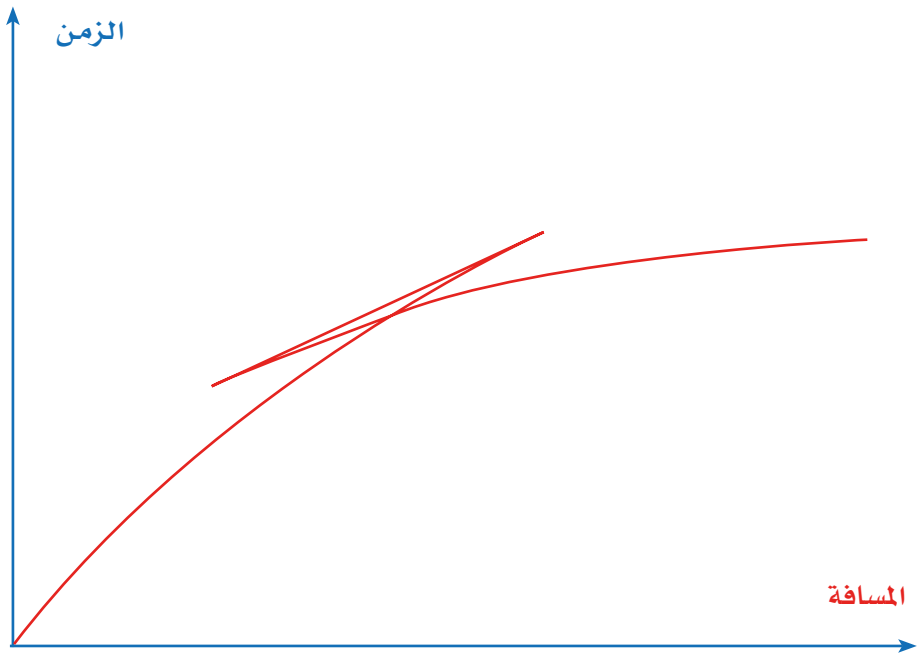
بالنظر إلى شعاعين، يكون للشعاع الذي له زاوية سقوط أصغر عند المصدر أصغر p، وبالتالي فإن القيعان أعمق عند نقطة ذات rp أصغر، ويخرج في النهاية أكثر من المصدر. وهكذا تقل معامل الشعاع، ويزيد وقت السفر، بشكل رتيب مع المسافة.



منحنى وقت السفر للسرعة يتباطأ مع العمق

ثانياً: تـــزداد السـرعة فجـــأة مع العمـــق

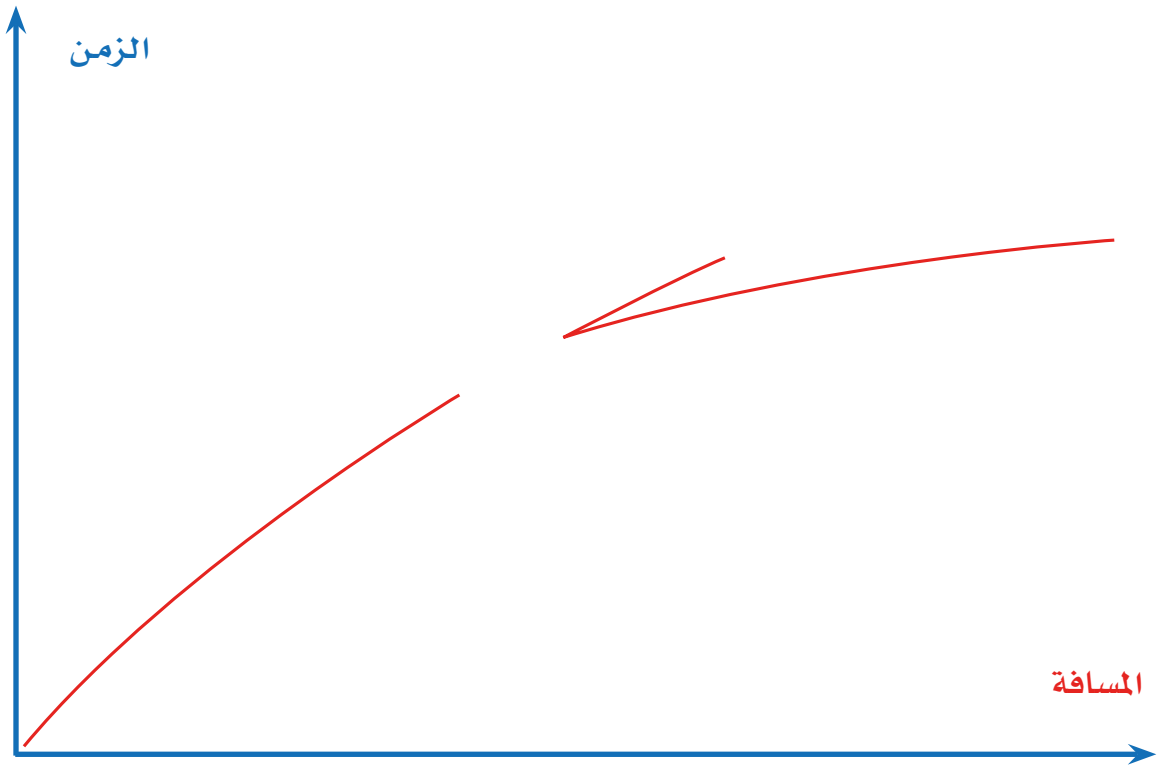
تتصـرف الأشـعة التـي تقـع أسـفل منطقـة التـدرج اللونـي للسـرعة العاليـة أو أسـفلها كمـا في الشـكل التالـي؛ لـذا فـإن الأجـزاء المقابلـة مـن وقـت السـفر ومنحنـى معامـل الشـعاع تظهـر زيـادة وقـت السـفر مـع زيـادة المسـافة. علـى النقيـض مـن ذلـك، تنحنـي الأشـعة التـي تقـع في القـاع في منطقـة الانحـدار عالـي السـرعة لأعلـى أكثـر، وتظهـر عنـد قيـم أصغـر للمسـافة التـي قـد تكـون كذلـك. نتيجـة لذلـك، تظهـر ثلاثـة أشـعة بمعامـلات شـعاع مختلفـة علـى نفـس المسـافة. نتيجـة لذلـك، تظهـر ثلاثـة أشـعة بمعامـلات شـعاع مختلفـة علـى نفـس المسـافة، ويكـون للمنحنـى ثلاثـة فـروع متميـزة، ممـا يعطـي ثلاثيـة مميـزة Triplication .



منحنى وقت السفر للسرعة يتزايد بسرعة فجائية

ثالثاً: تقـــل الســـرعة مع العمـــق

يطلق عليها منطقة السرعة المنخفضة، حيث تتناقص السرعة مع العمق ثم تزداد. تنحني الأشعة التي تدخل منطقة السرعة المنخفضة، بدلاً من أن تكون لأعلى، لذلك لا توجد أشعة أسفل هناك. يتسبب هذا الوضع في منطقة ظل Shadow Zone، وهي منطقة على سطح الأرض لا تصل إليها أشعة. أسفل منطقة السرعة المنخفضة مباشرةً، تصل الأشعة إلى مسافة معينة من خلال مسارين، مما يعطي قيمتين لوقت السفر لمسافة معينة.

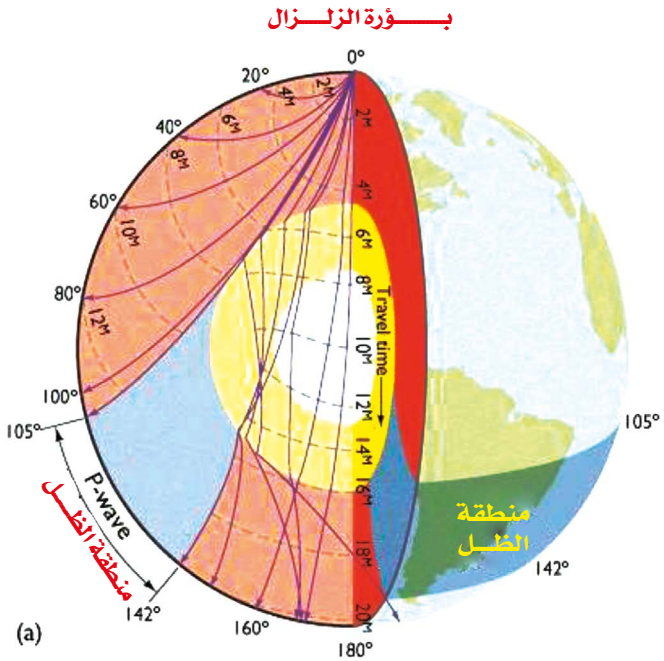


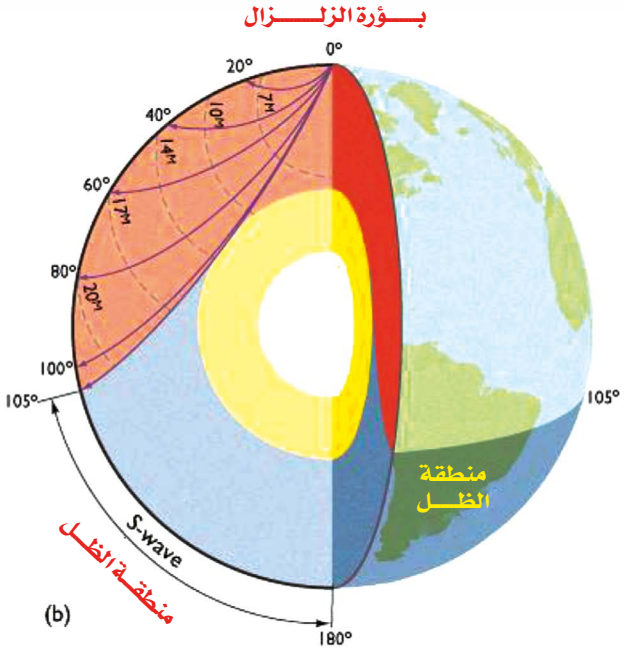
منحنى وقت السفر لمنطقة السرعة المنخفضة (منطقة الظل)

منطقـــــة الظـــــل Shadow Zone

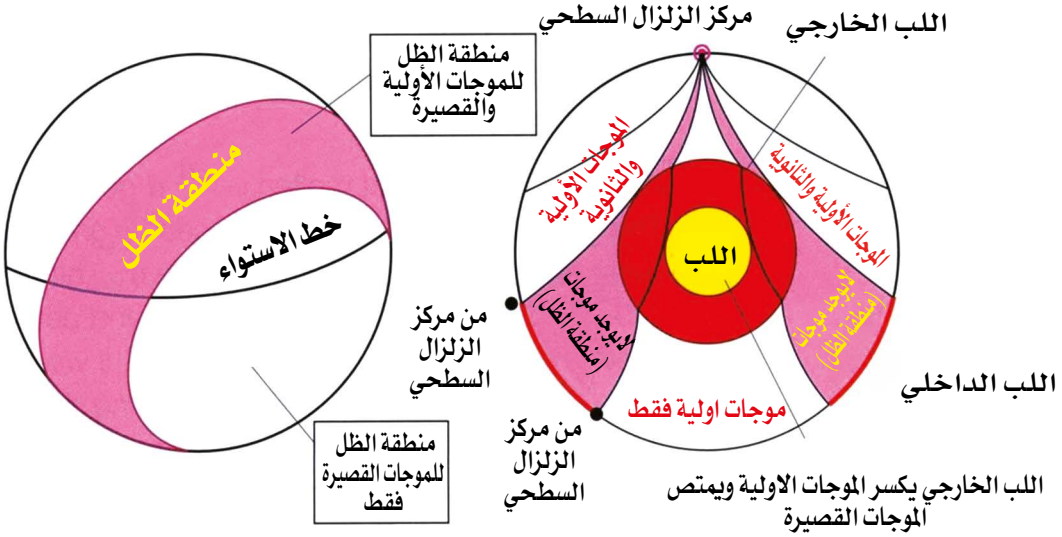
عندما يحدث زلزال، توجد منطقة على الجانب الآخر من الأرض حيث لا يتم قياس موجات S. تبدأ منطقة ظل الموجة S هذه بمقدار 103 درجة على جانبي الزلزال، لمسافة زاويّة إجمالية قدرها 154 درجة (الشكل 3.8، على اليسار). توجد أيضاً منطقة ظل موجة P على جانبي الزلزال، من 103 درجة إلى 150 درجة.

تحـدث منطقـة الظـل S-wave لأن موجـات S لا يمكنهـا الانتقـال عبـر اللـب الخارجـي السـائل. تحـدث منطقـة ظـل الموجـة P لأن السـرعات الزلزاليـة أقـل بكثيـر في اللـب الخارجـي السـائل منهـا في الوشـاح العلـوي، وتنكسـر الموجـات P بطريقـة تتـرك فجـوة. لا تخبرنـا مناطـق الظـل فقـط أن اللـب الخارجـي سـائل، كمـا أن حجم مناطق الظل يسمح لنا بحساب حجم اللب وموقع حدود اللب والوشاح.





أنماط انتشار الموجات الزلزالية عبر وشاح الأرض ولبها. لا تنتقل الموجات S عبر اللب الخارجي السائل، لذلك تترك ظلاً على الجانب البعيد من الأرض. تنتقل الموجات P عبر القلب، ولكن نظراً لانكسار الموجات التي تدخل اللب، توجد أيضاً مناطق ظل للموجة P.



الصخـــور الدخيلة (الزينوليثات) Xenoliths

هو جزء من الصخور الدخيلة داخل صخرة نارية. قد يكون Xenolith نفسه أي نوع من الصخور ولكن صخرته المضيفة يجب أن تكون نارية. تُعرف الصخور الدخيلة في أنواع الصخور الأخرى عادةً باسم (الشوائب). (Xenolith) تعني حرفيّاً (الصخور الدخيلة)، لكن بعض الزينوليث ليست غريبة تماماً على مضيفيها. قد تكون مرتبطة وراثيّاً على سبيل المثال Xenoliths Gabbro في البازلت. تسمى هذه Xenoliths الإدراج المتشابه أو Autoliths. إنهما مرتبطان لأن كلاهما تبلور من نفس الصهارة.

يدرس العديد من الجيولوجيين الوشاح من خلال تحليل الصخور الدخيلة أو الزينوليثات Xenoliths وهي نوع من الصخور الدخيلة، أي صخرة محاصرة داخل كتلة صخرية أخرى. الماس نفسه أقل أهمية بالنسبة للجيولوجيين من الأحجار الزينوليثية التي يحويها البعض. هذه الصخور الدخيلة هي معادن من الوشاح، محاصرة داخل الماس الصخري. سمحت الاختراقات الماسية للعلماء بإلقاء نظرة على ما يصل إلى 700 كيلومتر تحت سطح الأرض، أي الوشاح السفلي.

تشير دراسات الصخور الدخيلة أن الصخور الموجودة في الوشاح العميق هي على الأرجح ألواح يبلغ عمرها 3 بلايين عام من قاع البحر المغمور. وصرنا نعلم من تركيبة الزينوليتات أن الوشاح العلوي على الأقل مصنوع من صخور مثل البريدوتيت، الغني بمعدن سيليكات الحديد والمغنيسيوم.

صخور الوشاح الدخيلة، مثل هذه القطعة من الدونايت الملون باللون الأخضر، التي جلبت إلى السطح عن طريق الاضطرابات المرتبطة بالبركنة.

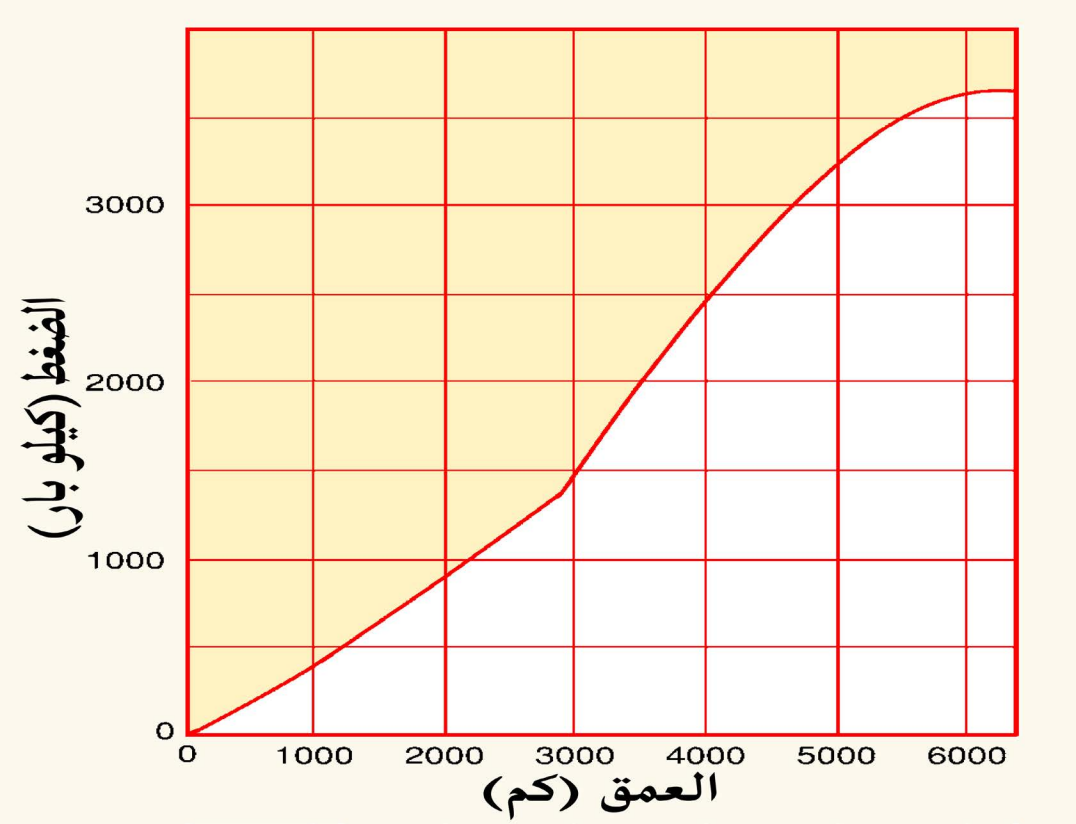
رســـــائل من الأعمـــــاق

هناك طريقة واحدة يمكننا من خلالها أخذ عينات من الوشاح مباشرة: في أثناء تدفق البراكين عميقة الجذور. تأتي معظم الصهارة التي تنفجر من البراكين من الانصهار الجزئي لمواد المصدر، لذلك البازلت، على سبيل المثال، ليس عينة كاملة من صخور الوشاح. ومع ذلك، فإنه يحمل أدلة نظيريه لما يكمن تحته. على سبيل المثال، يحوي البازلت من بعض البراكين عميقة الجذور، مثل تلك الموجودة في هاواي، على غاز الهيليوم مع نسبة عالية من الهيليوم 3 والهيليوم 4، الذي يعود لوقتٍ مبكرٍ من نشوء النظام الشمسي.

