

الزلازل

و

التفجيرات

عبد الله بن محمد العمري

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - كلية العلوم - جامعة الملك سعود





ح عبد الله بن محمد العمري، ١٤٤٣هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

العمري ، عبدالله بن محمد سعيد

كتاب الزلازل والتفجيرات. / عبدالله بن محمد سعيد العمري -

ط١. - الرياض، ١٤٤٣هـ

٢٠٨ ص ، ٥ ، ٢١ X ٢٨

ردمك: ٣-٠٦٢٠-٠٤-٦٠٣-٩٧٨

١ - الزلازل ٢ - المتفجرات أ. العنوان ب. الموسوعة

١٤٤٣ / ٨١٩٠

ديوي ٥٥١،٢٢

رقم الإيداع ١٤٤٣ / ٨١٩٠

ردمك: ٣-٠٦٢٠-٠٤-٦٠٣-٩٧٨

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





سُبْحَانَ اللَّهِ الرَّعْمَرِيِّ الرَّعْمَرِيِّ

مَهَيَّبِك

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 **خمس أجزاء رئيسية**؛

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

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

أما **الجزء الثاني** 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 مجابتهها |
| 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 | التصحّر والجفاف |
| التغيرات المناخية والاحتباس الحراري | السيول والسدود المائية |

الجزء الرابع من الموسوعة مكون من ستة كتب يناقش ارتباط علوم الأرض بالعلوم الأخرى سياسياً ونوويًا 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 والزلازل الهندسية
- 300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية

المؤلف





مقدمة

تُعد **الظواهر الطبيعية** مثل الزلازل والبراكين والرياح والأعاصير والانزلاقات الأرضية والتصحر وغيرها أحد **مظاهر الحياة** على كوكب الأرض كما أنها أحد أهم أدوات **البناء والهدم** التي تتطلبها مقومات **التجديد لحفظ التوازن** على هذا **الكوكب**. وبالتحديد هناك عوامل أُطلق عليها **عوامل هدم** وهي التي تحدث على سطح الأرض وتسوي المرتفعات والصخور **من خلال** عمليات الحت والتعرية **مثل** الرياح والأمطار؛ وهناك **عوامل** تحدث في باطن الأرض وتظهر نتائجها على **سطح الأرض**، ويُطلق عليها **عوامل بناء** لكونها تُخرج مواد مصهورة من **باطن الأرض**، وترمي بها على سطح الأرض **مكونةً** جبالاً ومرتفعاتٍ، وهي **البراكين والزلازل**. وتُعد **الزلازل** أكثر الكوارث الطبيعية **تأثيراً** على الإنسان، **لحدوثها المفاجئ والسريع** ولما ينجم عنها من **خسائر بشرية ومادية**.

ويمكن **تقسيم الآثار الزلزالية** إلى **نوعين** هما **الآثار الأولية** وتتمثل في حدوث الحركة الأرضية العنيفة وما **يصاحبها** من **تصدعات** و**سقوط المباني** وغيرها، والآثار الثانوية **وتتمثل** في **الحرائق** و**الانهيارات الأرضية** و**الفيضانات** و**التغيرات** في **مستوى سطح الماء**. ويختلف **حجم الخسائر** التي تُسببها **الزلازل** من بلد إلى





آخر، ويقبل بصفة عامة في الدول المتقدمة التي أخذت بصورة جديّة بالوسائل التي تؤدي إلى تخفيف الخطر الزلزالي.

تعتبر الزلازل من أخطر الكوارث الطبيعية على الأرض، وتختلف وراءها دماراً شاملاً، يلحق الضرر بكل من الطبيعة والإنسان والبنيان العمراني، وتحصد بعض الزلازل المفاجئة والبراكين الثائرة أرواح مئات الآلاف من البشر، كما تؤدي إلى إتلاف مساحات شاسعة من الأراضي الخضراء، وهدم عدد كبير من البيوت المأهولة والمصانع والشركات التي يعيش الكثيرون من ورائها. وهناك علاقة وطيدة بين البراكين والزلازل، فأحدهما قد يسبب الآخر، حيث يمكن أن يكون سبب الزلزال تحرك الكتل والحمم الملتهبة في باطن الأرض وضغطها على الأجزاء الضعيفة في القشرة الأرضية، كما قد يكون الزلزال سبباً للبركان في حالة الاهتزاز الشديد الذي قد يسبب تهيج الحمم البركانية والحمم في باطن الأرض. يمكن أن يؤدي كلا من الزلازل والبراكين إلى مجموعة من الفوائد أيضاً لسطح الأرض بغض النظر عن الأضرار حيث يساعدان بدور كبير في التخلص من نسبة كبيرة من الاحتباس الحراري الذي نعاني منه في الفترة الأخيرة. لقد شهد منتصف القرن العشرين أكبر حدث علمي في مجال علم الزلازل عندما توصل العلماء إلى نظرية تكتونية الصفائح التي أمكن على أساسها تفسير عدد من الظواهر الغريبة على الأرض، مثل الحركة الظاهرية للقارات مع مرور الزمن، وتركز النشاط البركاني في مناطق معينة، ووجود السلاسل الجبلية الضخمة في قيعان المحيطات.





لقد اتجه **المؤرخون** منذ القدم إلى الاهتمام **بالزلازل** وتسجيل مواقعها وتواريخ حدوثها ووصف **أحداثها** وتقدير شدتها والأضرار **الناجمة** عنها، وتطور هذا الاهتمام حديثاً حتى أصبح **علماً قائماً بذاته** يسمى علم **الزلازل** **Earthquake Seismology** خاصة إذا علمنا أن الكرة الأرضية **تتعرض** سنوياً إلى حوالي **350 ألف زلزال** لا يشعر بمعظمها **الناس** إما لضعفها إما لحدوثها في مناطق غير **مأهولة** بالسكان. ولإلقاء الضوء على ماهية **الزلازل** وأسبابها ووسائل **توقعها**، فإن هذا يتطلب إعطاء **فكرة** مبسطة عن **التركيب** الداخلي للأرض وعلاقتها بالعوامل المسببة **للزلازل**.





التركيب الداخلي للأرض

الأرض عبارة عن كوكب صخري تقع في المدار الثالث من المجموعة الشمسية ولها حركتان دورانيتان. الأولى دورانها حول الشمس مرة في العام والثانية حول نفسها كل 24 ساعة، وهي عبارة عن كرة صلبة تأخذ شكلاً إهليجياً (بيضاوياً)

تكتسب الأرض حرارتها من مصدرين:

المصدر الأول: النشاط الإشعاعي وهي عملية طبيعية Spontaneous يجري خلالها تغيير في مكونات الذرات لتنتج عناصر جديدة كما يحدث في التفاعلات النووية مما ينتج عنها تحرر طاقة على شكل حرارة عالية تبرد عند صعودها إلى القشرة الأرضية.

المصدر الثاني: الحرارة المتبقية Residual heat عبارة عن حرارة تزامنت مع تكون الأرض قبل 4600 مليون سنة والتي نتجت من امتزاج واختلاط مخلفات كونية Cosmic Debris نتج عنها ما يعرف بالأرض.

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 لوراسيا **Laurasia** وتضم حالياً قارات أمريكا الشمالية وأوراسيا (أوروبا وآسيا) ما عدا الهند وجرينلاند.

قارة جنوبية أطلق عليها أرض **قوندوانا Gondwana** وتضم حالياً قارات أمريكا الجنوبية، وأفريقيا، وأستراليا - الهند، والقارة المتجمدة الجنوبية. ويفصل بين هاتين القارتين بحر كبير يسمى **التيثس 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.