لذلك يُعتقد أن هذا الهليوم الذي يأتي من جزء من باطن الأرض لا يزال أصليّاً. يضيع الهليوم في الانفجارات البركانية ويستبدل ببطء بالهيليوم 4 من الاضمحلال الإشعاعي. يُستنفد البازلت في براكين سلسلة التلال في الهيليوم 3. وهذا يشير إلى أن المادة المعاد تدويرها فقدت غاز الهيليوم في الانفجارات السابقة ولا تأتي من عمق هذا الوشاح.

الحمـــــل الحـــــراري في الوشـــــاح

تختلف درجة حرارة الوشاح اختلافاً كبيراً، من 1000 درجة مئوية بالقُرْب من حدودها مع القشرة الأرضية، إلى 3700 درجة مئوية بالقُرْب من حدودها مع النواة. في الوشاح، تزداد الحرارة والضغط عموماً مع العمق. ويقيس التدرج الجيوحراري هذه الزيادة. في معظم الأماكن، يبلغ التدرج الحراري الأرضي نحو 25 درجة مئوية لكل كيلومتر من العمق.

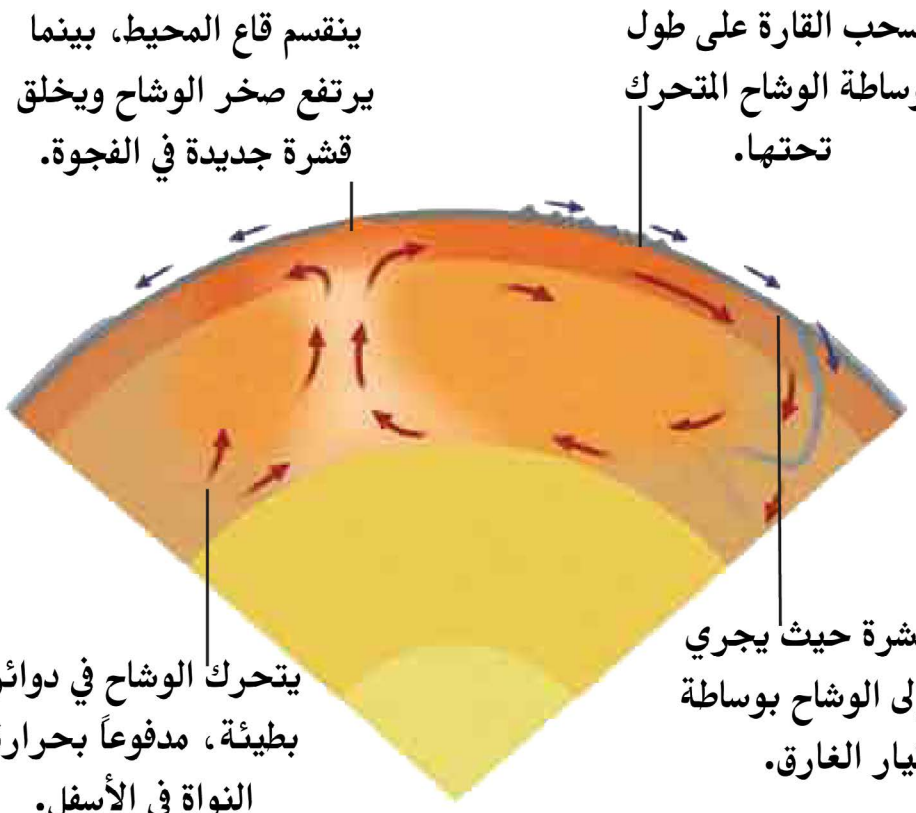


منحنٍ يوضح ازدياد الضغط في الجزء الداخلي من الأرض.

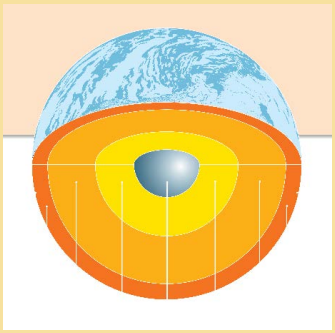
تختلف أيضاً لزوجة الوشاح اختلافاً كبيراً. وهي في الغالب صخور صلبة، لكنها أقل لزوجة عند حدود الصفائح التكتونية والانبثاقات الصهارية للوشاح. صخور الوشاح هناك ناعمة وقادرة على التحرك بشكل لدن (على مدار ملايين السنين) بعمق وضغط كبيرين.

ويصف الحمل الحراري في الوشاح حركة الوشاح؛ لأنه ينقل الحرارة من النواة البيضاء الساخنة إلى الغلاف الصخري الهشِّ. يسخّن الوشاح من الأسفل، ويجري تبريده من الأعلى، وتنخفض درجة حرارته الإجمالية على مدى فترات

طويلة من الزمن. كل هذه العناصر تساهم في الحمل الحراري. تنقل تيارات الحمل الحراري الصهارة الساخنة إلى الغلاف الصخري عند حدود الصفيحة والنقاط الساخنة. كما تنقل التيارات الحرارية أيضاً مادة أكثر كثافة وبرودة من القشرة إلى باطن الأرض من خلال عملية الاندساس.



تتدفق الصخور الموجودة في الوشاح في تيارات ترتفع وتتدفق جانبيّاً وتبرد ثم تغرق. يمكن أن تدفع هذه التيارات صفائح قشرة الأرض بعيداً أو تسحب أجزاء من القشرة لأسفل الوشاح.

حقائق علمية مدهشة	موصليـــــة الوشـــاح
	تعتمد بعض خرائط الوشاح على التوصيل الكهربائي، وليس على الموجات الزلزالية. من خلال رسم خرائط الاضطرابات في الأنماط الكهربائية، ساعد ذلك العلماء في تحديد (الخزانات) المخفية للمياه في الوشاح.

أعمـــــدة الوشـــاح Mantle Plumes

هـو صعـود صخـرة شـديدة السـخونة مـن الوشـاح. أعمـدة الوشـاح هـي السـبب المحتمـل (للبقـع السـاخنة)، وهـي مناطـق بركانيـة لـم تنشـأ عـن الصفائـح التكتونيـة. عندمـا يصـل عمـود الوشـاح إلـى الوشـاح العلـوي، يـذوب في حفاضـات. تعمـل هـذه المـادة المنصهـرة علـى تسـخين الغـلاف المـوري والغـلاف الصخـري، ممـا يـؤدي إلـى ثـورات بركانيـة. تسـاهم هـذه الانفجـارات البركانيـة مسـاهمة طفيفـة في فقـدان الحـرارة مـن باطـن الأرض، علـى الرغـم مـن أن النشـاط التكتونـي عنـد حـدود الصفائح هو السبب الرئيس لفقدان الحرارة.

عمـود الوشـاح هـو ارتفـاع صخـري سـاخن بشـكل غيـر طبيعـي داخـل وشـاح الأرض. نظـراً لأن رؤوس أعمـدة الوشـاح يمكـن أن تـذوب جزئيـاً عندمـا تصـل إلـى أعمـاق ضحلـة، يُعتقـد أنهـا سـبب للمراكـز البركانيـة المعروفـة باسـم (النقـاط السـاخنة) وربمـا أيضـاً تسـببت في الفيضانـات البازلتيـة. إنهـا طريقـة ثانويـة تفقـد فيهـا الأرض الحـرارة، وهـي أقـل أهميـة في هـذا الصـدد مـن فقـدان الحـرارة عنـد هوامش الصفائح.

يعتقـد بعـض العلمـاء أن الصفائـح التكتونيـة تبـرد الوشـاح، وأن أعمـدة الوشـاح تبـرد اللـب. اثنـان مـن أكثـر المواقـع المعروفـة التـي تتناسـب مـع نظريـة عمـود الوشـاح همـا هـاواي وأيسـلندا لأن كليهمـا لهمـا نشـاط بركانـي. حـدد الجيولوجيـون مـا يسـمى بـ (الأعمـدة الفائقـة) Superplumes. هـذه الأعمـدة الفائقـة، أو المقاطعـات الكبيـرة ذات سـرعة القـص المنخفضـة (LLSVPs)، ترجـع أصولهـا إلـى المـادة الذائبة لـ (D″).

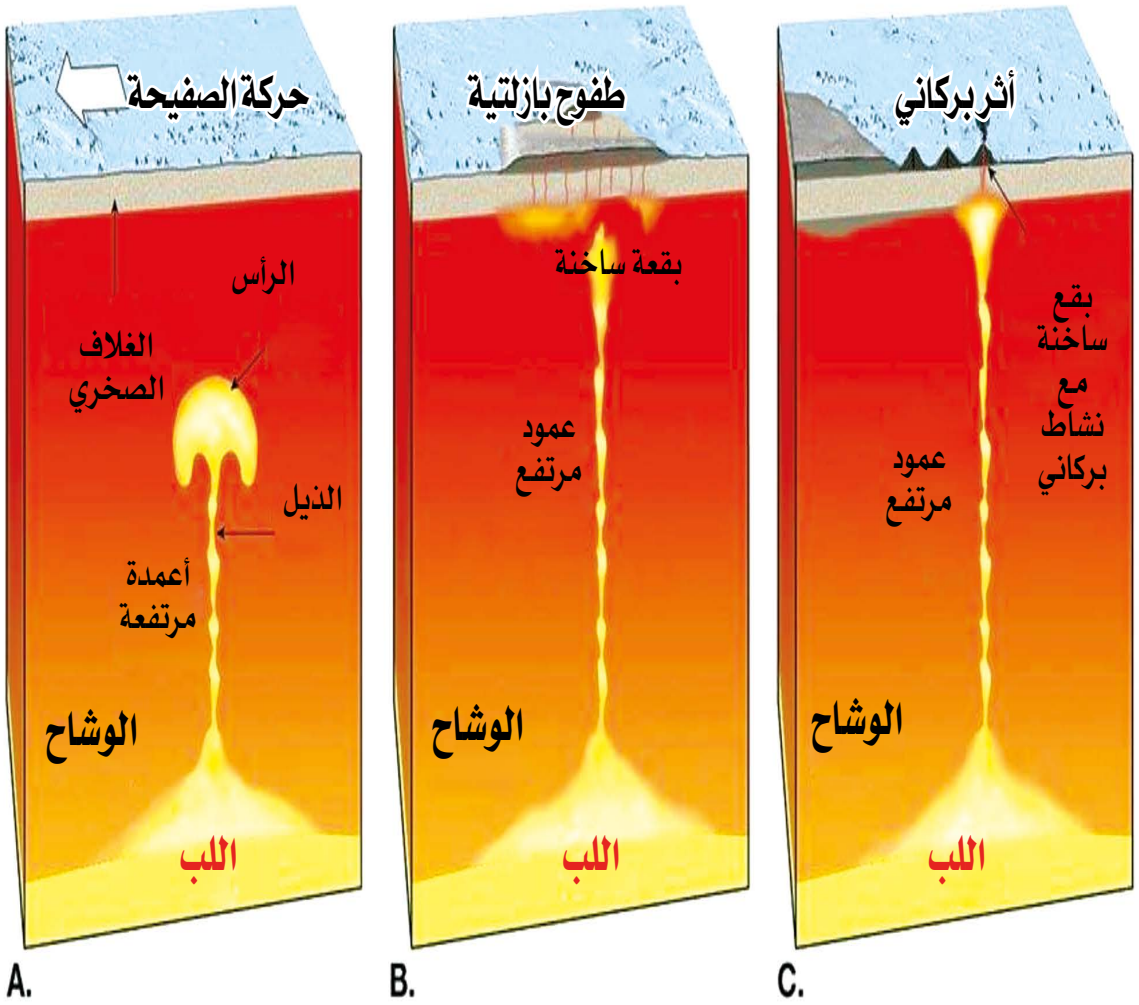
يعتقد الجيولوجيون أن أعمدة الوشاح قد تتأثر بالعديد من العوامل المختلفة. قد ينبض البعض، بينما قد يتم تسخين البعض الآخر باستمرار. قد يحتوي البعض على حفاض واحد، بينما قد يحتوي البعض الآخر على (سيقان) متعددة. قد تنشأ بعض أعمدة الوشاح في منتصف الصفيحة التكتونية، بينما قد يتم (أسر) البعض الآخر عن طريق مناطق انتشار قاع البحر.

حدد بعض الجيولوجيين أكثر من ألف عمود من أعمدة الوشاح. يعتقد بعض الجيولوجيين أن أعمدة الوشاح غير موجودة على الإطلاق. إلى أن تسمح الأدوات والتكنولوجيا للجيولوجيين باستكشاف الوشاح بشكل أكثر شمولاً، سيستمر الجدل.

البقـــــع الساخنـــــة Hot Spots

البقعة الساخنة: هي منطقة من الوشاح العلوي للأرض ترتفع لتذوب خلال القشرة لتشكيل سمة بركانية. تُعزى معظم البراكين التي لا يمكن عزوها إلى منطقة اندساس أو قاع البحر المنتشر عند التلال وسط المحيط إلى النقاط الساخنة. تعتبر نسبة 5 في المائة من براكين العالم المعروفة التي لا ترتبط ارتباطاً وثيقاً بهوامش الصفائح (انظر الصفائح التكتونية) براكين في النقاط الساخنة. تعد براكين هاواي من أفضل الأمثلة على هذا النوع، حيث تحدث بالقُرْب من مركز الجزء الشمالي من صفيحة المحيط الهادئ. يمكن أن تتكون سلسلة من البراكين المنقرضة أو الجزر البركانية والجبال البحرية، مثل سلسلة هاواي، على مدى ملايين السنين حيث تتحرك صفيحة الغلاف الصخري فوق

نقطة ساخنة. تقع جميع البراكين النشطة في أحد طرفي السلسلة أو التلال، وتزداد أعمار الجزر أو التلال ببُعْدها عن مواقع النشاط البركاني تلك.



أ. يظهر عمود وشاح متصاعد. ب. الصهارة على شكل تدفقات من البازلت، تصلب لتنتج هضبة محيطية.
ج. النشاط الضخم الأقل ينتج سلسلة بركانية

نـــــــــواة الأرض Earth Core

في عام 1866، اقترح الجيولوجي الفرنسي غابرييل دوبريه ما مفاده أنّ تحت سطح الأرض توجد طبقات من الصخور المختلفة التي تزداد كثافة مع العمق، لتبلغ ذروتها في منطقة مركزية مكونة من الحديد والنيكل. ثبت أن أفكاره صحيحة وقد اكتشف المزيد حول الوشاح والنواة منذ ذلك الحين.

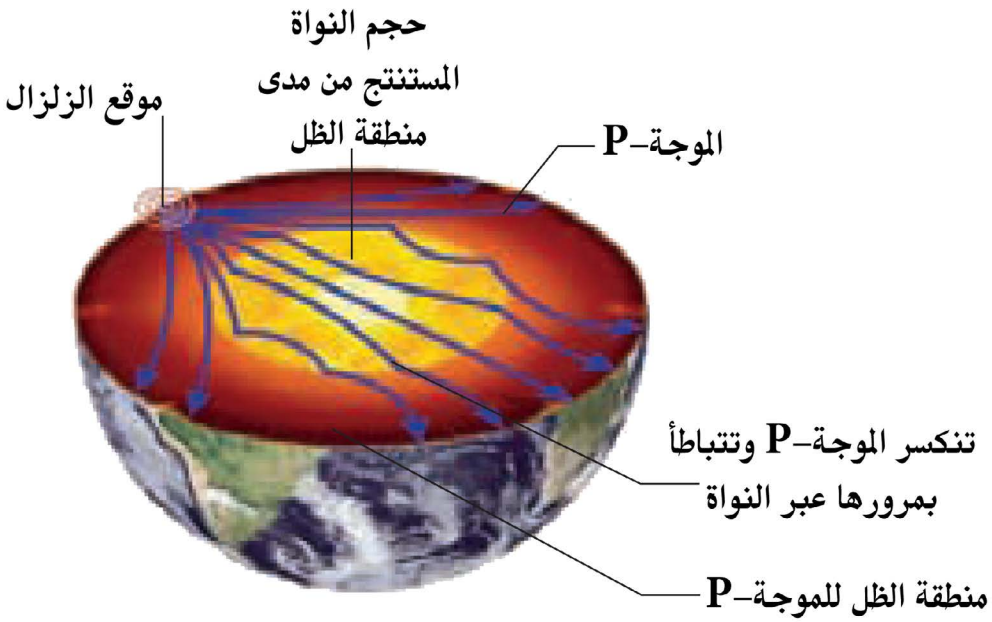
عند الوصول إلى مركز الأرض فإن الضغط يزداد إلى ملايين المرات عما هو عليه على سطح الأرض. وترجع صلابة اللب الداخلي إلى أن ازدياد الضغط يفوق زيادة الحرارة، لذلك تتصلب مكوناته، أما في اللب الخارجي فإن الزيادة في الضغط والحرارة يكونان متلازمين مما يبقى الحديد في حالته السائلة. وتقدر درجات الحرارة عند مركز الأرض ما بين 3000 إلى 5000 درجة سيليزية (مئوية). يمثل اللب حوالي سدس حجم الأرض وما يقرب من ثلث كتلتها.

تمتد نواة الأرض من حد الوشاح السفلي نزولاً إلى مركز الأرض. وتتراوح كثافة النواة بين 10و13 غرام لكل سم مكعب، ويبلغ قطر النواة نحو 2400 كيلومتر. وصار من المعروف أنها تتكون من جزء صلب داخلي، وجزء سائل خارجي.

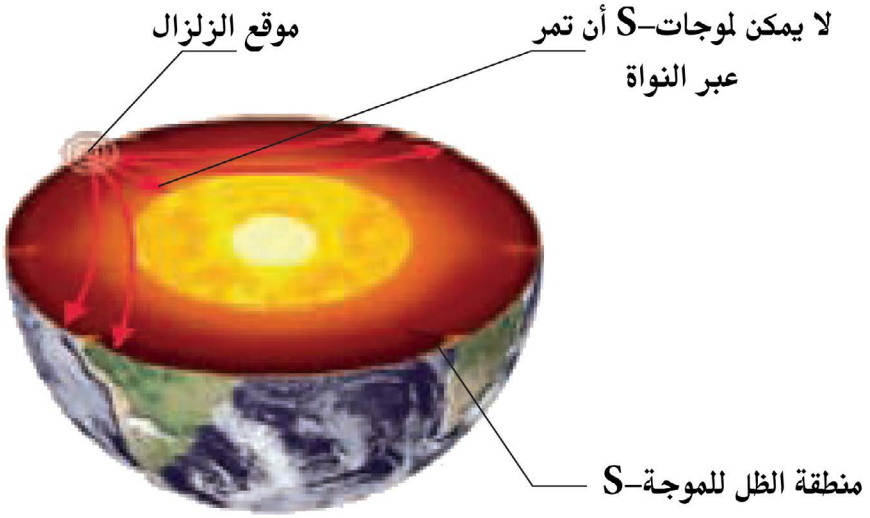
في الواقع توجد عدة أدلة تثبت وجود نواةٍ للأرض، كالموجات الزلزالية وتحليل النيازك، والتجارب المعملية مع درجة الحرارة والضغط، والنمذجة الحاسوبية.

الموجـــــات الزلـــزاليـــة

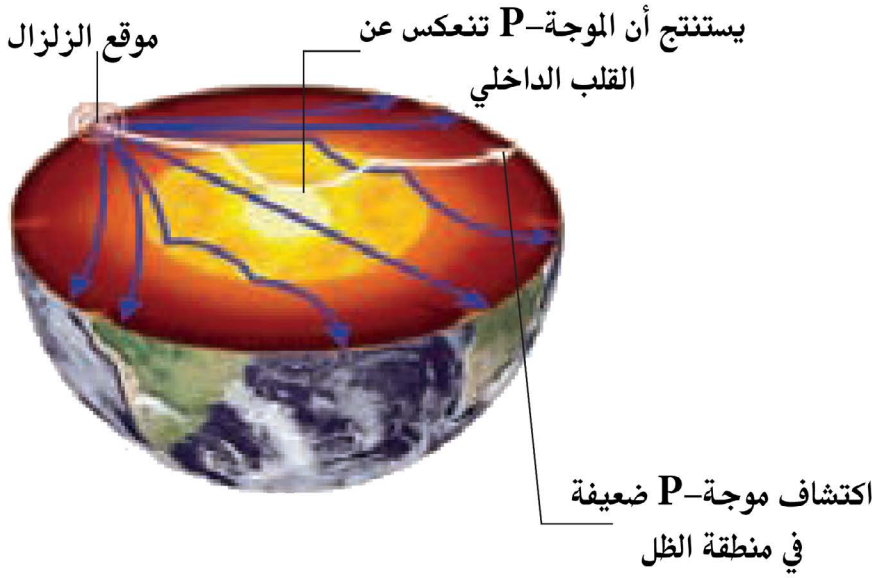
نعلم من الموجات الزلزالية أن الجزء الخارجي من النواة سائل وأن النواة الداخلية صلبة. إذْ تستغرق موجات P وقتاً أطول لانتقال الموجات الزلزالية من جانبٍ إلى آخر بسبب التأثير البطيء للنواة.



لا يمكن أن تمر الأمواج الزلزالية من النوع S خلال السوائل، ولم يجرِ الكشف عنها على الجانب الآخر من العالم. فهذا يشير إلى أن المنطقة الخارجية على الأقل من النواة هي سائلة.



يمكن الكشف عن موجة P باهتة في منطقة الظل بعد الزلزال. عندما جرى اكتشاف هذا لأول مرة، استنتج العلماء أن الموجة P المكتشفة يجب أن تنعكس على سطح الجزء الداخلي من النواة.



النيـــــــازك

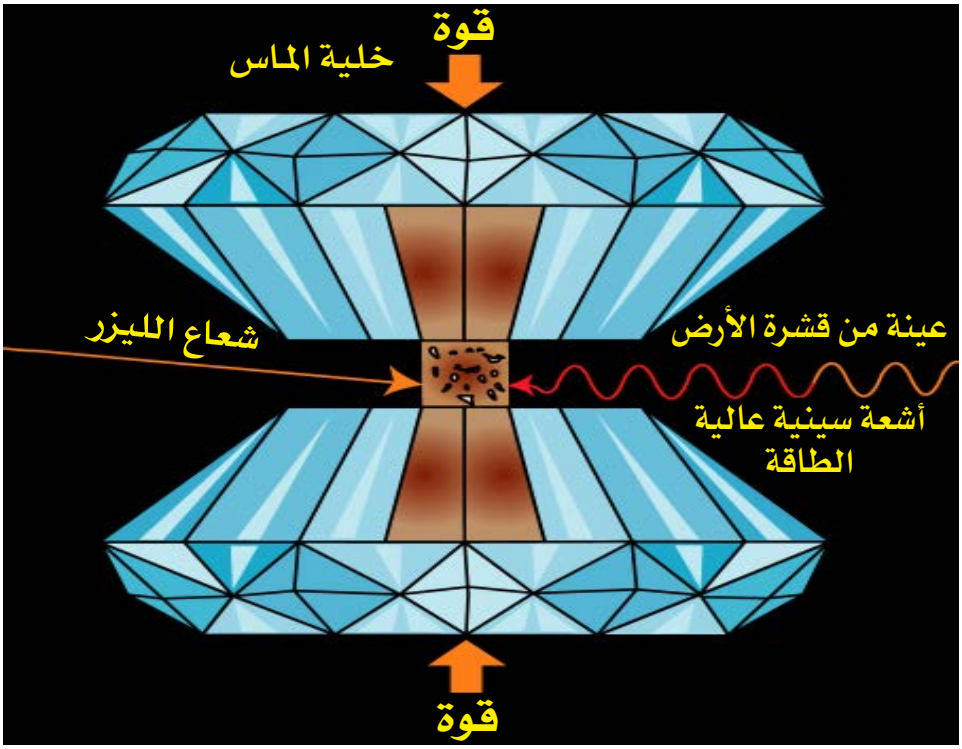
النيـازك: هـي الصخـور الفضائيـة التـي تصطـدم بـالأرض، وهـي توفـر أيضـاً أدلـة حـول وجـود نـواة لـلأرض. معظـم النيـازك عبـارة عـن شـظايا مـن الكويكبـات، وهـي أجـرام صخريـة تـدور حـول الشـمس بـين المريـخ والمشـتري. تشـكلت الكويكبات في الوقـت نفسـه تقريبـاً ومـن المـادة نفسـها تقريبـاً مثـل الأرض. ومـن خـلال دراسـة نيـازك الكوندريـت، الغنيـة بالحديـد، يمكـن لعلمـاء الأرض إلقـاء نظـرة خاطفـة علـى التكوين المبكر لنظامنا الشمسي ونواة الأرض المبكرة.

يُعتقـد أن معظـم النيـازك الحديديـة هـي لـب الكويكبـات التـي ذابـت في وقـت مبكـر مـن تاريخهـا. وهـي تتكـون أساسـاً مـن معـدن الحديـد والنيكل بكميـات صغيـرة مـن معـادن الكبريتيـد والكربيـد. أثنـاء اضمحـلال العناصـر المشـعة في التاريـخ المبكر للنظـام الشمسـي، ذابـت العديـد مـن الكويكبـات وغـرق الحديـد الـذي احتـوت عليـه، لكونـه كثيفـاً، في المركـز ليشـكل قلبـاً معدنيـاً. تُعـرف النيـازك مـن الكويكبـات الذائبـة أيضـاً باسـم (النيـازك المتمايـزة)؛ لأنهـا تعرضـت لتغيـرات كيميائيـة أو فيزيائيـة كبيـرة، تصلـب مـن الحالـة المنصهـرة. في بعـض الأحيـان يكـون لهـا قلـب حديـدي وطبقات متحدة المركز، محاطة بسيليكات الوشاح والقشرة.

عينة نيزك حديدي تتكون أساساً من معدن الحديد والنيكل وكميات قليلة من الكبريتيد

فـــي المعمـــــل

تعتبـر خليـة سـندان المـاس Diamond anvil cell الأداة الأكثـر قيمـة لدراسـة القـوى والتفاعـلات في النـواة. تسـتخدم خلايـا سـندان المـاس أقسـى مـادة علـى الأرض (المـاس) لمحـاكاة الضغـط المرتفـع بشـكل لا يصـدق في القلـب، حيـث يسـتخدم الجهـاز ليـزر الأشـعة السـينية لمحـاكاة درجـة حـرارة النواة، ويبث الليزر بين ماسـاتين يضغطان على عينة بينهما.



تمكن خلية سندان الماس (DAC) من ضغط قطعة صغيرة (بحجم أقل من المليمتر) من المواد لضغوط شديدة، تصل عادةً إلى نحو 100 – 200 جيجاباسكال، ومن الممكن تحقيق ضغوط تصل إلى 770 جيجاباسكال (أو 7.7 مليون ضغط جوي).

النمذجة الحاسوبية

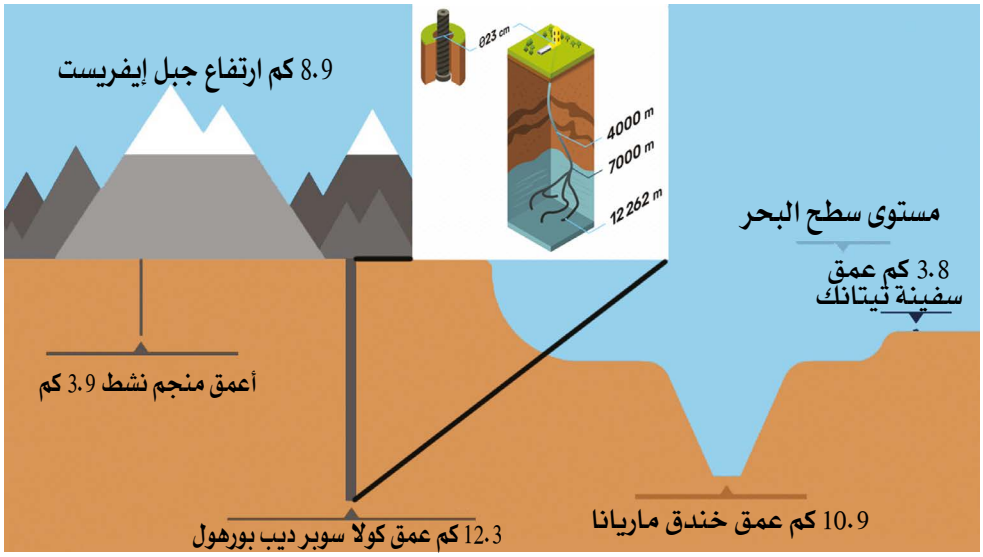
لقد سمحت النمذجة الحاسوبية المعقدة للعلماء أيضاً بدراسة النواة، ففي التسعينات، على سبيل المثال، أوضحت النمذجة جيوديناموGeoDynamo كاملة مع تقلبات القطب بشكل جيد. والجيوديناموتعني أنّ التدفق المضطرب للحديد السائل الموجود في لب باطن الأرض يولّد مجالاً مغناطيسيّاً.

تقترح نظرية دينامو أن الحمل الحراري في اللب الخارجي، جنباً إلى جنب مع تأثير كوريوليس، يؤدي إلى المجال المغناطيسي للأرض . اللب الداخلي الصلب حار جدّاً بحيث لا يحمل مجالاً مغناطيسيّاً دائماً ولكن من المحتمل أن يعمل على استقرار المجال المغناطيسي الناتج عن اللب الخارجي السائل. يقدر متوسط المجال المغناطيسي في اللب الخارجي للأرض بقياس 25 غاوس (2.5 مليون طن)، أقوى 50 مرة من المجال المغناطيسي على السطح. تشير الأدلة الحديثة إلى أن اللب الداخلي للأرض قد يدور بشكل أسرع قليلاً من بقية الكوكب؛ في عام 2005 قدر فريق من علماء الجيوفيزياء أن اللب الداخلي للأرض يدور بمعدل 0.3 إلى 0.5 درجة في السنة أسرع.

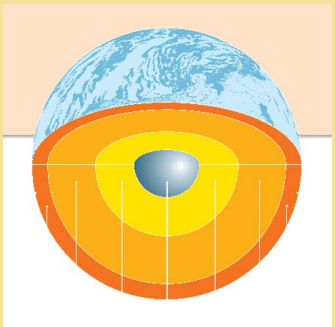
لماذا لا نرسل مسبار آلي إلى نواة الأرض الداخلية لنكشف عن حقيقتها؟

في الواقع تقع نواة الأرض الداخلية على بُعْد 6371 كم من سطح الأرض وأعمق حفرة جرى حفرها على الإطلاق هي حفرة (كولا سوبرديب بورهول Kola Superdeep Borehole) في روسيا، التي وصلت إلى عمق 12 كم فقط. وإذا حاولنا إرسال مسبار روبوت، فإنه لن يبتعد كثيراً. الضغط في باطن الأرض هو أكثر من 3000 ضعف الضغط في قاع المحيط الأعمق. ودرجة الحرارة أكثر من 5000 درجة مئوية.

أعتقد أن هذا قد يفسّر لنا لماذا يتوجه البحث العلمي لاستكشاف أعماق الفضاء أكثر من استكشاف أعماق الأرض؛ إذْ بالمقارنة مع الوصول إلى نواة الأرض، فإن السفر إلى المناطق خارج النظام الشمسي يصير أمراً تافهاً.



حفرة (كولا سوبرديب بورهول) في روسيا، التي وصلت إلى عمق 12 كم فقط.

حقائق علمية مدهشة	ليس كوكبنا فقط
	جميع الكواكب المعروفة لها نوى معدنية. حتى عمالقة الغاز في نظامنا الشمسي، مثل كوكب المشتري وزحل، لديها حديد ونيكل في نواها.

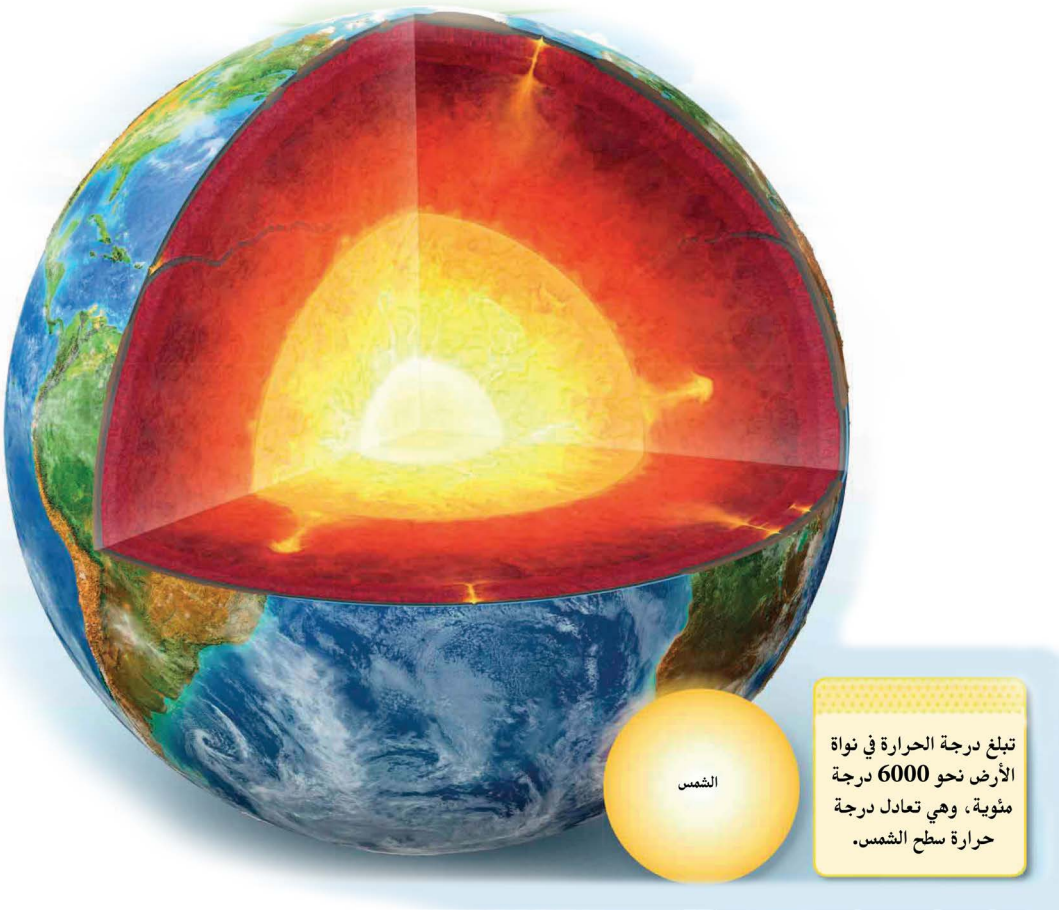
نـــواتـــــا الأرض

وجـدنا أن نـــواة الأرض تنقســـم إلـى نواتـــين بنـاءً على خصائصها الجيوفيزيائيـــة: نـــواة خارجيـــة، ونـــواة داخليـــة.

النـــــواة الخارجيـــة

النـواة الخارجيـة عبـارة عـن طبقـة سـائلة تتكـون في الغالـب مـن سـبيكة مـن الحديـد والنيـكل (وهـو خليـط لـه تركيبـة مماثلـة للنيـازك المعدنيـة). وقـد تشـكلت من خلال الانصهار الجزئي فقط للعناصر المعدنية المتراكمة.

تبـدأ نـواة الأرض الخارجيـة تقريبـاً عنـد عمـق 2900 كم تحـت سـطح الأرض، ويبلـغ سـمكها نحـو 2200 كيلومتـر، تتكون في الغالـب مـن الحديـد السـائل والنيـكل، ويمكـن لهـذه السـبيكة أن توجـد مجـالاً مغناطيسـيّاً هائـلاً لـلأرض وتحافـظ عليـه. إنهـا سـبيكة NiFe شـديدة السـخونة، بـين 4500 درجـة و 5500 درجـة مئويـة، لذلـك فـإن النـواة الخارجيـة موقـع للحمـل الحـراري العنيـف. وهـي تتميـز بلزوجـة منخفضـة جدّاً، مما يعني أنه من السهل تشويهها وقابليتها للطرق.