دلت الدراسات الجيوفيزيائية والسيزمية على أن التركيب الداخلي للأرض التي يقع مركزها على عمق **6371 كم** يتألف من أربع طبقات أساسية هي: القشرة - الوشاح - اللب الخارجي - اللب الداخلي، وكل من هذه الطبقات يلعب دوراً هاماً في مرور وانعكاس وانكسار الموجات الزلزالية نظراً لاختلاف كثافة الصخور واختلاف التركيب المعدني، بالإضافة إلى اختلاف درجات الحرارة والضغط مع ازدياد العمق. ويمكن توضيح خصائص كل طبقة من طبقات الأرض كما يلي:

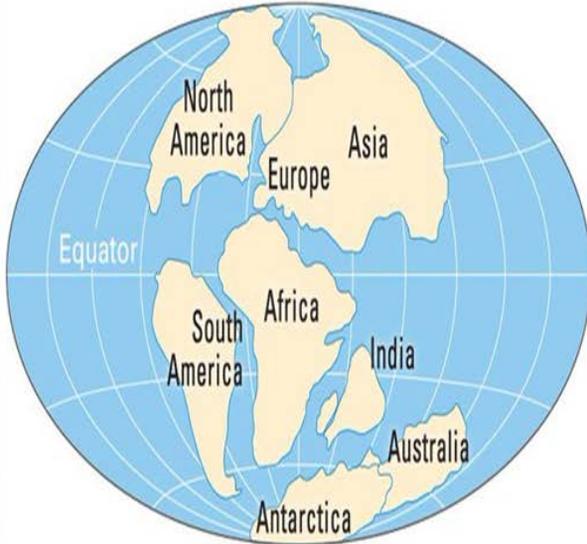




قبل 225 مليون سنة



قبل 150 مليون سنة



قبل 100 مليون سنة



الوضع الحالي للارض

الزحف القاري للصفائح



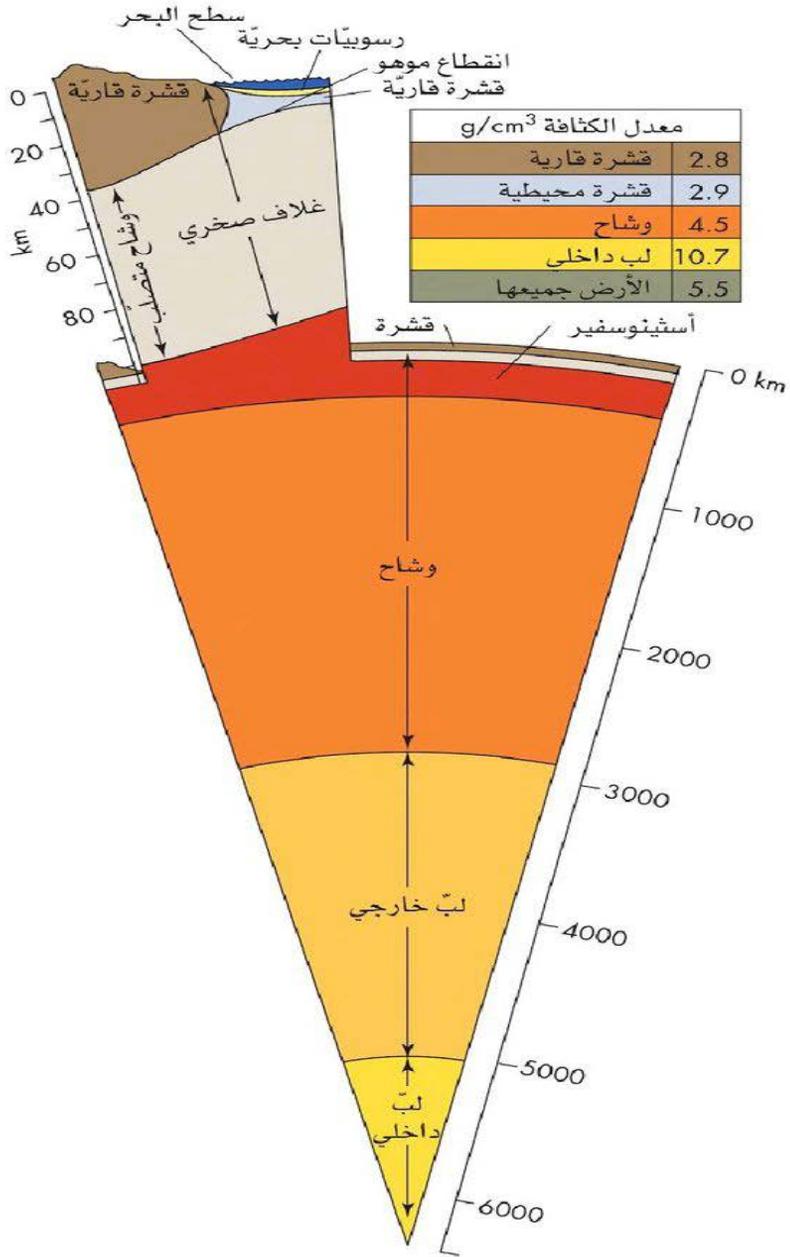


القشرة الأرضية

يتراوح سمك القشرة الأرضية Earth's Crust ما بين 25 كم و60 كم تحت القارات، ما بين 5 كم و10 كم تحت المحيطات، وتتميز صخور القشرة الأرضية بكثافتها المنخفضة وبطبيعتها غير المتجانسة وذلك لاختلاف الظروف والبيئات التي تكونت فيها. وتتفاوت القشرة الأرضية في تركيبها الصخري من صخور الجرانيت - الأكثر شيوعاً في المناطق القارية والمكون الرئيسي لها - إلى صخور البازلت المكونة لقيعان المحيطات، وتخلو القارات من صخور البازلت عدا المناطق البركانية ومناطق الضعف في القشرة الأرضية التي ترتفع فيها الصحارة عبر الشقوق إلى سطح الأرض. بينما تخلو قيعان المحيطات من وجود صخور الجرانيت إلا من بعض الرسوبيات البسيطة التي جرفتها مياه الأنهار والسيول.

إن الاختلاف الواضح بين سماكة القشرة القارية عن القشرة المحيطية يدل على أن للجبال جذوراً تتجاوز في سماكتها 4-5 أضعاف ارتفاع الجبال. بمعنى آخر أن الجبال عبارة عن مناطق ترتفع عدة مئات من الأمتار فوق التضاريس المحيطة بها ولها أوتاد سميكة نتجت من سماكة القشرة الأرضية حتى يحدث توازن ايزوستاتي بين مكونات القشرة الأرضية وفقاً لكثافتها فسيبحان من قال: ﴿وَالْجِبَالُ أَوْتَادًا﴾ [سورة النبا، الآية 7]. وكذلك في قوله تعالى ﴿وَالْجِبَالُ أَرْسَاهَا﴾ [سورة النازعات، الآية 32].





التركيب الداخلي للأرض



وقد 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.

الوشاح

ويقع **الوشاح** أو الستار **Mantle** تحت **القشرة** الأرضية، ويصل **عمقه** إلى **2900 كم** من سطح الأرض، ويتكون من صخور صلبة عالية الكثافة يدخل في **تركيبها** بصفة أساسية عنصري الحديد والمغنيسيوم، ويعتقد بعض علماء الأرض أن صخور **البيريدوتيت Peridotite** التي وجدت في مناطق **متفرقة** من العالم **مثل** الخليج العربي وتركيا وإيطاليا هي جزء من **صخور الوشاح** التي تتميز بلونها الداكن وكثافتها العالية، وتتكون من البيروكسين والأوليفين اللذين تكونا تحت تأثير الحرارة والضغط الشديدين، والتي تنتقل فيهما الموجات الزلزالية بنفس السرعة العالية التي تنتقل بها خلال صخور الوشاح. وتتميز صخور الجزء العلوي من طبقة الوشاح بأنها في حالة شبه سائلة في منطقة **Asthenosphere** نتيجة للحرارة العالية التي ترجع إلى وجود بعض المواد المشعة فيها، ونظراً للضغط الشديد الواقع فوق تلك المنطقة فإن صخورها أصبحت





في حالة لزجة ثقيلة القوام تنزلق عليها الصفائح التكتونية التي تحمل فوقها القارات والمحيطات مسببة ما يسمى بالزحف القاري **Continental Drift**، الذي يعد أحد الأسباب الرئيسية لحدوث الزلازل في العالم.