يدعى الحد الفاصل بين النواة الداخلة والخارجية باسم (انقطاع ليمان)، وهو الجزء الأكثر سخونة من النواة حيث تصل درجات الحرارة إلى 6000 درجة مئوية، وهي ساخنة مثل سطح الشمس.

الأدلـة العلميـة على أن النـواة الخارجيـة سائلة

اكتشف العلماء أن النواة الخارجية يجب أن تكون سائلةً من خلال مراقبة العديد من الموجات الزلزالية والمجال المغناطيسي للأرض.

بيانـــات الموجـــات الزلزاليـــة

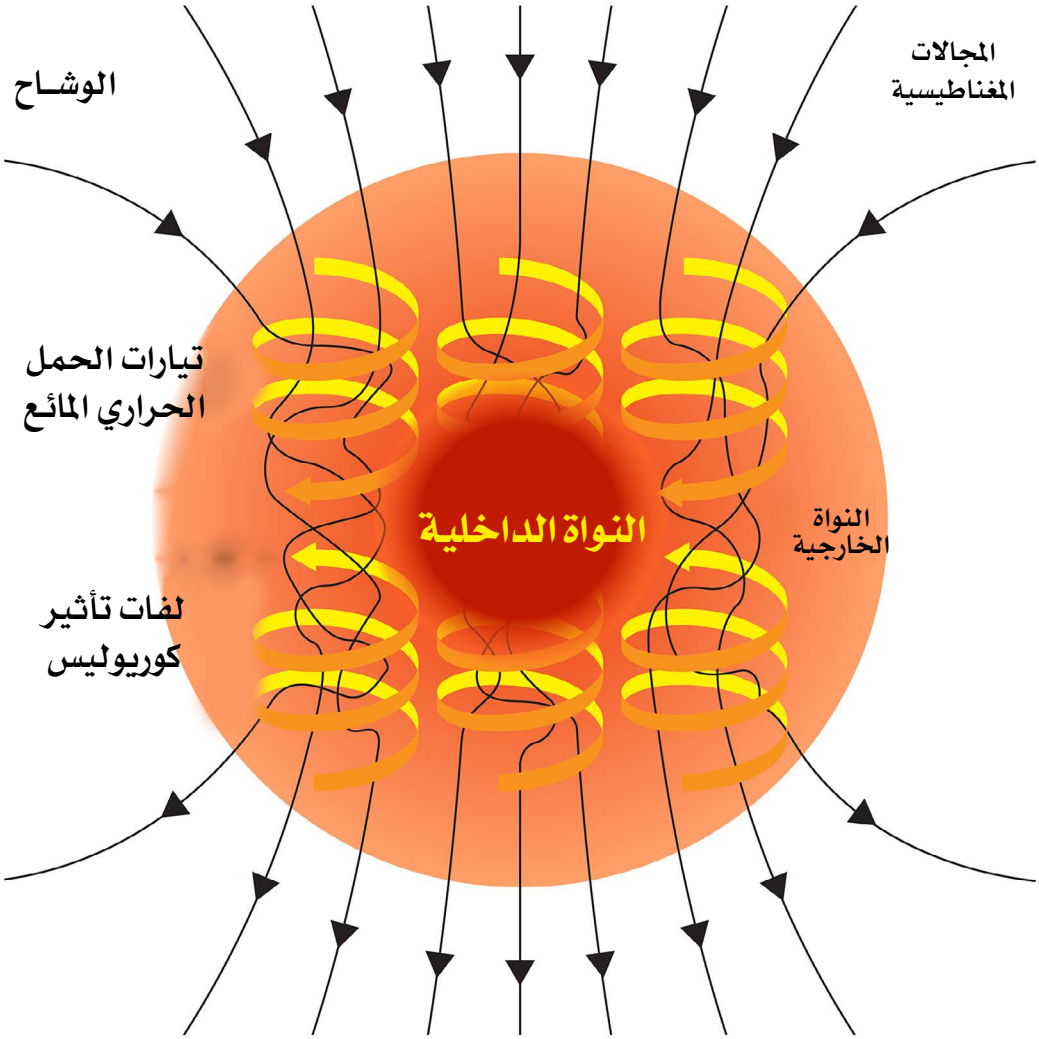
توفر بيانات الزلازل مزيداً من المعلومات حول تكوين مركز الأرض. أثناء حدوث الزلزال، تُطلق الطاقة بشكل موجات تنتقل عبر طبقات الأرض. ويجري تحرير نوعين الموجات هما الموجات الأولية، أي موجات P، والموجات الثانوية (القص)، أي موجات S. يمكن لكلٍ من الموجات P و S أن تنتقل عبر المواد الصلبة، لكن الموجات P الوحيدة يمكنها أن تنتقل عبر السوائل. تُظهر بيانات الموجات الزلزالية أن موجات S لا تمر عبر النواة الخارجية، وبالتالي يجب أن يكون هذا الجزء من باطن الكوكب سائلاً.

لماذا اللب الخارجي للأرض سائل؟ مع خروجنا من اللب الداخلي الصلب، تنخفض درجة الحرارة وينخفض الضغط أيضاً. يجب أن يكون الانخفاض في الضغط كبيراً جدّاً مقارنةً بالانخفاض في درجة الحرارة مع زيادة نصف القطر من اللب. نحو مركز الأرض، تدرجات درجة الحرارة والضغط والكثافة موجبة، ونحن ننتقل من السطح إلى المركز. على الرغم من وجود انقطاعات، في المتوسط، كل هذه تزداد مع العمق. درجة الحرارة الأساسية تزيد على 5500 درجة مئوية تطابق درجة حرارة سطح الشمس. يحمل اللب الخارجي سائلاً منخفض اللزوجة ويتم تصوره. من عمق حوالي 2800 كم إلى 5100 كم. ما

وراء هـذا العمـق تقريبـاً، فهـو نـواة داخليـة كرويـة. يُفتـرض أن المـادة تعـود إلـى صـورة صلبـة عاليـة الكثافـة (13.1 جم / سـم مكعـب)، بالقُـرْب مـن المركـز، في ظل ظروف شديدة الحرارة والضغط.

المجـــال المغناطيســي الأرضـــي

تمتلك الأرض مجالاً مغناطيسيّاً قويّاً يمكن أن يُنسب أيضاً إلى قلب خارجي سـائل. إن النـواة الخارجيـة، جنبـاً إلـى جنـب مـع النـواة الداخليـة، تشـكلان قـوة كوريوليـس Coriolis Force التـي تدعـم بشـكل دائـم البنيـة المغناطيسـية الأرضيـة للأرض. يتسـبب دوران الأرض في دوران النواة الخارجية السـائلة في اتجاه معاكس. يمـر المعـدن السـائل للنـواة الخارجيـة عبـر مجـال مغناطيسـي يولـد تيـاراً كهربائيّـاً. ومـع اسـتمرار تدفـق التيـار، تتولـد قـوة مغناطيسـية أقـوى؛ هـذا يخلـق دورة ذاتيـة الاستدامة من القوة المغناطيسية.



رسم تخطيطي يوضح العلاقة بين حركة مائع موصل منظم في لفات بوساطة قوة كوريوليس، والمجال المغناطيسي الذي تولده الحركة. الدليل الذي يثبت أن النواة الخارجية سائلة وليست صلبة.

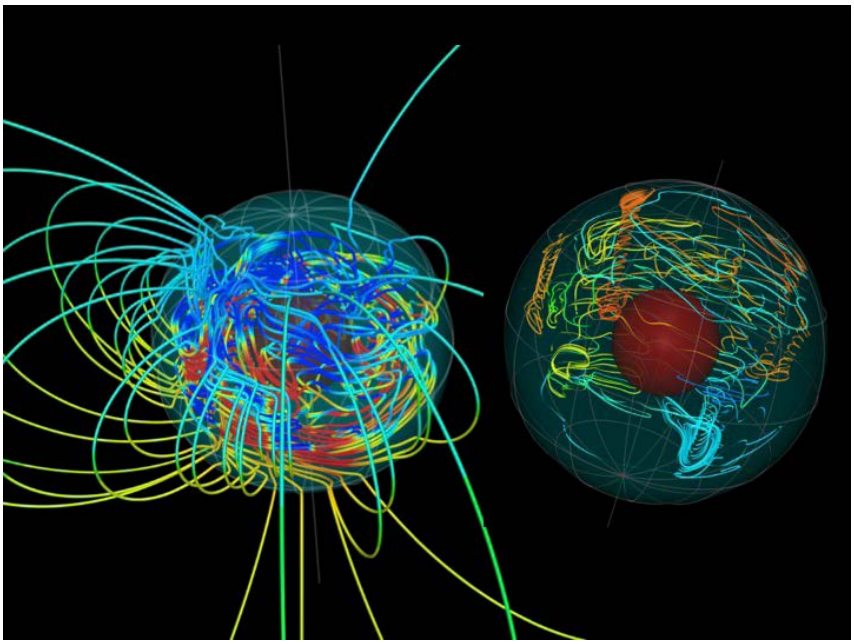
نظريـــــة الجيوديـنـــامـــو GEODYNAMO

تمتلك الأرض مجالاً مغناطيسيّاً ثنائي القطب (شمال وجنوب) قويّاً ينشأ من اللب الخارجي المائع للأرض (المجال الداخلي). يمثل هذا المجال أكثر من 95 % من الطاقة المغناطيسية للمجال المغنطيسي الأرضي المرصود على سطح الأرض.

يمكن تفسير هذا المجال من خلال اللب الخارجي الذي يولد الحقل. لذلك يجب أن يكون اللب الخارجي سائلاً سريعَ التدفق. هذا من شأنه أن يسمح لها بالعمل كدينامو ذاتي التثبيط مع التيارات الحرارية المتصاعدة التي تولد مجالاً كهرومغناطيسيّاً. يجب أن يتكون هذا اللب الخارجي السائل من معادن قادرة على توليد المغناطيسية على سبيل المثال الحديد والنيكل والكوبالت (على الأرجح NiFe – من دليل النيزك).

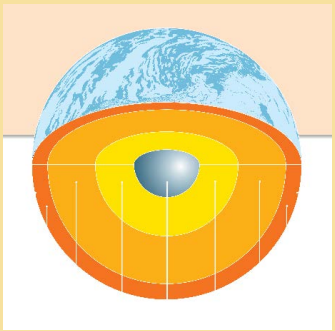
تؤدي الاختلافات في درجة الحرارة والضغط داخل النواة الخارجية، بالإضافة إلى وجود قوة ناتجة عن دوران الأرض إلى نشأة دوامات من الحديد السائل تسمى تيارات الحمل الحراري Convection Currents التي تُولد تيارات كهربائية، ومن ثمّ تنتج حقول مغناطيسية. تستمر المعادن المشحونة التي تمر عبر هذه الحقول في خلق التيارات الكهربائية الخاصة بها، وبالتالي تستمر الدورة، وتعرف هذه الحلقة باسم (الجيوديناموـ)، ويؤدي محصلة تأثيرها إلى إضافة حقل مغناطيسي شاسع واحد يكتنف الكوكب بأكمله .يُعتقد أن الحرارة الناتجة عن الاضمحلال الإشعاعي في اللب تؤدي إلى حركة الحمل الحراري. وينتج التيار الكهربائي بدوره حقلاً مغناطيسيّاً يتفاعل أيضاً مع حركة السوائل لإنشاء مجال مغناطيسي ثانوي. يعد الحقلان معاً أقوى من المجال الأصلي ويقعان أساساً على طول محور دوران الأرض.

من المعروف أن خطوط المجال المغناطيسي لا تتقاطع. يوجد للشمس مجال مغناطيسي ينظم بها المجموعة الشمسية، وتم تمييز خطوط مجال مغناطيسى من البلازما الشمسية على سطح الشمس، وعندما تتقاطع هذه الخطوط عند مناطق البقع الشمسية Solar Spots، تتولد طاقة هائلة من الجسيمات المشحونة كهربائياً التي تنطلق في الفضاء نحو كوكبنا، وتسمى بـ المقذوفات الأكليلية – Coronal Mass Ejection) أو تُختصر (CME) مكوّنة العاصفة الشمسية. يخلق الحقل المغناطيسي للأرض بِنَية تسمى الغلاف المغناطيسي – Magnetosphere، الذي يحيط بكوكبنا، فعندما يتأثر الغلاف المغناطيسي بجزيئات مشحونة من الفضاء مثل المقذوفات الإكليلية، فإنه يقوم بتحريف هذه الجسيمات بعيداً عن سطح الأرض، وهذا يحمينا من مخاطر التعرض للكثير من هذه الجسيمات. عند اصطدام المقذوفات الشمسية بالغلاف المغناطيسي للأرض تؤدي إلى انضغاطه بدرجة معينة، فيُرغِم هذه الجسيمات أن تسير مع خطوط الحقل المغناطيسي الأرضي باتجاه القطبين الشمالي والجنوبي، فيعلق جزء منها عند قطبي الكوكب، كما ينتقل جزء من طاقتها إلى الغلاف الجوي؛ مما يؤدي إلى اكتساب الإلكترونات طاقة؛ فتصعد إلى مستويات طاقة أعلى، وعند عودتها إلى مستويات طاقتها الأصلية تطلق إشعاعاً يظهر في المناطق القطبية الشمالية والجنوبية مقدمةً عروضاً لونيةً زاهيةً في السماء والمعروفة باسم (الشفق القطبي).



لقطة من نتائج محاكاة الجيوديناموـ اليسار هو خطوط المجال المغناطيسي عبر اللب الخارجي، واليمين هو الانسيابية لتدفق الحمل الحراري في اللب الخارجي.

تتفاعل الجسيمات المشحونة مع المجالات المغناطيسية. تشكل حركات الجسيمات المشحونة في الدوائر مجالات مغناطيسية خاصة بها. نتيجة لذلك، عندما يصطدم كلا المجالين المغناطيسي مع بعضهما البعض، يمتص المجال المغناطيسي للأرض زخم الجسيمات المشحونة، وهذا يدفع المجال المغناطيسي للأرض للخلف. تريد الأرض أن تصنع مجالاً مغناطيسيّاً متساوياً، لكن الشمس تدفع المجالات المغناطيسية بعيداً عن الشمس. هناك أوقات تكون فيها الرياح الشمسية قوية بما يكفي للتغلب على المجال المغناطيسي. ينزلق الجسيم المشحون على طول الحقل إلى القطبين، وعندما يكون قويّاً بدرجة كافية، يدخل الغلاف الجوي بالقُرْب من قطبي الأرض، ويؤين الغلاف الجوي. هذا يؤدي إلى مشهد جميل يسمى Aurora Borealis Australis.

حقائق علمية مدهشة	طريقة الجيونوترينوات
	واحدة من أكثر الطرائق غرابة التي يدرس علماء الجيولوجيا النواة فيها هي من خلال الجيونوترينوات Geoneutrinos. وهي نيوترينوات، أخف جسيم دون ذري، ينطلق من التحلل الإشعاعي الطبيعي للبوتاسيوم والثوريوم واليورانيوم في باطن الأرض. من خلال دراسة الجيونوترينوات، يمكن للعلماء أن يفهموا بشكل أفضل التركيب والتوزيع المكاني للمواد في الوشاح والنواة.

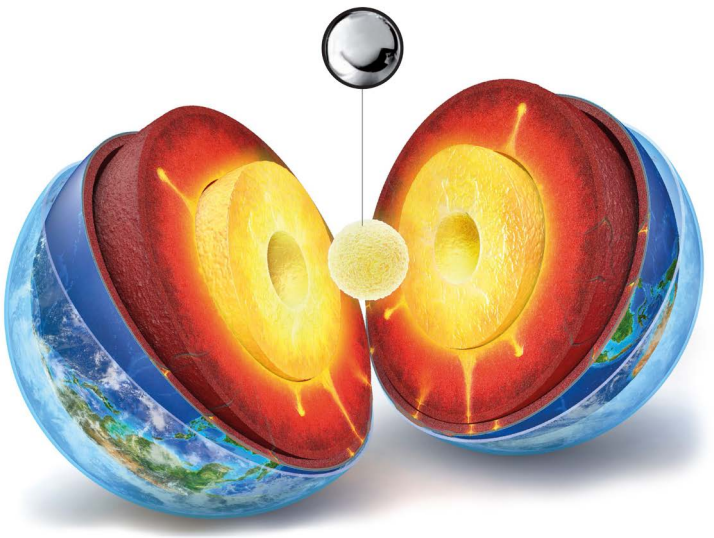
النـــــواة الداخليـــــة

تظهر الدراسات الجيوفيزيائية أن النواة الداخلية تتصرف كجسم صلب، لكنه كثيف جدّاً، تبلغ كثافته نحو 16 غرام / سم مكعب (على غِرار الخَصائص الفيزيائية لحجر النيكل النيزكي). يبلغ قطر المنطقة الداخلية من النواة الداخلية نحو (1180 كم) وتشكل 0.08 % من حجم الأرض.

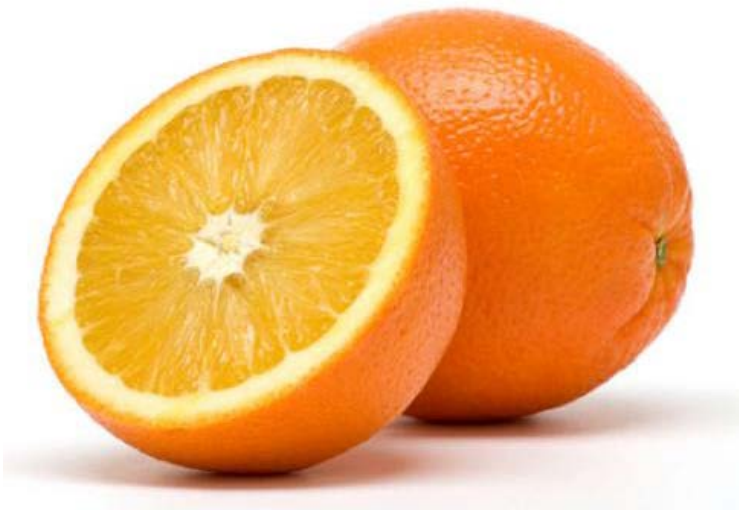
مع أن النواة الداخلية بيضاء حارّة، إلا أن الضغط مرتفع جدّاً ولا يمكن للحديد أن ينصهر. إذْ يبلغ الضغط في النواة الداخلية ما يقرب من 3.6 مليون ضغط الغلاف الجوي. وتحت هذا الضغط يمكن للمواد أن تعمل بشكل مختلف تماماً عن الظروف العادية. حيث يمنع الضغط الشديد للنواة الداخلية الحديد من الانصهار. الضغط والكثافة أكبر من أن تنقل ذرات الحديد إلى الحالة السائلة. بسبب هذه المجموعة غير العادية من الظروف، يفضل بعض

الجيوفيزيائيين تفسير النواة الداخلية ليس على أنها صلبة، وإنما على أنها بلازما تتصرف كمادة صلبة؛ أي أنها أشبه بمعجون الأسنان.

تخضع الطبيعة الدقيقة للنواة الداخلية لنقاش كبير بين العلماء؛ ففي درجات الحرارة، على سبيل المثال، لا يمكن حسابها إلا من خلال الدراسات التجريبية لكيفية انصهار المواد وتصلبها تحت الضغط. بشكل عام، فدرجات الحرارة تتراوح بين 4400 و6000 درجة مئوية. ومع ذلك، يجب أن تذهب هذه الحرارة في قلب الأرض إلى مكان ما، ويعتقد العلماء أنها تدور في تيارات عبر الوشاح، تماماً مثل حرارة الموقد التي تحرك محلول القطران الثقيل حولها.



النواة الداخلية هي خليط من الحديد والنيكل ممزوجة بعناصر أخف. كما أنّ الضغط في المركز مرتفع جدّاً بحيث يبقي النواة الداخلية صلبةً.



نصفي الكرة في اللب الداخلي
تماماً مثل برتقالة مقطعة إلى نصفين

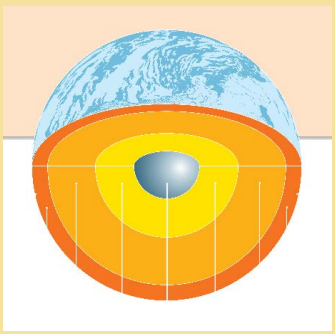
الكارثـــــة الحديديـــــة

عمر كوكب الأرض أقدم من عمر نواته. عندما تشكلت الأرض منذ نحو 4.5 بليون سنة، كانت كرة موحدة من الصخور الساخنة. وقد تسبب الاضمحلال الإشعاعي والحرارة المتبقية من تكوين الكواكب (الاصطدام، والتراكم، وضغط الصخور الفضائية) في زيادة سخونة الكرة. في النهاية، بعد نحو 500 مليون سنة، ارتفعت درجة حرارة كوكبنا الشاب إلى درجة انصهار الحديد، أي نحو 1538 درجة مئوية. تسمى هذه اللحظة الفاصلة في تاريخ الأرض بالكارثة الحديدية Iron Catastrophe.

لقد سمحت الكارثة الحديدية بحركة أكبر وأسرع للمواد الصخرية المنصهرة للأرض. بقيت المواد شديدة الطفو، مثل السيليكات والماء وحتى الهواء، قريبة من السطح الخارجي للكوكب. وشكلت هذه المواد الوشاح والقشرة في وقت مبكر. انجذبت قطرات من الحديد والنيكل والمعادن الثقيلة الأخرى إلى مركز الأرض، لتصبح النواة المبكرة. هذه العملية المُهمَّة تسمى التمايز الكوكبي Planetary Differentiation.

ويعتقد علماء الجيولوجيا أن بلورات الحديد في النواة الداخلية مرتبة وفق النمط (hcp) أي سداسي الشكل الممتلئ قريباً. حيث تتحاذى البلَّورات بين الشمال والجنوب، جنباً إلى جنب مع محور دوران الأرض والمجال المغناطيسي.

يعني اتجاه التركيب البلَّوري أن الموجات الزلزالية – الطريقة الأكثر موثوقية لدراسة النواة – تسافر بشكل أسرع عندما تتجه شمالاً إلى جنوباً مقارنةً بالذهاب شرقاً غرباً. تنتقل الموجات الزلزالية من القطب إلى القطب بمعدل أربع ثوانٍ أسرع مما تنتقل عبر خط الاستواء.

حقائق علمية مدهشة	كنز مدفون
	مع أن النواة الداخلية للأرض في الغالب من النيكل والحديد، إلا أن الكارثة الحديدية دفعت أيضاً العناصر الثقيلة من الحديد إلى مركز الأرض. في الواقع، قدر أحد علماء الجيولوجيا أن هناك 1.6 كوادريليون طن من الذهب في القلب، وهذا يكفي لتذهيب سطح الكوكب بأكمله بسمك نصف متر.

الأدلـــة العلميـة على أن النـــواة الداخليـة صلبـة

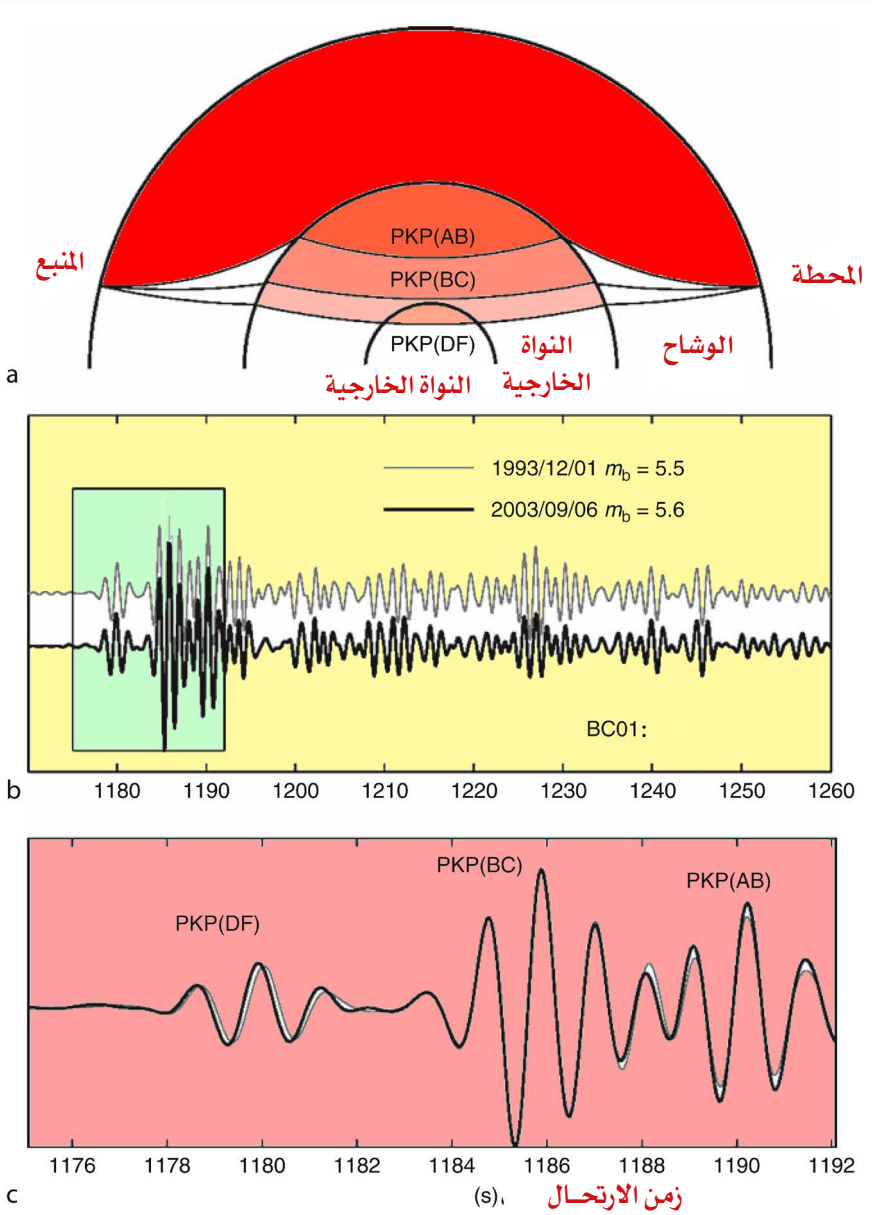
من المقبول على نطاق واسع أن النواة الداخلية للأرض صلبة؛ ولطالما حاول علماء الزلازل العثور على دليل مباشر على هذا التأكيد، الذي يمكن أن يأتي في شكل تحديد نـــــوع معين من الموجـــات الزلزالية، تسمى (موجة القص)، التي تنتقـــل عبر النـــواة الداخليـــة. لذا فإن الموجـــة التي تمر عبرها كلها تسمى PKJKP.

يرسل الزلزال موجات زلزالية في جميع الاتجاهات. أحياناً تكون موجات السطح واضحة بشكل مخيف. تُدرس الموجات الزلزالية التي تمر عبر الوشاح وتعبر جزءاً كبيراً من باطن الكوكب بشكل روتيني عندما تصل إلى قارة أخرى. لكن لم يكشف أي موجة من PKJKP بشكل موثوق حتى الوقت الحالي.

تكمن الحيلة في اكتشاف موجة PKJKP في ملاحظة التغييرات التي تمر بها؛ لأنها تهتز من جانب واحد من كوكب الأرض إلى الجانب الآخر. ما يبدأ كموجة ضغط يتغير إلى ما يسميه العلماء موجة القص.

تمر PKJKP عبر النواة الداخلية كموجة قص، لذلك فإن هذا هو الدليل المباشر على أن النواة الداخلية صلبة؛ لأنه فقط في المادة الصلبة يمكن أن توجد موجة القص. أما في المادة السائلة، كما في حالة الماء، فإن الموجة الانضغاطية يمكن أن تنتقل عبرها فقط.

يتوافق وقت وصول الموجات وبطئها مع التوقعات النظرية لموجات PKJKP، مما يشير إلى وجود نواة صلبة.



الدوران التفاضلي للنواة الداخلية للأرض يدل على أنها صلبة. تظهر مسارات الأشعة لموجات PKP ومثال على شكل الموجة المزدوجة المستخدمة لاكتشاف التغيير الزمني لأوقات السفر عبر النواة الداخلية.

a. **تتحول مسارات الأشعة لثلاثة فروع** من موجات PKP إلى النواة الداخلية الصلبة (DF)، وقاع النواة الخارجية السائلة (BC)، والنواة الوسطى الخارجية (AB).

b. **جرى تسجيل أشكال موجية متشابهة** جدّاً في محطة واحدة في ألاسكا من شكل موجة مزدوج من جزر ساندويتش الجنوبية. يفصل بين الحدثين 10 سنوات، أحدهما في عام 1993 والآخر في عام 2003.

c. **أشكال موجة PKP متراكبة وموسعة** من المربع في (B). يجري محاذاة الموجات عبر النواة الخارجية (BC و AB)، لكن الموجة عبر النواة الداخلية (DF) تظهر تحولاً زمنيّاً صغيراً (نحو 0.1 ثانية).

نمو النواة الداخلية

عندما تبرد الأرض بأكملها ببطء، تنمو النواة الداخلية نحو مليمتر كل عام. وتنمو النواة الداخلية عندما تتصلب أو تتبلور أجزاء من النواة الخارجية السائلة. بكلمة أخرى إنها تتجمد، مع أنه من المهم أن نتذكر أن نقطة تجمد الحديد أكثر من 1000 درجة مئوية.

إن نمو النواة الداخلية غير منتظم. فهو يحدث بشكل كتل وعناقيد، ويتأثر بالنشاط في طبقة الوشاح. كما يتركز النمو بشكل أكبر حول مناطق الاندساس، على ارتفاع آلاف الكيلومترات فوق النواة. تسحب الصفائح مندمجة الحرارة من القلب وتبرّد المنطقة المحيطة، مما يتسبب في زيادة حالات التصلب. يتركز

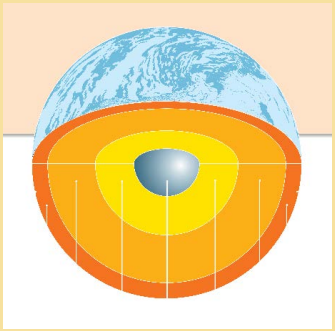
النمو بشكل أقل حول (العناصر الفائقة) أو LLSVPs. هذه الكتل المتضخمة من صخور الوشاح شديدة السخونة تؤثر على الأرجح على النشاط البركاني أو (البقع الساخنة) في الغلاف الصخري، وتساهم في تكوين نواة خارجية أكثر سيولة.

لكن علينا أن نطمئن بأن النواة الداخلية لن تتجمد أبداً. إذْ أنّ عملية التبلور بطيئة جدّاً، كما أنّ التحلل الإشعاعي المستمر لباطن الأرض يبطئها أكثر. يقدر العلماء أن النواة سوف تستغرق نحو 91 بليون سنة حتى تصلب تماماً، لكن الشمس سوف تتخامد في جزء صغير من ذلك الوقت (نحو 5 بلايين سنة). عندها لن يكون هناك أحد على الأرض ليقلق بشأن تجمد نواتها!

تنقسم النواة الداخلية إلى نصفين شرقي وغربي. لكن لا ينصهر نصفا النواة الداخلية بالتساوي، ولها هياكل بلَّورية مميزة. ويبدو أن نصف النواة الغربي يتبلور بسرعة أكبر من نصف الكرة الشرقي. في الواقع، قد ينصهر النصف الشرقي من النواة الداخلية.

لقد اكتشف علماء الجيولوجيا مؤخراً أن النواة الداخلية نفسها لها نواة بداخلها. يعتقد العلماء أن تغيراً جيولوجيّاً جذريّاً منذ نحو 500 مليون سنة تسبب في تطور هذا النواة الداخلية.

بلورات النواة الداخلية تتجه من الشرق إلى الغرب بدلاً من الشمال والجنوب. ولا تحدث محاذاة لهذا الاتجاه مع محور دوران الأرض أو المجال المغناطيسي. يعتقد العلماء أن بلورات الحديد قد يكون لها بنية مختلفة تماماً (وليس hcp)، أو توجد في مرحلة مختلفة.

حقائق علمية مدهشة	نمـــــو غريب
	ينمو مركز الحديد الصلب في نواة الأرض بشكل أسرع من الجانب الآخر. ولا يستطيع الخبراء تفسير السبب.

دوران النواة الداخلية

تدور النواة الداخلية للأرض، مثل الأرض ككل، ولكن ليس بالطريقة نفسها تماماً مثل بقية أجزاء الأرض. إنها في الواقع تدور بشكل أسرعٍ قليلاً من بقية الكوكب، حيث اكتسبت ما يقرب من عُشر دورة في الثلاثين عاماً الماضية. تظهر الدراسة المتأنية للموجات الزلزالية من الزلازل في جزر ساوث ساندويتش قبالة الطرف الجنوبي لأمريكا الجنوبية التي جرى اكتشافها في ألاسكا ذلك التأثير. فقد جرى الكشف عن ذلك بسبب تباين الخواص بين الشمال والجنوب في النواة الداخلية.

نظراً لأن النواة الداخلية تتقدم على بقية أجزاء الأرض، فإن التأثير الناتج عن هذا التباين يتغير. وصلت الموجات الزلزالية التي اجتازت خارج النواة الداخلية مباشرة إلى ألاسكا في عام 1995 بالسرعة نفسها التي كانت عليها في عام 1967. لكن الموجات التي مرت عبر النواة الداخلية جعلت الرحلة أسرع بمقدار 0.3 ثانية في عام 1995 مقارنة بعام 1967، مما يدل على أن محور المسار السريع يؤرجح النواة الداخلية في محاذاة قدرها 1.1 درجة في السنة. كما تشكل التيارات النفاثة في الغلاف الجوي شداً مغناطيسيّاً على النواة الداخلية.

يفصل سائل النواة الخارجية النواة الداخلية عن بقية الأرض، ونتيجة لذلك، تدور النواة الداخلية بشكل مختلف قليلاً عن بقية الكوكب. إنها تدور باتجاه الشرق، مثل السطح، ولكن أسرع قليلاً، مما يؤدي إلى دوران إضافي كل 1000 عام تقريباً.

لماذا لا تصهر نواة الأرض كوكب الأرض؟

بمعنى آخر: إذا كانت نواة الأرض ساخنة جدّاً مثل سطح الشمس، فلماذا لا تنصهر الأرض؟ ولماذا لا تقتلنا جميعاً؟

ذكرنا أن النواة محاطة بغطاء صخري صلب في الغالب. القشرة التي نعيش عليها تطفو على الوشاح وتمنحنا حماية أكثر من المساحة الفارغة. لكن أهم سبب لعدم انصهارنا جميعاً هو الفرق بين الحرارة ودرجة الحرارة. بشكل تقريبي، الحرارة هي طاقة ودرجة الحرارة هي كمية الطاقة المحصورة في حجم معين.

للتبسيط يمكن أن تصل درجة حرارة شرارة الألماسة Sparkler [نوع من أنواع الألعاب النارية] إلى 1500 درجة مئوية، لكنها لن تؤذيك في الواقع. من ناحية أخرى، فإن الاستحمام بالماء المغلي عند 100 درجة مئوية قد يقتلك. هذا لأن الحمام يحوي على طاقة حرارية أكثر بكثير.

حتى تنصهر الأرض كلها، ستحتاج إلى طاقة أكثر بكثير من الحرارة التي في نواتها. الشمس ضخمة ويمكنها فعل ذلك بسهولة بالطبع، لكن لحسن الحظ أنها تبعد عنا 150 مليون كيلومتر.