اللب

يقع اللب **Core** على عمق يتراوح ما بين 2900 و 6371 كم من سطح الأرض، ويتكون من جزئين هما: اللب الخارجي **Outer Core** ويبلغ سمكه 2080 كم ويصل إلى عمق 5100 كم من السطح، ويتركب أساساً من **عنصري** الحديد والنيكل في الحالة **السائلة** ولا تنتشر فيه موجات القص أثناء حدوث **الزلازل**. واللب الداخلي **Inner Core** يبدأ من عمق 5100 كم إلى أن يصل إلى مركز الأرض على عمق 6371 كم ويبلغ سمكه حوالي 1390 كم ويتكون من مزيج من عنصري النيكل والحديد في الحالة الصلبة. دلت الدراسات الجيوفيزيائية أن كثافة الصخور تزداد تدريجياً مع ازدياد العمق حيث وجد أن مكونات الأرض في اللب أثقل منها في الوشاح وفي الوشاح أثقل منها في القشرة. حيث تبلغ كثافة صخور اللب (الثقل النوعي) حوالي 12 جم/سم³، بينما في الوشاح 3.5 جم/سم³ وفي صخور القشرة تصل إلى 2.7 جم/سم³. وصدق قوله تعالى في الآية الثانية من سورة الزلزلة ﴿وَأَخْرَجَتِ الْأَرْضُ أَثْقَالَهَا﴾.

تقريباً جميع المعلومات **المباشرة** حول باطن الأرض مستمدة من ملاحظات **الزلازل** المتولدة عن الموجات **الزلزالية** فقط. نظراً لأن جزءاً كبيراً من الأرض





عبارة عن مادة **صلبة مرنة**، يمكن أن ينتشر **نوعان** من موجات الجسم عبر الأرض. يتأثر مسار **الأمواج** بانقطاعين Discontinuities **رئيسيين** في الأرض؛ أحدهما على عمق **30-60 كم**، والآخر على عمق **2900 كم**. **الأول** يسمى انقطاع موهو Moho Discontinuity وهو ذو أهمية خاصة في تفسير السجلات **الزلزالية** على مسافات مركزية قصيرة تصل إلى **بضع مئات من الكيلومترات**. تم اكتشاف الدليل على الانقطاع **الثاني** 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).





ماهية الزلازل

الزلازل لغويًا هي تحريك الشيء حركة شديدة. أما علميًا فهي عبارة عن اهتزازات في القشرة الأرضية تحدث بمشيئة الله تعالى، ثم بسبب التحرر السريع للطاقة المجتمعة في الصخور، والناجمة عن الحركة التصدعية لكتل الصخور المكونة للقشرة الأرضية أو الانفجار البركاني أو انبثاق المواد المنصهرة من باطن الأرض أو الانهيارات في مناطق المغارات والمناجم وضخ المياه أو التفجيرات النووية وإنشاء السدود والبحيرات الصناعية. **ومن أهم الآثار التخريبية للزلازل:**

- حدوث إزاحات أرضية عمودية أو أفقية أو كليهما معاً.
- حدوث انهيار أو انزلاق أرضي.
- تداعي المنشآت العمرانية.
- انقطاع المياه واندلاع الحرائق.
- طغيان مياه البحر بفعل أمواج الميناء (التسونامي)

عند حدوث الزلازل أو ما يسمى **بالهزة الرئيسية** Main shock ينطلق معها معظم الطاقة **الزلزالية** الكامنة في الصخور ويبقى جزء آخر ينطلق مع **الهزات اللاحقة** والتوابع Aftershocks، التي في الغالب يكون **تأثيرها** أقل **شدة** من الهزة الرئيسية. ولقد وصف **القرآن الكريم** هذا النوع من التوابع



في قوله تعالى: ﴿يَوْمَ تَرْجُفُ الرَّاجِفَةُ ﴿٦﴾ تَتَّبِعُهَا الرَّادِفَةُ ﴿٧﴾﴾ [النازعات آية: 6 - 7]
فالراجفة هي الزلزلة العظمى ﴿إِنَّ زَلْزَلَةَ السَّاعَةِ شَيْءٌ عَظِيمٌ﴾ [الحج آية: 1] والرادفة
هي التابع الأقل قوة. ومن الملاحظ ارتباط الزلازل بخروج الحمم والصحارة
من باطن الأرض وتكون البراكين وهو الارتباط الذي نبأنا الله بحدوثه
أيضاً في سورة الزلزلة في قوله ﴿إِذَا زُلْزِلَتِ الْأَرْضُ زِلْزَالَهَا ﴿١﴾ وَأَخْرَجَتِ الْأَرْضُ
أَنْقَالَهَا ﴿٢﴾﴾ [الزلزلة آية: 1 - 2]

الهزات الارتدادية Aftershocks والسرب الزلزالية Swarms

الهزات الأرضية السابقة Foreshocks هي الزلازل التي تسبق الزلزال الأكبر
في نفس الموقع. لا يمكن تحديد الزلزال على أنه نذير إلا بعد حدوث زلزال
أكبر في نفس المنطقة.

الهزات الارتدادية اللاحقة Aftershocks هي سلسلة من الزلازل التي تحدث
بعد حدوث صدمة رئيسية. تحدث الهزات الارتدادية بالقرب من الصدع حيث
وقع الزلزال الرئيسي. هذا يعني أن هناك زلزالاً واحداً كبيراً وسلسلة من
الزلازل الأصغر مما يمكن أن يحدث من قبل الهزات الأرضية السابقة - Fore-
shocks و / أو بعد ذلك (الهزات الارتدادية). تواتر هذه الهزات الارتدادية
يتناقص بمرور الوقت. تاريخياً، الزلازل العميقة (< 30 كم) أقل احتمالاً أن
تتبعها توابع الزلازل من الزلازل الضحلة. الهزات الارتدادية جزء من «عملية
إعادة التعديل» بعد الانزلاق الرئيسي على الصدع. تصبح الهزات الارتدادية

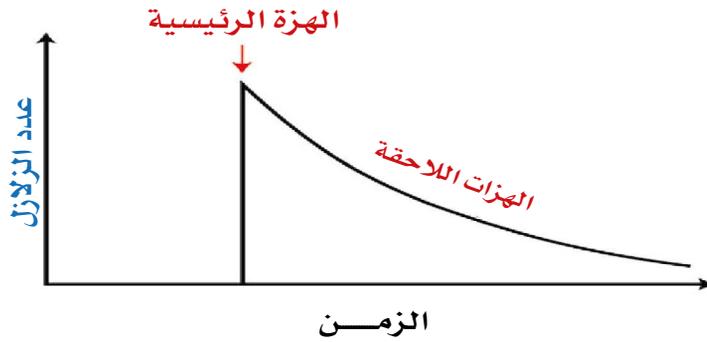


أقل تواتراً بمرور الوقت، على الرغم من أنها يمكن أن تستمر لأيام أو أسابيع أو شهور أو حتى سنوات و كقاعدة عامة، تمثل الهزات الارتدادية Aftershocks تعديلات طفيفة على طول جزء الصدع الذي انزلق في وقت حدوث الصدمة الرئيسية.

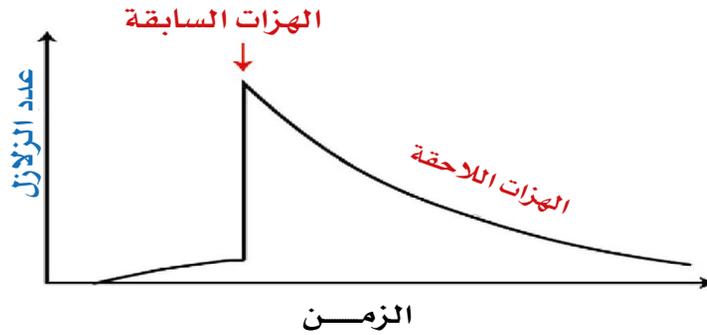
سرب الزلازل Swarms هو سلسلة من الزلازل الصغيرة التي لا تتبع هزة رئيسية. الصدمة الرئيسية هي أكبر زلزال في سلسلة الزلازل التي قد تكون لها هزات أرضية سابقة Foreshocks و / أو توابع Aftershocks. عادة ما يكون السرب عبارة عن سلسلة من الزلازل بحجم مماثل يمكن أن تحدث على مدى عدد من الأيام أو حتى الأشهر وغالباً ما تتكرر في نفس الموقع. ترتبط العديد من أسراب الجراد بالنشاط الحراري الأرضي ومناطق النشاطات البركانية. ليست كل الأسراب متشابهة، فبعضها تسببه حركة السوائل، والبعض الآخر ناتج عن القوى التكتونية. تعد الهزات الارتدادية Aftershocks جزءاً من «عملية إعادة التعديل» بعد الانزلاق الرئيسي على الصدع. كما هو الحال مع الأسراب، يمكن أن تستمر الهزات الارتدادية لأيام وحتى سنوات بعد حدوث زلزال رئيسي على الرغم من انخفاض حجمها بمرور الوقت. كل من سرب الزلازل والتوابع هي سلسلة من الزلازل المتعددة التي تحدث في منطقة مركزة.