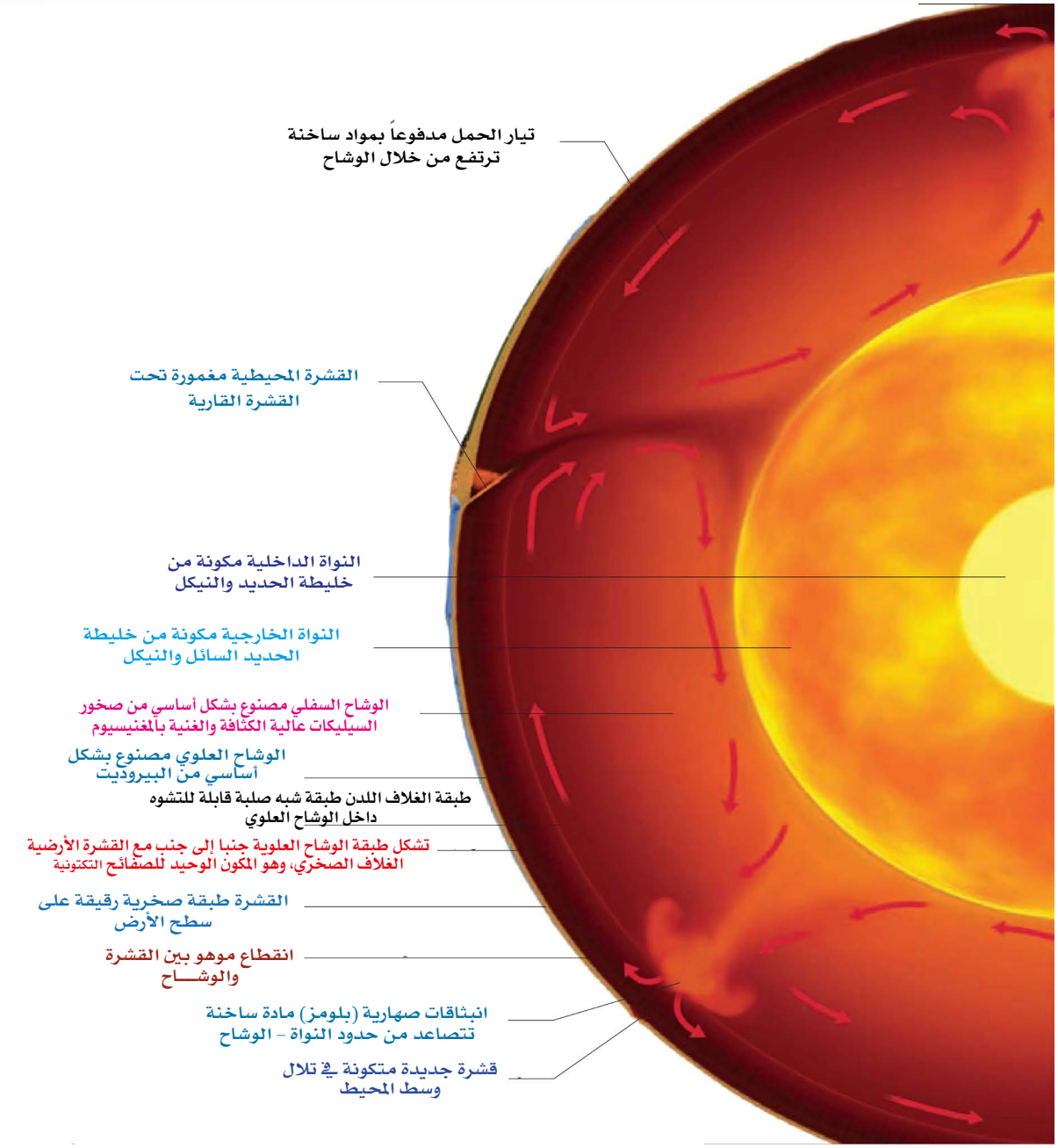
قياس درجة حرارة نواة الأرض

يقيس التدرج الحراري الأرضي زيادة الحرارة والضغط في باطن الأرض. يبلغ التدرج الحراري الأرضي نحو 25 درجة مئوية لكل كيلومتر من العمق. العوامل الرئيسة المساهمة في الحرارة في النواة هي تحلل العناصر المشعة، والحرارة المتبقية من تكوين الكواكب، والحرارة المنبعثة عندما تتصلب النواة الخارجية السائلة بالقُرْب من حدودها مع النواة الداخلية.

كلما تعمقت، ازدادت درجة الحرارة، لكن ما مدى سخونة نواة الأرض؟ الجواب هو أنه عند الحدود بين النواة الخارجية المنصهرة والنواة الداخلية الصلبة للأرض، يجب أن تكون درجة الحرارة عند نقطة انصهار الحديد بالضبط. لكن درجة انصهار الحديد تحت تلك الضغوط الهائلة ستكون مختلفة تماماً عن قيمتها على سطح الأرض. لمعرفة ما هو عليه الوضع، يجب على العلماء إعادة إنشاء تلك الظروف في مختبراتهم أو حسابها من الناحية النظرية.

لقد جربوا طريقتين عمليتين مختلفتين: الأولى باستخدام عينات صغيرة محصورة بين سندان ماسي، والأخرى باستخدامٍ مسدس غاز مضغوط عملاق متعدد المراحل لضغط العينات للحظة فقط. نظراً للصعوبات في تحقيق مثل هذه الضغوط المذهلة – 330 غيغاباسكال عند حدود النواة الداخلية – وبسبب صعوبة معايرة الضغط حتى تعرف متى وصلت إلى هناك، لا يزال يتعين على كلتا الطريقتين قياس درجة الحرارة هذه بشكل مباشر.

ما يمكنهم فعله هو قياس درجة انصهار الحديد عند ضغوط منخفضة قليلاً ومحاولة الاستقراء لأسفل. لكن لا تزال هناك صعوبات. ليس أقلها أنّ النواة ليست من الحديد النقي، والشوائب يمكن أن تؤثر على نقطة الانصهار. وضعت الحسابات النظرية حد النواة الداخلية عند نحو 6500 درجة مئوية للحديد النقي، وربما 5100 – 5500 درجة مئوية للحديد مع النطاق المحتمل للشوائب في النواة.



يُعتقد أن الطاقة الحرارية المتدفقة من نواة الأرض تؤدي إلى حركات بطيئة ودائرية وحملية للمواد داخل الوشاح (الأسهم الحمراء). ويعتقد أن هذه الطاقة بدورها تقود حركة الصفائح التكتونية على سطح الأرض.

ماذا سيحدث إذا برّدنا نواة الأرض؟

الخبر الجيد هو أن البراكين لن تتدلع بعد ذلك، وبدون أي شيء يمدها بالطاقة، ستتوقف القارات عن الانزياح والتصادم والتسبب في الزلازل.

ولكن الخبر السيئ هو أن الجزء الداخلي الساخن للأرض يعيد تدوير الكربون الضروري للحياة، ويحافظ أيضاً على سائل النواة الخارجية للأرض، وهو أمر ضروري للحفاظ على المجال المغناطيسي لكوكبنا. دون ذلك، سنكون عرضة للإشعاع الشمسي والكوني القادم، وبالتالي إصابة الكائنات وتعرض الخلايا الحية للتلف.

التصوير المقطعي الزلزالي Seismic Tomography

التصوير المقطعي الزلزالي هو تقنية لتصوير باطن الأرض بالموجات الزلزالية الناتجة عن الزلازل أو الانفجارات. يمكن استخدام الموجات P- و S- والموجات السطحية لنماذج التصوير المقطعي بدرجات دقة مختلفة بناءً على الطول الموجي الزلزالي ومسافة مصدر الموجة وتغطية مصفوفة جهاز قياس الزلازل. تُستخدم البيانات الواردة في أجهزة قياس الزلازل لحل مشكلة عكسية، حيث يتم تحديد مواقع انعكاس وانكسار مسارات الموجات. يمكن استخدام هذا الحل لإنشاء صور ثلاثية الأبعاد للاختلالات في السرعة، التي يمكن تفسيرها على أنها اختلافات هيكلية أو حرارية أو تركيبية. يستخدم علماء الجيولوجيا هذه الصور لفهم العمليات التكتونية الأساسية والصفائح بشكل أفضل. تعتمد سرعة انتقال الأمواج على نوع المادة التي تنتقل عبرها. تنتقل الموجات بشكل أسرع عبر المواد الباردة والقاسية، مثل الصفيحة التي تنغمس في الوشاح، وأبطأ من خلال المواد الأكثر دفئاً، مثل الصخور الساخنة التي ترتفع إلى السطح.

النظـــريـــة

تم حل التصوير المقطعي كمشكلة عكسية. تتم مقارنة بيانات وقت السفر الزلزالية بنموذج الأرض الأولي ويتم تعديل النموذج حتى يتم العثور على أفضل ملاءمة ممكنة بين تنبؤات النموذج والبيانات المرصودة. تنتقل الموجات الزلزالية في خطوط مستقيمة إذا كانت الأرض ذات تكوين موحد، لكن الطبقات التركيبية والبنية التكتونية والتغيرات الحرارية تعكس الموجات الزلزالية وتخترقها. يمكن حساب موقع وحجم هذه الاختلافات من خلال عملية الانعكاس، على الرغم من أن حلول الانقلاب المقطعي ليست فريدة من نوعها.

التصوير المقطعي الزلزالي مشابه للتصوير المقطعي بالأشعة السينية الطبية (CT scan) من حيث أن الكمبيوتر يعالج بيانات جهاز الاستقبال لإنتاج صورة ثلاثية الأبعاد، على الرغم من أن التصوير المقطعي المحوسب يستخدم التوهين بدلاً من اختلاف وقت السفر. يجب أن يتعامل التصوير المقطعي الزلزالي مع تحليل مسارات الأشعة المنحنية التي تنعكس وتنكسر داخل الأرض وعدم اليقين المحتمل في موقع مركز الزلزال. تستخدم الأشعة المقطعية الأشعة السينية الخطية ومصدر معروف.

المعالجة

يستخدم التصوير المقطعي الزلزالي السجلات الزلزالية لإنشاء صور ثنائية وثلاثية الأبعاد للشذوذ تحت السطحي عن طريق حل المشكلات العكسية الكبيرة مثل التي تولد نماذج متوافقة مع البيانات المرصودة. تُستخدم طرق مختلفة لحل الانحرافات في القشرة والغلاف الصخري، والعباءة الضحلة، والعباءة الكاملة، واللب بناءً على توافر البيانات وأنواع الموجات الزلزالية التي تخترق المنطقة بطول موجة مناسب لتحليل الميزة. دقة النموذج محدودة بتوافر ودقة البيانات الزلزالية ونوع الموجة المستخدمة والافتراضات الواردة في النموذج.

تُستخدم بيانات الموجة P في معظم النماذج المحلية والنماذج العالمية في المناطق ذات الكثافة الكافية من الزلازل وجهاز قياس الزلازل. تُستخدم بيانات S- وبيانات الموجات السطحية في النماذج العالمية عندما لا تكون هذه التغطية كافية، كما هو الحال في أحواض المحيطات وبعيداً عن مناطق الاندساس. تعد أوقات الوصول الأول هي الأكثر استخداماً، ولكن يتم استخدام النماذج التي تستخدم الأطوار المنعكسة والمنكسرة في نماذج أكثر تعقيداً، مثل تلك التي تصور القلب. يتم أيضا استخدام أوقات السفر التفاضلية بين أطوار الموجة أو الأنواع.

التطبيـــــــق

يمكن للتصوير المقطعي الزلزالي حل التباين وعدم المرونة والكثافة وسرعة الصوت. قد تكون الاختلافات في هذه المعلمات نتيجة للاختلافات الحرارية أو الكيميائية، التي تُعزى إلى عمليات مثل أعمدة الوشاح، والألواح المندسة، وتغيرات الطور المعدني. تشمل الميزات الأكبر حجماً التي يمكن تصويرها باستخدام التصوير المقطعي السرعات العالية تحت الدروع القارية والسرعات المنخفضة تحت مراكز انتشار المحيط.

البقـع الســـــاخنة Hot Spots

تقترح فرضية عمود الوشاح أن مناطق النشاط البركاني التي لم يتم تفسيرها بسهولة بواسطة الصفائح التكتونية، والتي تسمى النقاط الساخنة، هي نتيجة للانبعاث الحراري من أعمـــــــــاق حد الوشـــــــاح الأســـــاسي الذي أصبح حفاضات Diapir في القشرة. هذه نظرية مثيرة للجدل، على الرغم من أن الصور المقطعية تشير إلى وجود حالات شاذة تحت بعض النقاط الساخنة. أفضل ما تم تصويره هو المقاطعات الكبيرة ذات سرعة القص المنخفضة، أو الأعمدة الفائقة، التي يمكن رؤيتها على نماذج الموجة S في الوشاح السفلي ويعتقد أنها تعكس الاختلافات الحرارية والتركيبية.

مناطـــق الاندســـــاس

الصفائح المندرجة أبرد من الوشاح الذي تتحرك إليه. هذا يخلق شذوذاً سريعاً يمكن رؤيته في الصور المقطعية. تم تصوير كل من صفيحة فارالون التي هبطت تحت الساحل الغربي لأمريكا الشمالية والجزء الشمالي من الصفيحة الهندية التي هبطت تحت آسيا بالتصوير المقطعي.

العيـــــــوب

توسعت شبكات الزلازل العالمية بشكل مطرد منذ الستينيات، لكنها لا تزال مركزة في القارات والمناطق النشطة زلزاليّاً. المحيطات، ولا سيما في نصف الكرة الجنوبي، غير مغطاة بالقدر الكافي. ستتحسن النماذج المقطعية في هذه المناطق عند توفر المزيد من البيانات. يؤدي التوزيع غير المتكافئ للزلازل بشكل طبيعي إلى تحيز النماذج إلى دقة أفضل في المناطق النشطة زلزاليّاً.

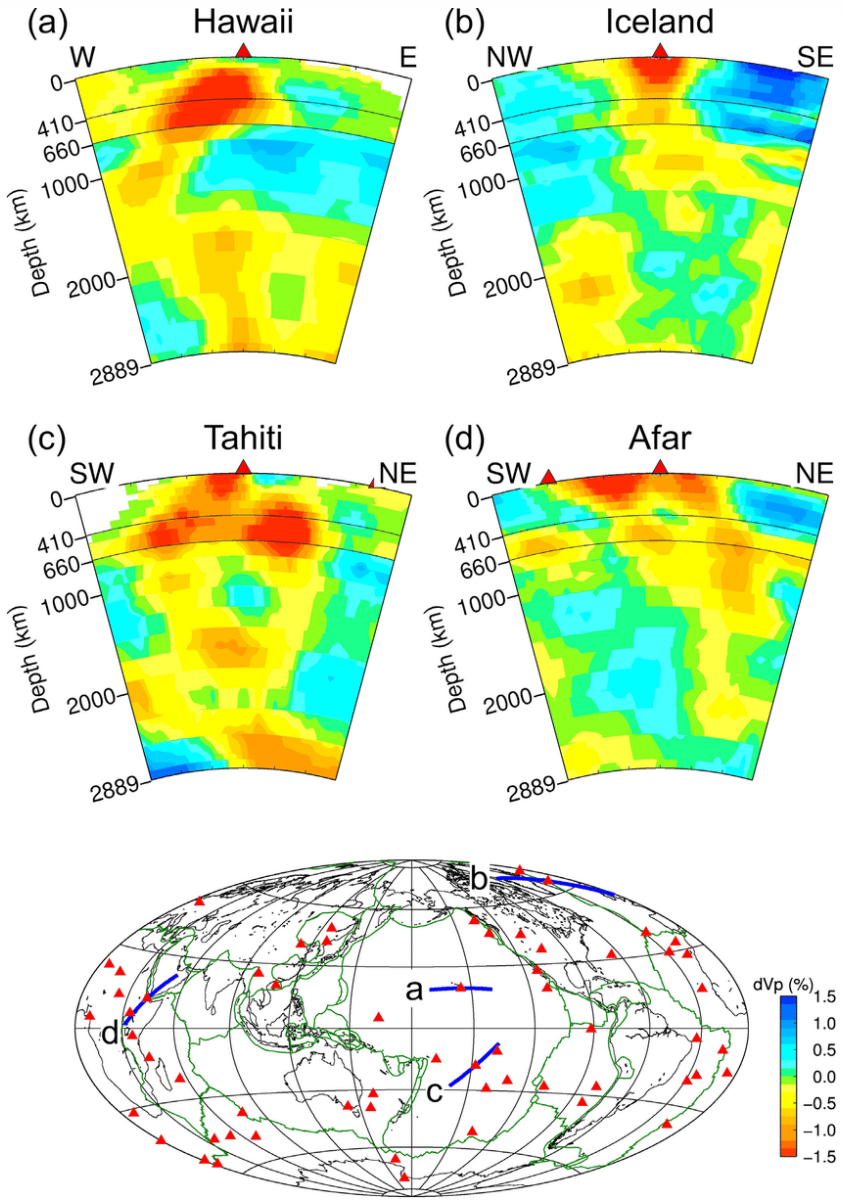
يحد نوع الموجة المستخدمة في النموذج من الدقة التي يمكن أن تحققها. الأطوال الموجية الأطول قادرة على اختراق عمق الأرض، ولكن لا يمكن استخدامها إلا لحل الميزات الكبيرة. يمكن تحقيق دقة أدق باستخدام الموجات السطحية، مع مقايضة عدم إمكانية استخدامها في نماذج الوشاح العميق. يؤدي التباين بين الطول الموجي ومقياس الميزة إلى ظهور حالات شاذة ذات حجم وحجم منخفضين في الصور. تستجيب نماذج P- و S-wave بشكل مختلف لأنواع الحالات الشاذة اعتماداً على خاصية مادة القيادة. تفضل النماذج المستندة إلى وقت الوصول الأول بشكل طبيعي المسارات الأسرع، مما يتسبب في انخفاض دقة النماذج القائمة على هذه البيانات للميزات البطيئة (الساخنة غالباً). يجب أن تأخذ النماذج الضحلة أيضاً في الاعتبار التغيرات الكبيرة في السرعة الجانبية في القشرة القارية.

يوفر التصوير المقطعي الزلزالي الحالات الشاذة الحالية فقط في السرعة. أي هياكل سابقة غير معروفة ومعدلات الحركة البطيئة في باطن الأرض (مم إلى سم في السنة) تمنع دقة التغييرات على النطاقات الزمنية الحديثة.

حلول التصوير المقطعي ليست فريدة من نوعها. على الرغم من أنه يمكن استخدام الأساليب الإحصائية لتحليل صحة النموذج، فإن عدم اليقين الذي لا يمكن حله لا يزال قائماً. هذا يساهم في صعوبة مقارنة صحة نتائج النموذج المختلفة.