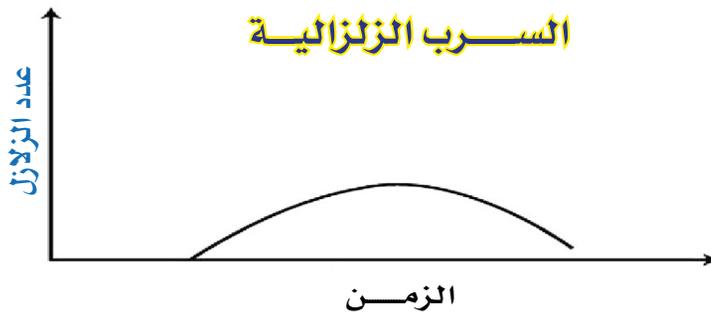
الهزة الرئيسية والهزات اللاحقة



الهزات السابقة والهزة الرئيسية والهزات اللاحقة



السرب الزلزالية



رسم تخطيطي يوضح الفرق بين الهزة الرئيسية مع الهزات اللاحقة (أعلى)، وتسلسل الهزات السابقة والهزة الرئيسية، والهزات اللاحقة (في الوسط)، والسرب الزلزالية (أسفل)، فاريل وآخرون، 2009

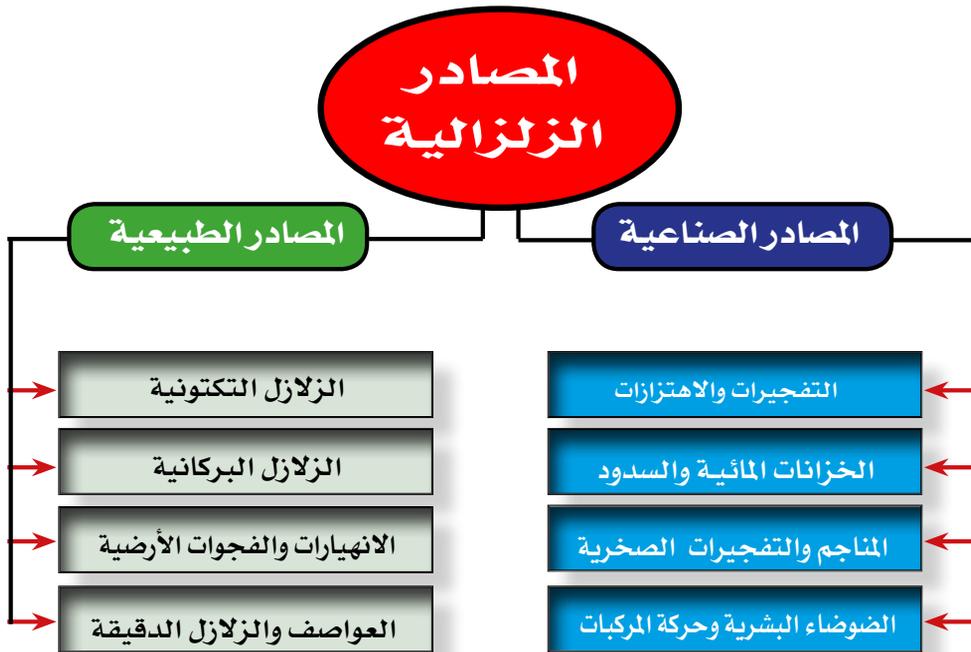


أنواع الزلازل

أولاً: تصنف الزلازل حسب مصادر الطاقة إلى:

زلازل طبيعية المصدر ومنها:

- الزلازل التكتونية.
- الزلازل البركانية.
- زلازل الانهيارات والفجوات الأرضية.
- العواصف الزلزالية.
- الزلازل الدقيقة Microseisms



المصادر الزلزالية الطبيعية والصناعية



زلازل صناعية المصدر ومنها:

- التفجيرات النووية والكيميائية.
- السدود والخزانات المائية وحقن السوائل.
- المناجم والتفجيرات الصخرية.
- الضوضاء البشرية وحركة المركبات.

ثانياً: تصنف الزلازل استناداً إلى العمق البؤري إلى:

- زلازل ضحلة العمق يصل عمقها إلى 70 كم من سطح الأرض.
- زلازل متوسطة العمق يتراوح عمقها ما بين 70 و 300 كم.
- زلازل عميقة يتراوح عمقها ما بين 300 و 670 كم.

ثالثاً: تصنف الزلازل حسب بُعدها عن مركز الزلزال السطحي (Δ) Epicenter

1. الأحداث المحلية تكون Δ أقل من 1000 كلم. تتميز هذه الأحداث بأن فترتها أقل من 5 دقائق، الإشارة السائدة هي Sg تليها موجات ذات سعة متناقصة (Coda)، قد تولد الانفجارات موجات Rayleigh كبيرة، ترتيب الوصول: Pn، Pb، Pg.
2. الأحداث الإقليمية تكون Δ بين 1000 كم و 3000 كم.
3. الأحداث البعيدة المدى: تكون Δ بين 3000 كم و 12000 كم قبل منطقة الظل.





رابعاً: تصنف الزلازل حسب القوة المدمرة إلى:

- زلازل ضعيفة لا تسبب دمار للمنشآت وخسائر في الأرواح وتصل شدتها إلى 5 درجات حسب مقياس ميركالي المعدل.
- زلازل قوية تسبب دمار للمنشآت وخسائر في الأرواح وتتراوح شدتها ما بين 6 و 9 درجات.
- زلازل مدمرة مسببة دمار شامل للمنشآت وخسائر عالية في الأرواح وتتراوح شدتها ما بين 9 و 12 درجة.





أسباب الزلازل

إن أول وصف علمي لأسباب حدوث الزلازل كان على يد العلماء المسلمين في القرن الرابع الهجري حيث وصف ابن سينا في كتابه عيون الحكمة الزلازل وأسباب حدوثها وأنواعها ما قوله: «حركة تعرض لجزء من أجزاء الأرض بسبب ما تحته، والجسم الذي يمكن أن يتحرك تحت الأرض إما جسم بخاري دخاني قوي الاندفاع كالريح، وإما جسم مائي سيال، وإما جسم هوائي، وإما جسم ناري، وإما جسم أرضي». لقد أورد ابن سينا تصوراً لأماكن حدوث الزلازل فذكر: «وأكثر ما تكون الزلزلة في بلاد متخلخلة غور الأرض متكاثفة وجهها، أو مغمورة الوجه بماء». وهو ما يتفق مع ما توصل إليه العلماء الآن أن مناطق حدوث الزلازل تكون في مناطق الضعف في القشرة الأرضية حيث يتم حركة الصخور على سطحها، وتسمح بخروج الغازات. ويصف ابن سينا أنواع الزلازل فيقول: «منها ما يكون على الاستقامة إلى فوق، ومنها ما يكون مع ميل إلى جهة، ولم تكن جهات الزلزلة متفقة، بل كان من الزلازل رجفية، ما يتخيل معها أن الأرض تقذف إلى فوق، ومنها ما تكون عرضية».

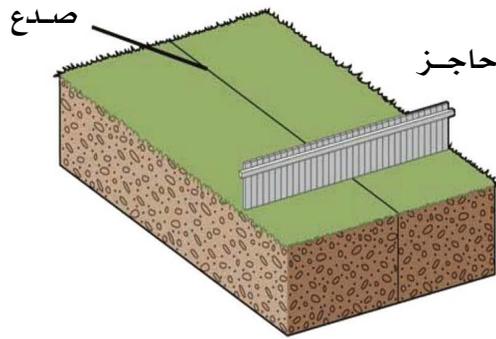
أما السيوطي فقد تحدث في كتابه كشف الصلصلة عن وصف الزلزلة عن شدتها من خلال وصف آثارها المدمرة، مثل: أوزان الصخور المتساقطة، ومقاييس الشقوق الناتجة عن الزلازل، وعدد المدن والقرى والمساكن المتهدمة، وعدد الصوامع والمآذن المتهدمة، وعدد القتلى. كما وصف السيوطي درجات الزلازل بتعبيرات أشبه ما تكون بالمقاييس الحديثة مثل لطيفة جداً، وعظيمة وهائلة.



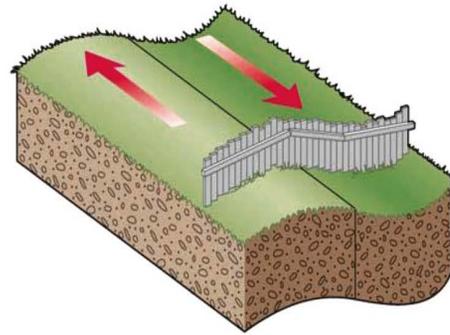


بعد زلزال سان فرانسيسكو العظيم عام 1906، فحص الجيوفيزيائي هاري فيلدنغ ريد Reid إزاحة سطح الأرض على طول صدع سان أندرياس في الخمسين عاماً التي سبقت الزلزال. وجد أدلة على الانحناء 3.2 أمتار خلال تلك الفترة. وخلص إلى أن الزلزال يجب أن يكون نتيجة الارتداد المرن لطاقة الإجهاد المخزنة في الصخور على جانبي الصدع.

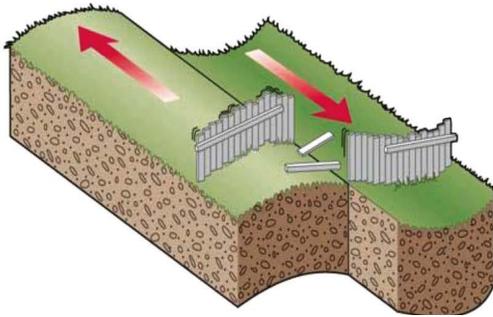
لقد أشار العالم ريد Reid عام 1906م إلى أن نظرية الارتداد المرن Elastic Rebound تعطي تفسيراً معقولاً لأسباب حدوث الزلازل، وتفترض هذه النظرية أن صخور القشرة الأرضية تتعرض إلى ضغوط وتشوهات على مدار السنين مما يجعل مسارها الطبيعي يتغير وينتج عن ذلك قوى هائلة تتزايد مع الزمن، فإذا زادت هذه القوى عن قدرة تحمل الصخور حدث بها كسر أو شرخ أو بمعنى آخر إذا زادت القوى الناتجة عن قوى الاحتكاك بين الصخور تحدث الإزاحة على جانبي الفالق مسببة انطلاق الطاقة المحبوسة إما على هيئة حرارة إما موجات ارتدادية، وهذه الموجات الارتدادية التي يحاول بها الصخر الرجوع إلى وضعه الطبيعي هي التي تسبب الزلازل.



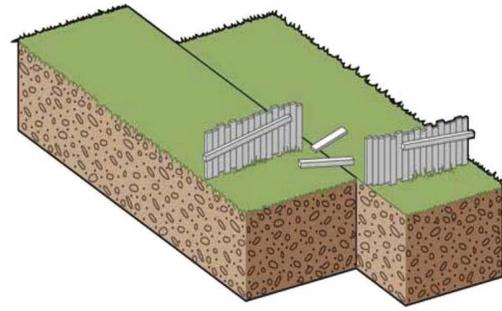
الموضع الأصلي



التشوه



مرحلة التمزق وانطلاق الطاقة



رجوع الصخر إلى الموضع الأصلي قبل التشوه

مبدأ نظرية الارتداد المرن. بسبب الاحتكاك، لا تنزلق الكتل، لكنها تتشوه. عندما تتجاوز الضغوط داخل الصخور قوة الاحتكاك، يحدث التمزق. بعدها يتم انطلاق الطاقة المرنة المخزنة في النظام بعد تمزقها على شكل موجات تشع إلى الخارج من الصدع.





نظرية الصفائح التكتونية

في عام 1962م ظهرت نظرية الصفائح التكتونية **Plate Tectonics** للعالم **ألفريد وجنر** (1880- 1930) **A.Wegener** التي افترضها عام 1912 وتقتصر على أن الغلاف **الصخري الصلب** للأرض **Lithosphere** يتألف من عدة صفائح **Plates** صخرية يتراوح سمكها ما بين **70 كم** و**100 كم**، وتتكون الصفائح من **القشرة الأرضية** وجزء صغير من الطبقة السائلة من الوشاح، وتتحرك الصفائح التكتونية بالنسبة إلى بعضها البعض فوق المنطقة المنصهرة جزئياً من الوشاح العلوي والمعروفة بـ **Asthenosphere**، وتحدث الحركات التكتونية على طول الحدود الفاصلة بين الصفائح التكتونية عند تحركها متقاربة أو متباعدة عن بعضها أو تتزلق إحداها بموازاة الأخرى مسببة اضطرابات في داخل الأرض تنعكس على القشرة الأرضية في صورة كسور واندفاعات بركانية وزلازل وحركات صعود وهبوط. قال تعالى: ﴿وَالْأَرْضِ ذَاتِ الصَّدْعِ﴾ [سورة الطارق، الآية 12].

يوجد في العالم ست صفائح رئيسية، وأخرى صغيرة ثانوية تشكل في مجملها قشرة الأرض التي نعيش عليها. والصفائح الصلبة الكبيرة تشمل: **صفيحة أوراسيا القارية**، و**صفيحة المحيط الهادي المحيطية**، والصفائح **القارية المحيطية** المشتتة على **صفيحة أفريقيا**، و**صفيحة أمريكا**، و**صفيحة المتجمد الجنوبي**، و**الصفيحة الهندية - الأسترالية**. أما الصفائح **الصلبة الصغيرة** فمنها: **الصفيحة العربية** و**صفيحة نازكا** - **صفيحة بحر الفلبين** و**صفيحة الكاريبي** و**صفيحة جنوب شرق آسيا**.

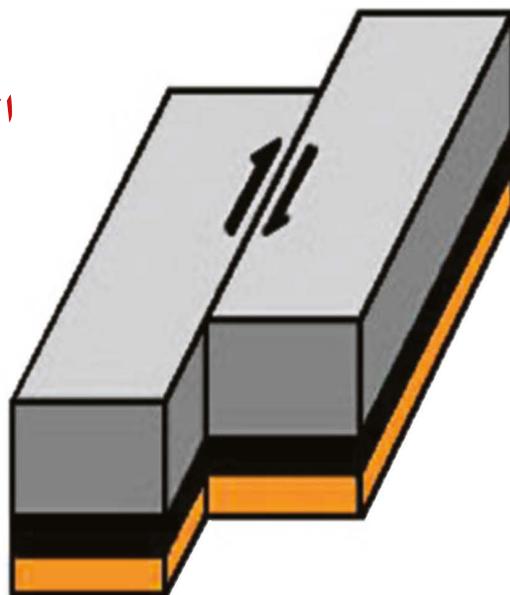




صدع طبيعي (رأسي)