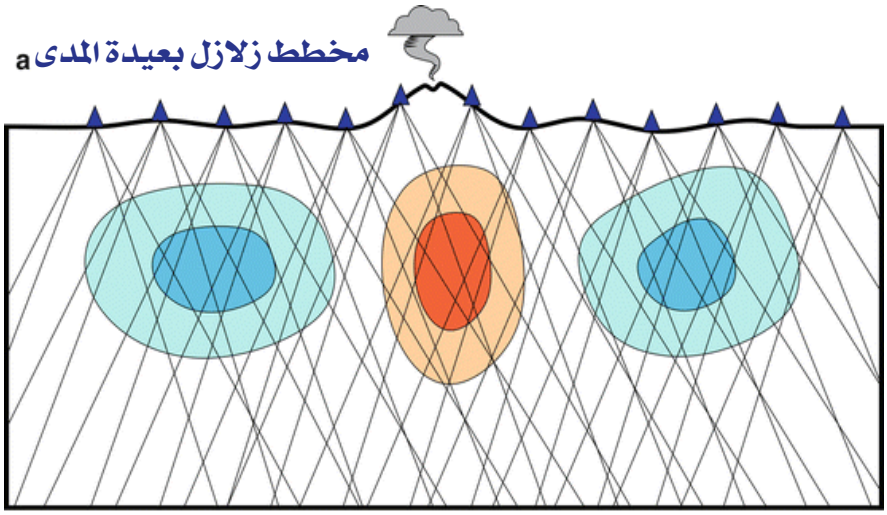
تحد القدرة الحاسوبية من كمية البيانات الزلزالية وعدد المجهول وحجم الشبكة والتكرارات في نماذج التصوير المقطعي. هذا له أهمية خاصة في أحواض المحيطات، التي بسبب تغطية الشبكة المحدودة وكثافة الزلازل تتطلب معالجة أكثر تعقيداً للبيانات البعيدة. تتطلب النماذج المحيطية الضحلة أيضاً حجماً شبكيّاً أصغر للنموذج نظراً لقشرة القشرة الرقيقة.

عادةً ما يتم تقديم الصور المقطعية مع منحدر لوني يمثل قوة الحالات الشاذة. ينتج عن ذلك إجراء تغييرات متساوية تظهر بأحجام مختلفة بناءً على الإدراك البصري للون، مثل التغيير من البرتقالي إلى الأحمر الذي يكون أكثر دقة من الأزرق إلى الأصفر. يمكن أن تؤدي درجة تشبع اللون أيضاً إلى انحراف التفسيرات بصريّاً. يجب مراعاة هذه العوامل عند تحليل الصور.

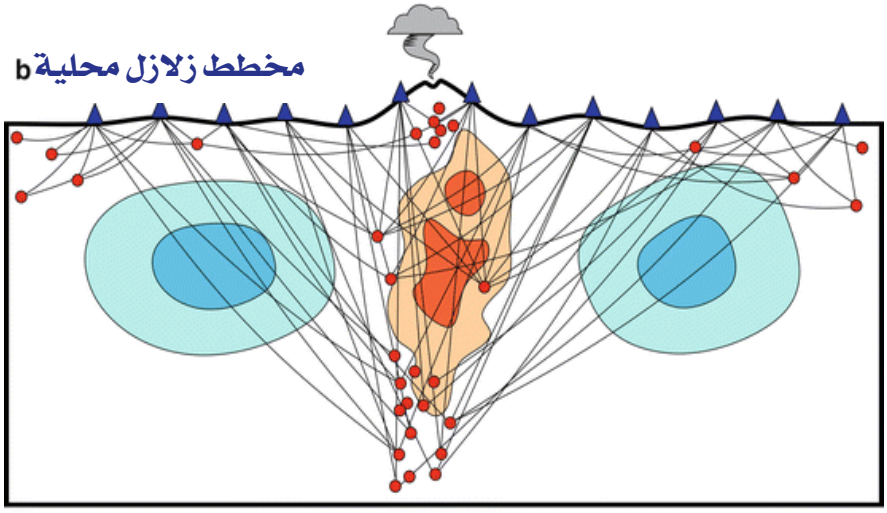


المقاطع العرضية الرأسية للتصوير المقطعي على شكل V أسفل (أ) هاواي، (ب) أيسلندا، (ج) تاهيتي و (د) النقاط الساخنة لعفار (مثلثات حمراء) على طول الملامح الأربعة كما هو موضح في خريطة العالم. تشير الخطوط الخضراء على الخريطة إلى حدود اللوحة.

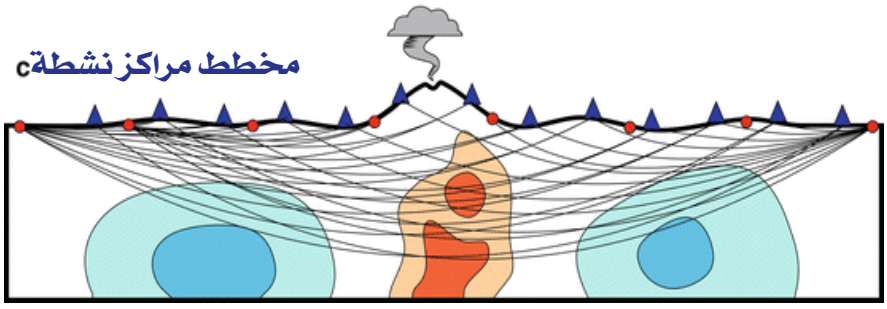
a مخطط زلازل بعيدة المدى



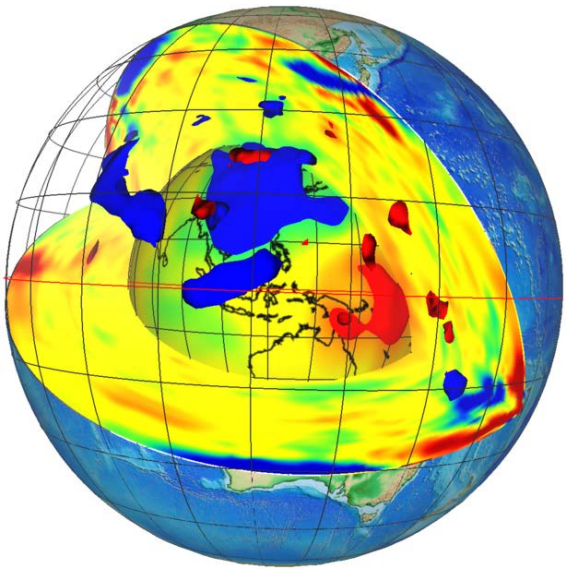
b مخطط زلازل محلية



c مخطط مراكز نشطة



بالنسبة للبراكين، يبدو أن إحدى المعاملات الرئيسة هي نسبة Vp / Vs التي يمكن استخدامها لتقييم محتوى السوائل والذوبان. إلى جانب توزيعات السرعة، قد يوفر التصوير المقطعي الزلزالي معلومات عن تباين البارامترات الزلزالية التي تساعد في دراسة الضغوط الإقليمية والتركيبات الجيولوجية الفضائية.



توفر اليوم تقنية التصوير المقطعي الزلزالي المحوسب صوراً لشرائح باطن الأرض من خلال تحليل حركة الموجات الزلزالية. يمكن استخدامه لتتبع عمليات مثل الحمل الحراري في الوشاح. هنا تصوير مقطعي زلزالي محوسب تحت اليابان.

كما يكشف التصوير الزلزالي عن سمات أصغر تشبه انبثاقاً صهاريّاً يمتد إلى أعلى في الروافد العُليا من الوشاح تحت أيسلندا وهاواي، وهو ما قد يفسر وجود هاتين الجزيرتين ونشاطهما البركاني.

التذبذب الحر للأرض Free Oscillation of the Earth

لقد بشر زلزال شيلي العنيف الذي حدث في مايو عام 1960 بتطورات هامة في مجال دراسات باطن الأرض. بالإضافة إلى الموجات P ، S والموجات السطحية التي انبعثت منه اكتشف ولأول مرة في التاريخ سلسلة من التذبذب الحر للأرض كلها. إن هذا الزلزال قد هز الأرض كوحدة مستقلة كالجرس تماماً. وفي عام 1935 تمكن العالم بنيوف من تطوير جهاز سيزموجراف (جهاز التقاط موجات الزلازل وتسجيلها) قادر على الكشف عن التغير في الانفعال في الأرض وأمكن تسجيل الحركات الأرضية ذات الزمن الدوري الذي في حدود ساعة أو أكثر. وفوراً بعد الزلزال الكبير في جزيرة كمشاتكنا في شرقي سيبريا في عام 1952 أوضحت تسجيلات أحد الأجهزة اهتزازات زمنها الدوري تقريباً ساعة وعزاها بنيوف إلى التذبذب الحر للأرض. تعطي الأجراس أصواتاً نتيجة لتداخل أنواع عديدة من اهتزازاتها. والأرض تشبه ذلك فإنها تهتز بأنظمة عديدة عند إثارتها بطريقة مناسبة. واهتزازاتها تنخرط تحت نموذجين الأول كروي والثاني التوائي ولكل منهما عدة طرازات أساسية ذات أنغام عديدة. وزمن الذبذبة لا بُدَّ وأن يعطي قيمة معها يجب أن تتفق توزيعات كثافة الأرض وعدم انضغاطيتها وصلابتها. هذا وبينما بيانات الموجات P ، S تعطي قيماً لمعاملات المرونة والكثافة فإن التذبذب الحر غير مرتبط بكل قيمة لهذه المعاملات على حدة.

بيانات التذبذب الحر للأرض قد ساهمت في الحصول على دلائل تؤكد صلابة اللب الداخلي للأرض وذلك وجود المنطقة الانتقالية . توضح نتائج التذبذب الحر للأرض أن أنسب قيمة ممثلة لمتوسط سمك القشرة الأرضية هي في حدود 15 كم. وفي معظم أجزاء الوشاح السفلي واللب الخارجي فإن بيانات الاهتزاز الحر تتفق مع الكثافة والانحدار في قيم الموجتين P ، S.

كان التذبذب الحر للأرض في الماضي ظاهرة عابرة تحدث بعد الزلازل الكبيرة. يُظهر تحليل سجلات الزلازل ذات الحركة القوية أن الأرض تتذبذب بحرية عند مستوى يمكن ملاحظته حتى في الفترات غير النشطة زلزالياً. التذبذبات المرصودة هي الأنماط الكروية الأساسية عند ترددات بين 2 و 7 ملي هرتز.

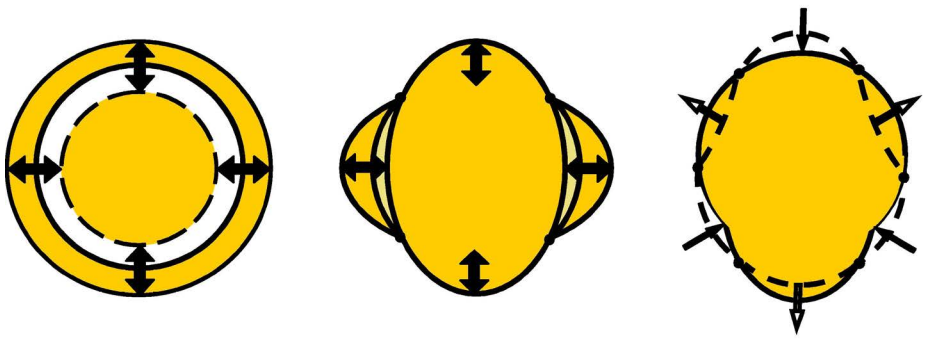
يعتمد على متوسطات واسعة من المعاملات الهيكلية للأرض - لا تتأثر بقيود تغطية البيانات بسبب التوزيع غير المتكافئ للزلازل والمحطات. يوفر طريقة لحساب مخططات الزلازل النظرية - مرشحات تمرير منخفضة جوهرية لبنية الأرض.

بشكل عام، تتوافق هذه التذبذبات (الأوضاع العادية Normal Modes) مع الموجات السطحية الواقفة لأطول موجة ممكنة وأقل تردد (فترات تصل إلى حوالي ساعة واحدة). أطول فترة من التذبذبات هي فقط متحمس بطريقة قابلة للقياس من قبل أكبر الزلازل. تشكل المجموعة الكاملة من الأوضاع العادية أساساً لوصف أي إزاحة مرنة عامة يمكن أن تحدث داخل الأرض، وتُستخدم هذه الخاصية لحساب مخططات الزلازل النظرية للموجات السطحية طويلة المدى. على غِرار الفصل بين موجات السطح (لوف ورايلي) .

يعد التذبذب الحر للأرض أحد أكثر الظواهر إثارة للاهتمام في علوم الأرض. نوعان مختلفان من التذبذب الحر للأرض؛ توجد أوضاع كروية تقابل موجات رايلي وحلقية تقابل موجات لوف (تسمى أيضاً الالتوائية). بينما يتكون إزاحة الوضع الكروي من مكونات شعاعية (رأسية) وعرضية (أفقية)، فإن الوضع الحلقي يكون عرضيّاً بحتّاً.

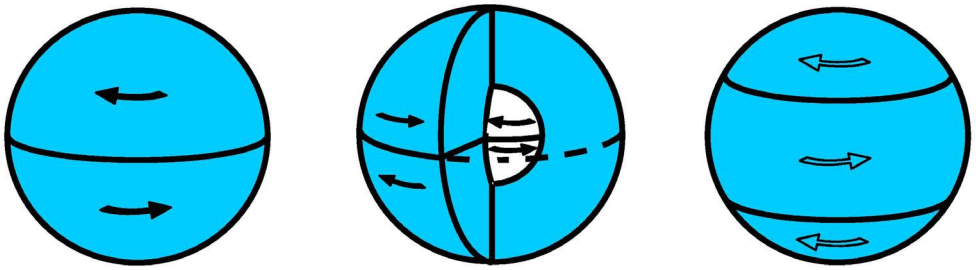
هناك نوعان من الأوضاع العادية Normal Modes

الأوضاع الكروية مماثلة للأنماط مع حركة P-SV و مشابهه لموجات رايلي

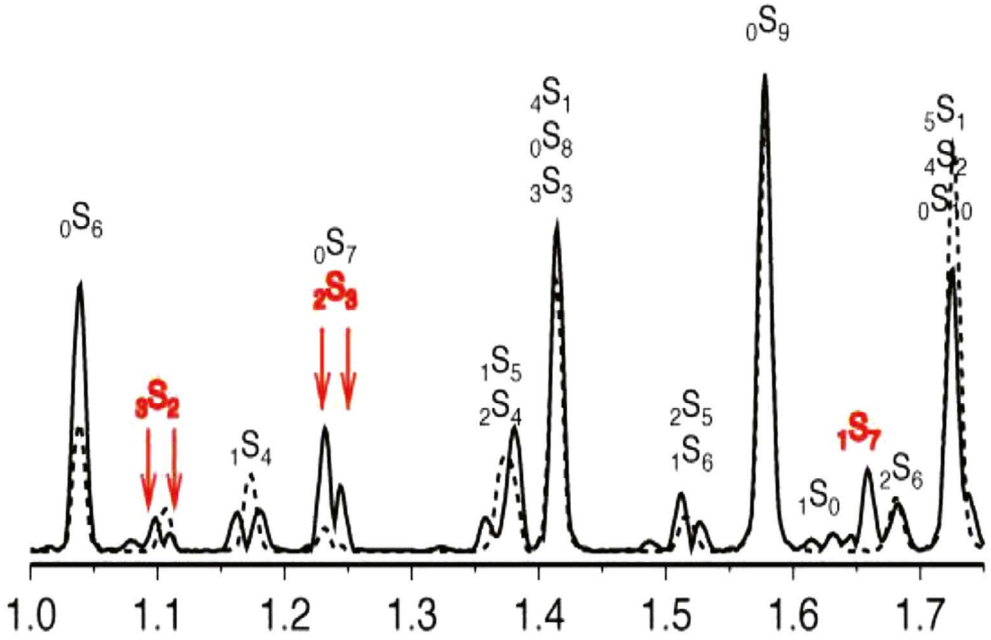


Spheroidal modes ${}_0S_0$ (20.5 min), ${}_0S_2$ (53.9 min) and ${}_0S_3$ (25.7 min)

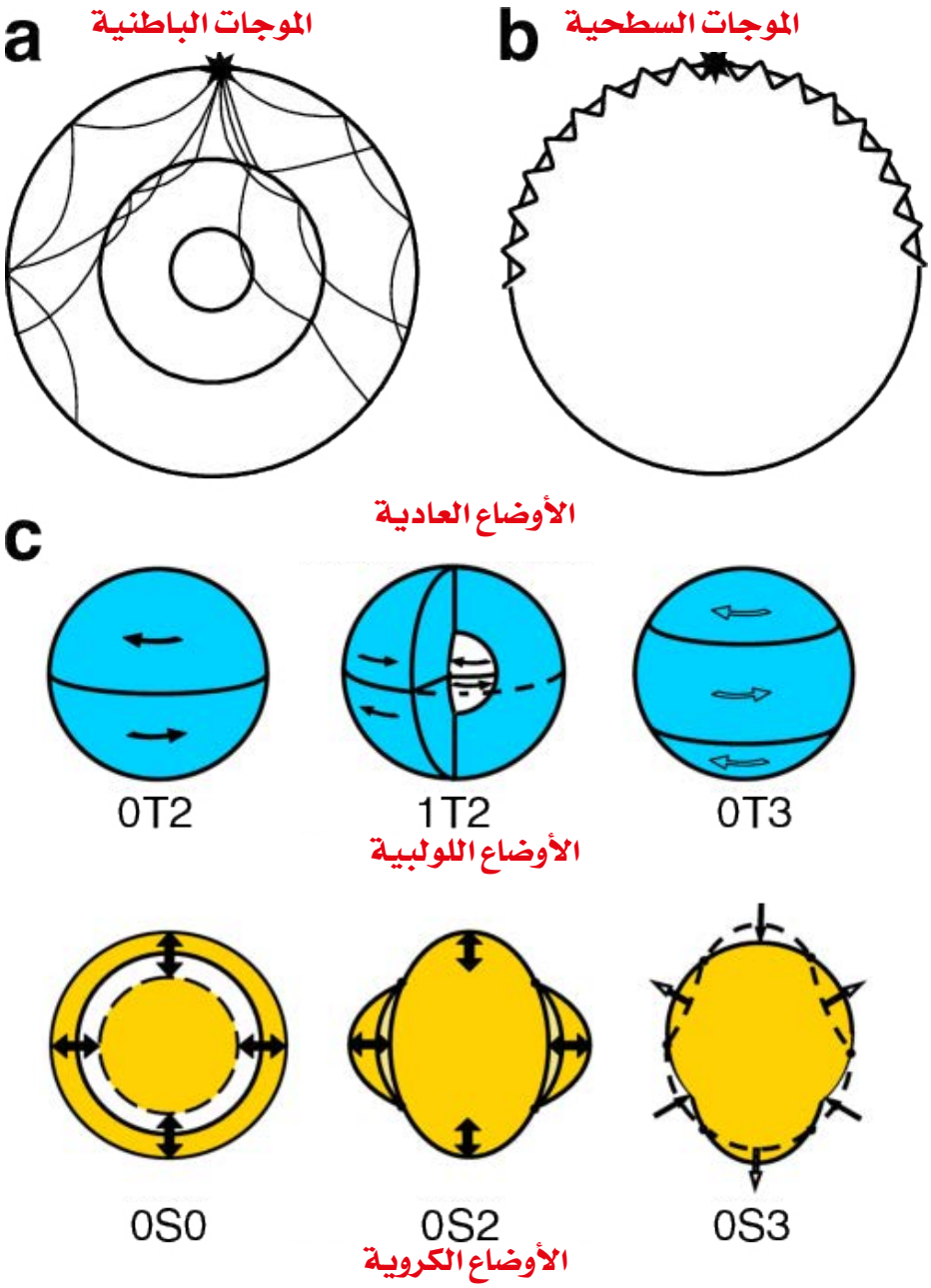
الأوضاع اللولبية مماثلة لموجات الحب أو حركة SH



Toroidal modes ${}_0T_2$ (44.2 min), ${}_1T_2$ (12.6 min) and ${}_0T_3$ (28.4 min)



عملت مقاييس الضغط ومقاييس الجاذبية ومقاييس الزلازل عريضة النطاق دوراً في مراقبة إشارات التذبذب الحر. تحتوي هذه الأدوات على نسب إشارة إلى ضوضاء S/N جيدة في نطاقات التردد المقابلة. ومع ذلك، لم يتم استخدام النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS) لهذا الغرض على الرغم من مزاياه المتمثلة في المراقبة المكونة من ثلاثة مكونات في الإزاحة والاستجابة الترددية المسطحة عند 0 هرتز. إذا قللنا الكثير من الضوضاء الموجودة في السلسلة الزمنية لنظام تحديد المواقع العالمي (GPS) ، فستكون أداة GPS أداة قوية لاكتشاف إشارات الإزاحة الصغيرة عن طريق التذبذب الحر وكذلك الموجات الزلزالية.