صدع انزلاقي



صدع عكسي

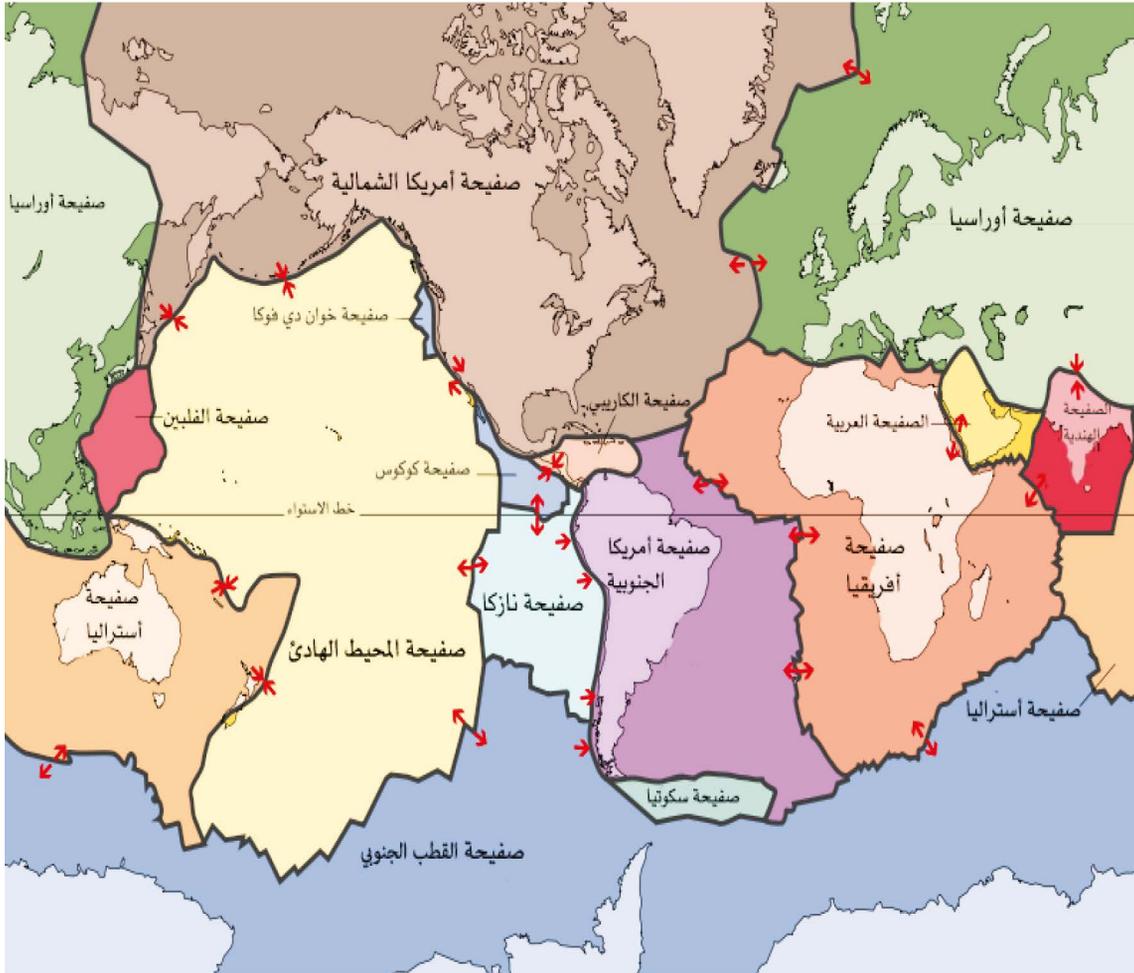
الجدار المعلق أعلى



صدع الدسر (الدفع)



أنواع الصدوع: الطبيعية والعكسية والانزلاقية



حدود الصفائح التكتونية الكبيرة والصغيرة

لم يتفق العلماء حتى يومنا هذا على قوة معينة لتحريك الصفائح ولكن أهم الآليات المقترحة لتحريك الصفائح:

أولاً : آلية السحب الناتج عن تيارات الحمل الموجودة في الغلاف الوهن . Asthenosphere



ثانياً: آلية **الجذب** بسبب وجود **طبقة الغلاف الصخري Lithosphere** الباردة والعالية الكثافة فوق **الوشاح الساخن واللدن والغلاف الواهن** يؤدي إلى جذب الصفيحة نحو **مناطق الاندساس**.

ثالثاً: آلية **الانزلاق**. بسبب تأثير قوى **الجاذبية**.

رابعاً: آلية **صعود الصهير**.

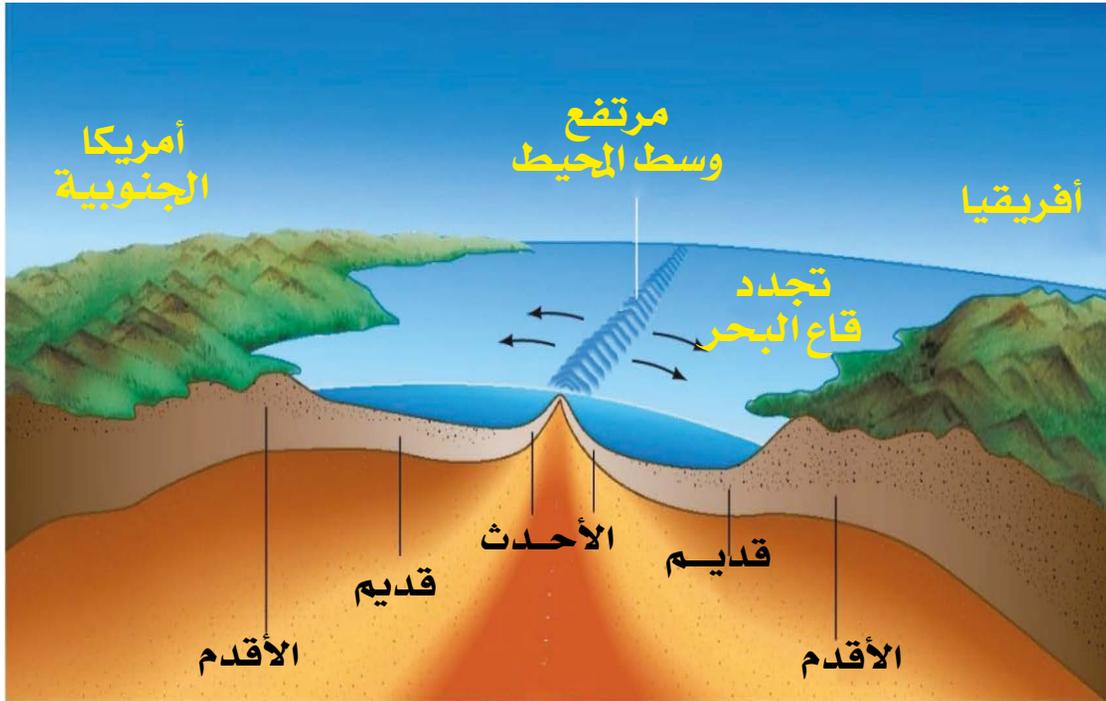
خامساً: آلية **البقع الساخنة**.

وبناءً على نظرية **الصفائح التكتونية**، يمكن تقسيم حدود **الصفائح طبقاتاً** لحركة الصدوع واتجاهاتها، إلى **ثلاثة أقسام رئيسية** كما يلي:

1. **مناطق تباعد الصفائح Divergence Zones**

تتشأ مناطق **تباعد الصفائح** عن **عملية شد** ناتج بسبب تحرك **صفيحتين** في اتجاه معاكس عن **بعضهما البعض** مثل **ابتعاد الصفيحة العربية** عن **الصفيحة الأفريقية** وما نتج عن ذلك من نشأة **أخدود البحر الأحمر** وكذلك **سلاسل جبال وسط المحيط الأطلسي**، وتتميز هذه **المناطق** بوجود **الصدوع العادية** أو **الرأسية Normal Faults**، كما أن **الزلازل** التي تحدث بها ضحلة ولا يزيد عمقها على **30 كم**.





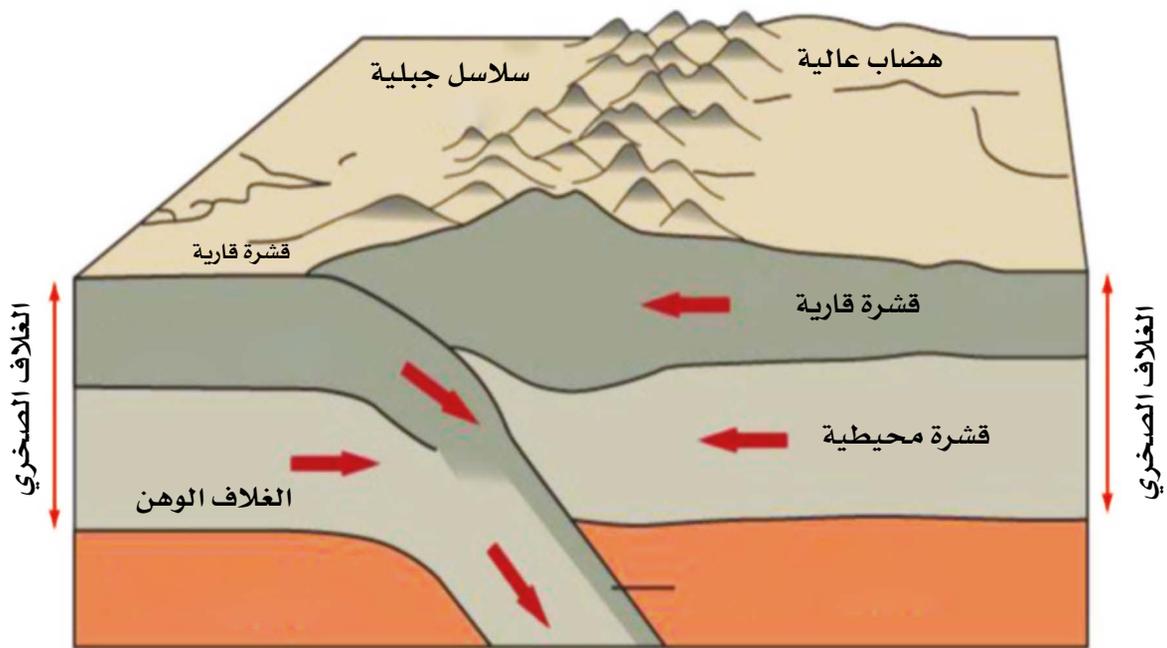
تجدد قاع البحر في مرتفعات وسط المحيط الناجمة عن تباعد الصفائح

2. مناطق التقاء الصفائح Converge Zones

تنشأ مناطق التقاء الصفائح عند تحرك صفيحتين باتجاه بعضهما البعض ليلتقيا معاً وتتصادما، ويحدث التصادم إما بين صفيحتين قاريتين إما بين صفيحتين إحداهما قارية والأخرى محيطية، وتتميز هذه المناطق بوجود الصدوع العكسية Reverse Faults ويمكن توضيح نوعي الاصطدام كما يلي:



- **قاري - قاري**: حيث تختلف كثافة **الصخور** نسبياً بين الصفيحتين، ويؤدي اصطدامهما معاً إلى تكوين منطقة من **السلاسل الجبلية الضخمة** والمرتفعة، مثل جبال **الهمالايا** في الهند، وزاكروس في إيران، وتحدث **الزلازل** في هذه المنطقة على أعماق متوسطة تتراوح ما بين **60 كم** و **300 كم**.

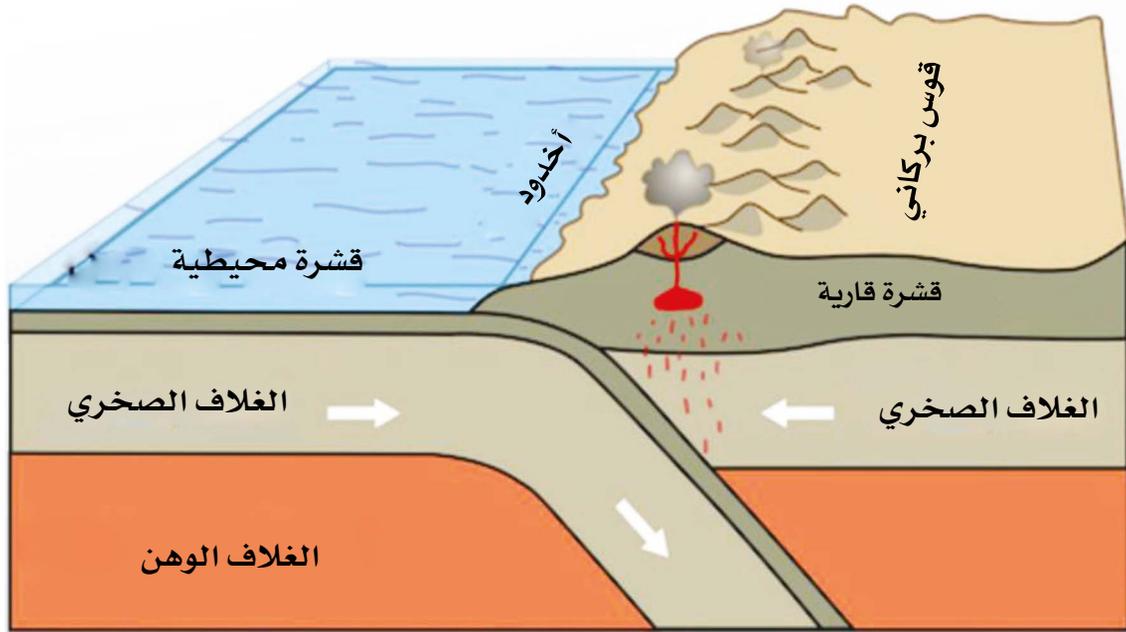


تصادم الصفيحتين القاريتين الهندية واليوراسية ونجم عن ذلك تكون جبال الهمالايا

- **قاري - محيطي**: حيث تختلف كثافة الصخور بين الصفيحتين، حين تضغط إحداها على الأخرى وتنحني الصفيحة المحيطية الأكثر كثافة أسفل الصفيحة القارية الأقل كثافة. ويقطع طرف **الصفيحة القارية** أجزاء كبيرة من **الصفيحة المحيطية** عند نزولها إلى طبقة **الوشاح** مكونة سلاسل جبلية مرتفعة، مثل: **جبال الأنديز** في أمريكا الجنوبية، والجزر الألوسية الممتدة



حول **منطقة** ألاسكا. وتتميز زلازل هذه المنطقة بأنها من النوع **العميق** حيث يتراوح عمقها ما بين **300 كم** و **650 كم**.



3. مناطق انزلاق أو زحف الصفائح Transform Zones

تنشأ مناطق انزلاق أو زحف الصفائح على شكل **صدوع** مستعرضة **Transform Faults** تؤدي إلى انزلاق أو زحف صفيحتين إحداهما **بموازاة** الأخرى، وتتحرك **الصفيحتان** متماستين على جانبي الصدع محدثةً تكسيراً أو تشوهاً في الصخور قد **ينتج** عنه اندفاعات **بركانية** وزلازل. وتحدث **الزلازل** في هذه المنطقة على **أعماق** ضحلة قد تصل إلى **20 كم** تقريباً، ومن أمثلة هذه المناطق **خليج العقبة**، و**صدع سانت أندرياس** بولاية كاليفورنيا الأمريكية.



نشوء صدع خليج العقبة المضربي اليساري من انزلاق الصفحة العربية باتجاه الشمال الشرقي وصفحة سيناء باتجاه الجنوب الغربي.