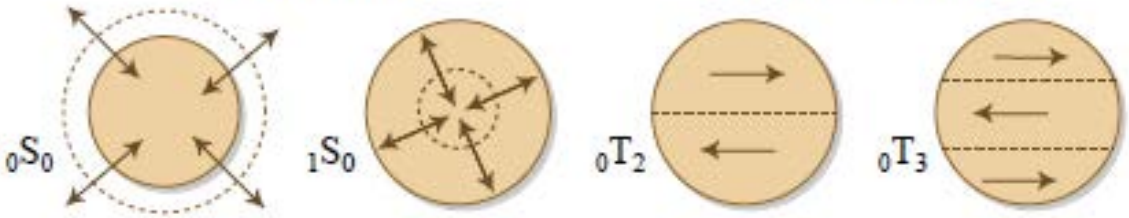
أنواع البيانات الزلزالية المستخدمة لبناء النماذج المرجعية.

a **تنتقل موجات الجسم عبر الأرض**، لذلك يمكنها أخذ عينات من جميع الأعماق على الرغم من أن الدقة الجانبية محدودة من خلال موقع المصادر والمستقبلات. تعتبر موجات الجسم قصيرة نسبيّاً (~ 1 ثانية للموجات P، ~ 10–30 ثانية للموجات S) وحساسة للبنية على طول مسارات الأشعة الضيقة (فقط المنطقة الضيقة التي تنتقل الموجة من خلالها).

b. **تكون الموجات السطحية** محاصرة على سطح الأرض، وبالتالي فهي أكثر حساسية للبنية الضحلة، على الرغم من أن الموجات السطحية الأطول يمكن أن تحل بنية أعمق. تتراوح فترات الموجات السطحية عادةً بين 20 و250 ثانية، وتكون أطوالها الموجية أطول، ولذا فهي تأخذ عينات من مناطق أوسع. أنها توفر أخذ عينات من الوشاح العلوي في أحواض المحيطات، التي لم تحلها موجات الجسم بسبب عدم وجود محطات الزلازل في المحيطات.

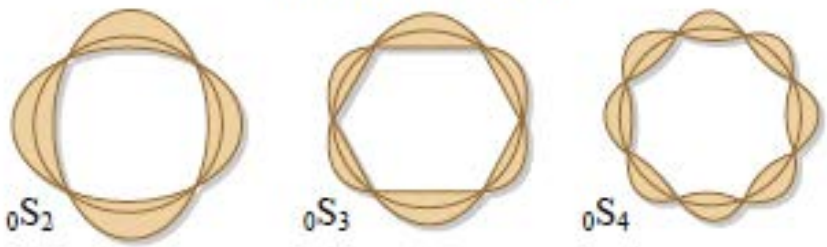
c. **الأنماط العادية لمعروفة** أيضاً باسم (التذبذبات الحرة) هي تذبذبات الأرض الكاملة حيث تتشوه الأرض بأكملها بترتيب متناسق على فترات طويلة جدّاً. تنجم الأنماط العادية عن تراكب الموجات السطحية وهي إما حركات ملتوية (أوضاع حلقية) أو حركات متموجة (أوضاع كروية). إنها حسَّاسة لكامل بنية الأرض (بما في ذلك الكثافة) مع القليل من التحيز المكاني ولكن لها عمق محدود.

الحركات الحلقية (اللولبية)

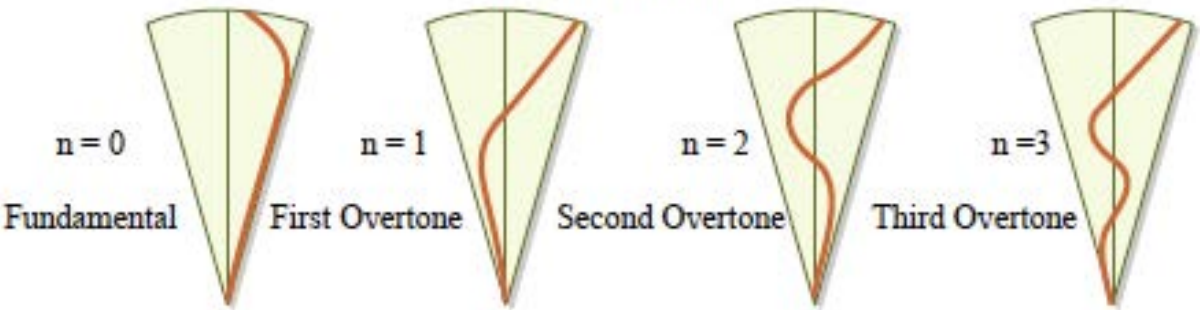


الأنماط الشعاعية

الأنماط السطحية



الأنماط الشعاعية



هذه أوضاع بسيطة ثلاثية الأبعاد. الاساسيان الوضع الأساسي ليس له تقاطع صفري في السعة
(ملاحظة: يشبه إلى حد ما وظيفة الحساسية لموجات السطح!)

Toroidal Modes

إذا كانت الأرض متناظرة كروياً تماماً وغير دوارة، فكلها متفردة

في المضاعفات سيكون لها نفس التردد (يسمى الانحطاط degeneracy).

على سبيل المثال، فترة nTl سيكون 0 هو نفسه لـ nTl 2، nTl1 إلخ.

في الأرض الحقيقية، تختلف الترددات المفردة (تسمى الانقسام splitting).

Spheroidal Modes

إذا كانت الأرض متناظرة كرويّاً تماماً وغير دوارة، فكلها متفردة

في المضاعفات سيكون لها نفس التردد (يسمى الانحطاط degeneracy).

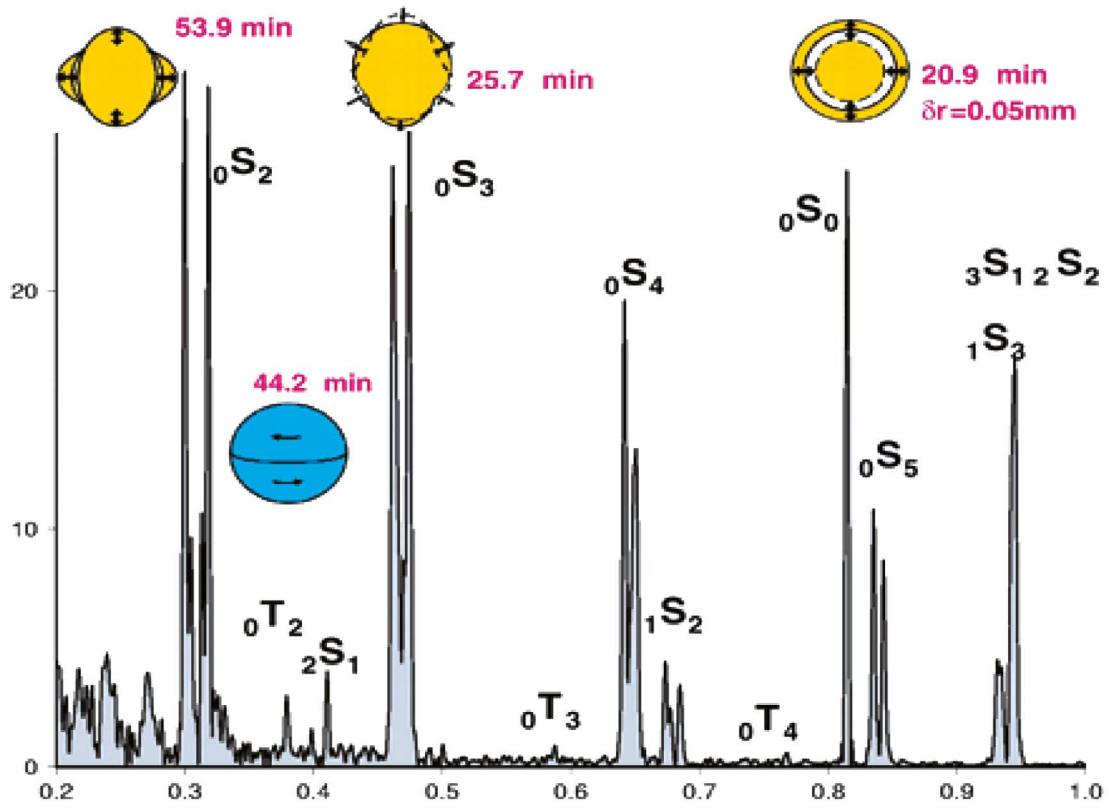
على سبيل المثال، فترة nSl سيكون 0 هو نفسه لـ nSl 2، nSl1 إلخ.

في الأرض الحقيقية، تختلف الترددات المفردة (تسمى الانقسام splitting).

وضع (التنفس) $_0S_0$

يتضمن حركات شعاعية من الأرض كلها بالتناوب بين التوسع والانكماش.

نحن ننظر إلى الأوضاع العادية في مجال التردد. فيما يلي ملاحظة لبعض تذبذبات الوضع العادي ذات التردد المنخفض الناتجة عن زلزال سومطرة 2004.


53.9 min
25.7 min
20.9 min
δr=0.05mm
44.2 min
$_0S_2$
$_0S_3$
$_0S_0$
$_0S_4$
$_3S_1$ $_2S_2$
$_1S_3$
$_0S_5$
$_0T_2$
$_2S_1$
$_0T_3$
$_1S_2$
$_0T_4$
0
10
20
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0

موسوعة العمري في علوم الأرض

المراجـــــع

Adams, Simon, & Lambert, David, (2006), Earth Science: An Illustrated Guide to Science, Chelsea House, New York.

Feather Jr., Ralph M., & Zike, Dinah, (2005), Earth Materials and Processes, Glencoe/McGraw-Hill, Columbus.

How It Works Book of Incredible Earth, (2014), Volume 1, 2nd Revised Edition, Imagine Publishing Ltd., Bournemouth.

Our Planet, New Scientist, (2015), Reed Business Information Ltd, England.

Picturepedia, DK, (2015), London.

Redfern, Martin, (2003), The Earth: A Very Short Introduction, Oxford University Press, Oxford.

Romaine, Garret, (2017), Geology lab for kids, Quarto Publishing Group USA Inc., Beverly.

Science! Knowledge Encyclopedia, DK, Smithsonian Institution, (2018), London.

Super Earth Encyclopedia, DK, Smithsonian Institution, (2017), London.

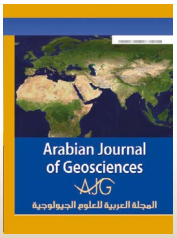
The New Children's Encyclopedia, DK, (2009), London.

Violent Earth, DK, Smithsonian Institution, (2011), London.

أ.د. عبد الله بن محمد العمري

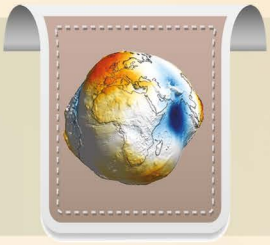
www.alamrigeo.com E.mail : alamri.geo@gmail.com Cell : +966505481215

المناصب الإدارية والفنية	❖ دكتوراه في الجيوفيزياء عام 1990 م من جامعة مينيسوتا - أمريكا. ❖ المشرف على مركز الدراسات الزلزالية- جامعة الملك سعود. ❖ المشرف على كرسي استكشاف الموارد المائية في الربع الخالي. ❖ المشرف على مركز الطاقة الحرارية الارضية بجامعة الملك سعود. ❖ رئيس الجمعية السعودية لعلوم الأرض. ❖ رئيس قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود. ❖ مؤسس ورئيس تحرير المجلة العربية للعلوم الجيولوجية AJGS. ❖ رئيس فريق برنامج زمالة عالم مع جامعة أوريغون الحكومية الأمريكية ومعهد ماكس بلانك الألماني.
الاستشارات والعضويات	● مستشار مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية. ● مستشار هيئة المساحة الجيولوجية وهيئة المساحة العسكرية والدفاع المدني. ● مستشار مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة. ● مستشار هيئة الرقابة النووية والإشعاعية. ● باحث رئيس في عدة مشاريع بحثية مدعمه من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية وشركة أرامكو. ● باحث رئيس في مشاريع مدعمه من وزارة الطاقة الأمريكية وجامعة كاليفورنيا ومعمل ليفرمور الأمريكي LLNL. ● عضو الجمعية الأمريكية للزلازل. ● عضو الاتحاد الأمريكي للجيوفيزياء. ● عضو الاتحاد الأوروبي للجيولوجيين. ● عضو لجنة كود البناء السعودي وعضو المنتدى الخليجي للزلازل GSF. ● عضو لجنة تخفيف مخاطر الزلازل في دول شرق البحر الأبيض المتوسط RELEMR. ● باحث رئيسي ومشارك في مشاريع بحثية مع جامعات الاباما وبنسلفانيا وأوريغون الامريكية. ● ضمن قائمة (المنجزون البارزون العرب) من قِبل منظمة ريفاسيمنتو الدولية. ● ضمن قائمة Who's Who في قارة آسيا للتميز العلمي. ● ضمن قائمة Who's Who في العالم للإسهامات العلمية.
النشر العلمي والتأليف	❖ نشر أكثر من **180** بحثاً علميًا في مجلات محكمة. ❖ ألف **30** كتاباً علمياً. ❖ أصدر موسوعة رقمية في علوم الأرض من **14** مجلداً و**107** ملفات علمية.
المشاريع البحثية	❁ **أنجز 40** مشروعاً بحثياً محلياً و **16** مشروعاً بحثياً دولياً و **74** تقريراً فنياً.
المؤتمرات والندوات	❁ شارك في أكثر من **125** مؤتمراً محلياً ودولياً و **75** ندوة وورشة عمل متخصصة.
التعاون الدولي	❁ باحث رئيسي في **13** مجموعة عمل أمريكية وألمانية.
الجوائز	❖ حصل على جائزة المراعي للإبداع العلمي عام 2005 م. ❖ حصل على جائزة التميز الذهبي من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم و التقنية عام 2006 م. ❖ حصل على جائزة أبها التقديرية للإسهامات العلمية عام 2007م. ❖ حصل على جائزة جامعة الملك سعود للتميز العلمي عام 2013 م. ❖ حصل على جائزة الاتحاد الامريكي للجيوفيزياء للتعاون الدولي والنشاط البحثي عام 2013 م. ❖ حصل على جائزة جامعة السلطان قابوس للإسهامات العلمية عام 2013 م. ❖ حصل على جائزة الملك سعود لإدراج المجلة العربية للعلوم الجيولوجية في قائمة الـ ISI. ❖ حصل على جائزة أفضل رئيس تحرير مجلة علمية عام 2017 من الناشر الألماني SPRINGER. ❖ حصل على جائزة ألبرت نيلسون ماركيز للإنجاز مدى الحياة عام 2018 من منظمة Who's Who العالمية.
دروع التكريم	❖ حصل على **85** درعاً تكريمياً وشهادات تقدير من المملكة وعمان والكويت والإمارات والأردن ومصر وتونس والجزائر وألمانيا وأمريكا.



موسوعة العمري في علوم الأرض

Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences



1 تقدير عمر الأرض

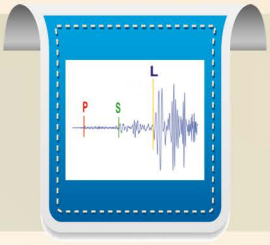
2 شكل الأرض وحركتها

3 الجاذبية الأرضية وتطبيقاتها

4 التركيب الداخلي للأرض

5 المعادن والتعدين

6 المد والجزر



7 موجات التسونامي

8 الزلازل والتفجيرات

9 تقييم مخاطر الزلازل

10 البراكين وسبل مجابهتها

11 جيولوجية القمر

12 الأغلفة المحيطة بالأرض

13 المشاكل البيئية وحلولها

14 التغيرات المناخية والاحتباس الحراري

15 التشجير التحديات والحلول

16 الانزلاقات والانهيارات والفيضانات

17 السيول والسدود المائية

18 التصحر والجفاف

19 هل انتهى عصر النفط؟

20 الطاقة الحرارية الأرضية

21 الجيولوجيا السياسية

22 الجيوفيزياء النووية

23 الجيولوجيا الطبية

24 كتابة الرسائل والمشاريع الجيولوجية

25 321 سؤال وجواب في تطور الأرض

26 325 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء

27 358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية

28 380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية

29 303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلزالية الهندسية

30 300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية

www.alamrigeo.com