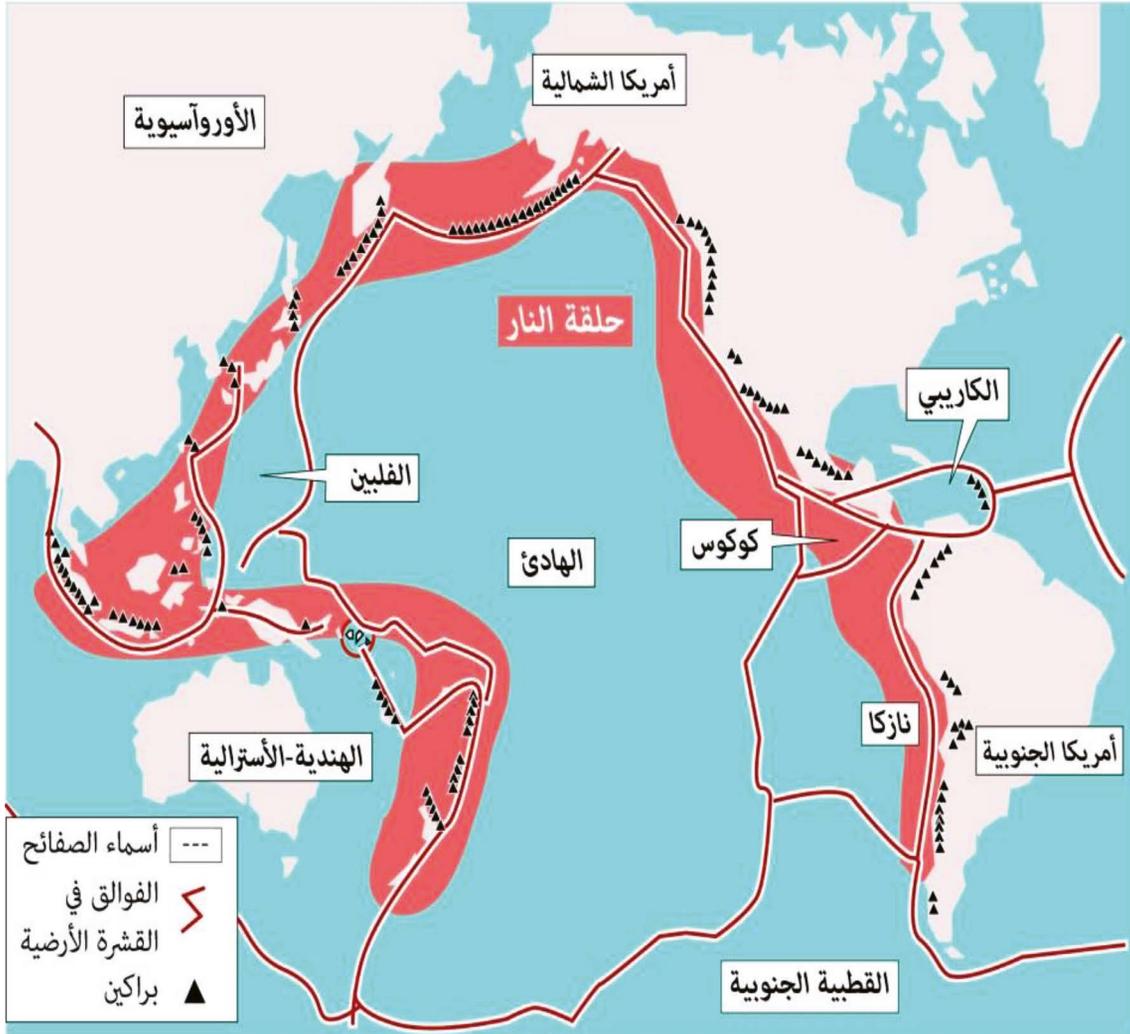
الأحزمة الزلزالية

بمقارنة **خرائط توزيع الزلازل** وحدود الصفائح التكتونية في العالم، نجد أن هناك ارتباطاً وثيقاً بين حدود الصفائح ومناطق النشاط الزلزالي، وعلى هذا الأساس أمكن تحديد ما يسمى بالأحزمة الزلزالية وأهمها حزام حلقة النار (حول المحيط الهادي) **Circum-Pacific Belt** ويتشكل فيه حوالي 69% من زلازل العالم، ويذكر أن 80% من طاقة الزلازل تتواجد في هذا الحزام، ويشمل هذا الحزام الشواطئ الغربية من أمريكا الشمالية وأمريكا الجنوبية واليابان والفلبين حتى يصل إلى أستراليا ونيوزيلندا، وتمثل أعتى أنواع الزلازل، وعلى سبيل المثال الزلازل التي حدثت في بيرو 1970 وتشيلي 1985 واليابان 1923 وألاسكا 1964، وزلزال اليابان 1995م.

وهناك حزام آخر لا يقل أهمية ويمتد من الصين شرقاً ماراً بجبال الهيمالايا، ثم ينحرف إلى الشمال الغربي ماراً بجبال زاغروس، ثم القوقاز إلى تركيا وشمال إيطاليا، ويعرف هذا الحزام بحزام جبال الألب **Alpide Belt** ويتشكل فيه حوالي 21% من زلازل العالم، ويمثل هذا الحزام 10% من الطاقة.

وبالإضافة إلى هذين الحزامين هناك أحزمة زلزالية أقل خطورة تمتد في خطوط شبه مستقيمة في وسط المحيط الأطلسي والهندي وتتجه شمالاً حتى تصل إلى خليج عدن وأواسط البحر الأحمر. وقد تتواجد الزلازل أحياناً في مناطق ليس لها علاقة بالأحزمة الزلزالية، حيث تتمركز في داخل الصفيحة، ويطلق على هذا النوع من الزلازل **Intraplate Earthquakes**، وهذا النوع قد يكون مدمراً بسبب عدم توقعه كما حدث في زلزال القاهرة في أكتوبر 1992م.





الأحزمة الزلزالية. يمثل حزام حلقة النار على شكل قوس بطول 40.000 كم حوالي 69% من زلازل العالم



الموجات الزلزالية

يتولد عن حدوث الزلازل في نقطة ما في الأرض نوعان من الموجات الزلزالية المرنة، تنتشر في جميع الاتجاهات مبتعدة عن موقعه، وتسمى النقطة التي تنطلق منها الحركة داخل الأرض بؤرة الزلزال Hypocenter بينما تسمى النقطة على سطح الأرض الواقعة مباشرة فوق بؤرة الزلزال مركز الزلزال السطحي Epicenter وتعرف المسافة العمودية بين مركز الزلزال وبؤرته بعمق الهزة Focal Depth، ويمكن تقسيم الموجات الزلزالية إلى:

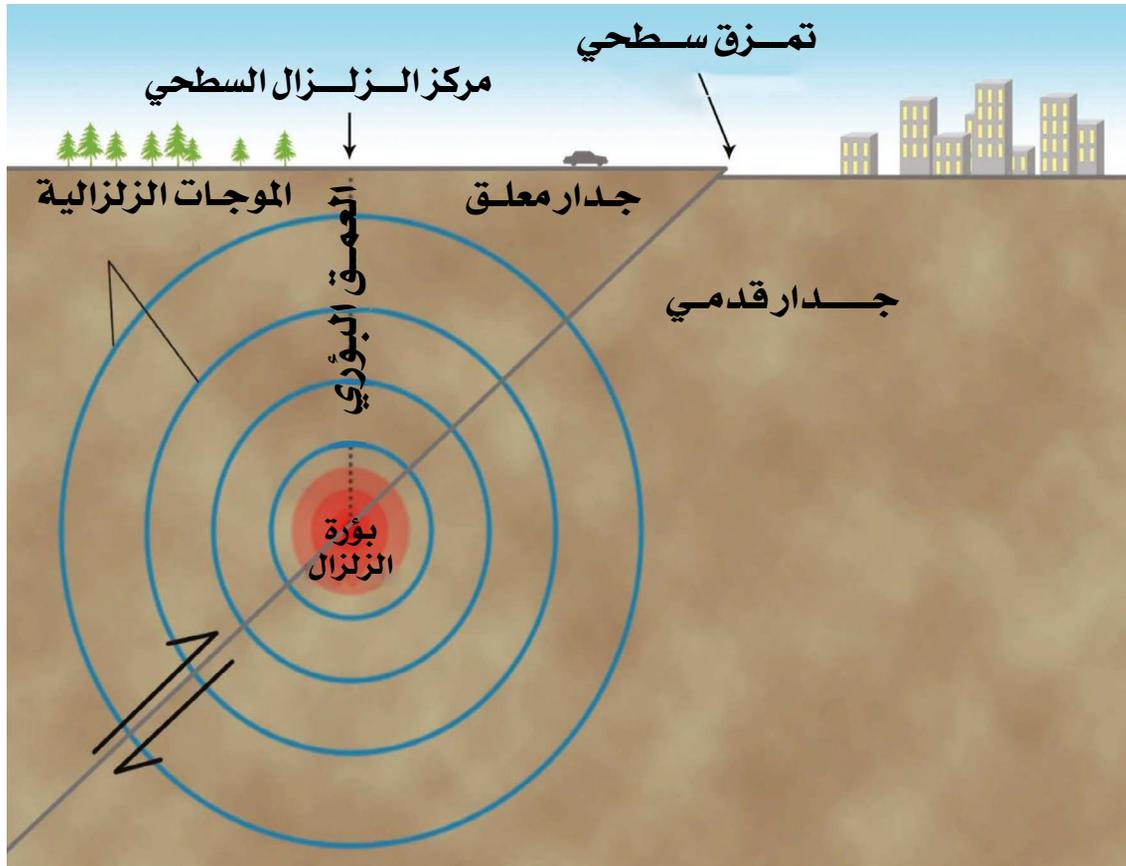
1. الموجات الداخلية Body Waves

تُعرف الموجات الزلزالية الداخلية أو الجسمية بأنها الموجات التي تنفذ من خلال جسم الأرض لتظهر في مناطق أخرى على سطحها، وتنقسم الموجات الداخلية إلى نوعين هما:

• الموجات الأولية P - Primary Waves

وتسمى أيضاً بالموجات الطولية أو الموجات التضاغطية Compressional Waves تنتشر هذه الموجات خلال الأجسام الصلبة والسائلة والغازية في صورة تضاغطات وتخلخلات متوالية، وتتميز بأنها ذات ذبذبات قصيرة، وتسير بسرعة عالية، ولذا فإنها تصل إلى أجهزة رصد الزلازل قبل غيرها من الموجات الأخرى، كما أنها عند وصولها إلى سطح الأرض - قادمة من العمق - يتحول جزء منها إلى موجات صوتية في الهواء يمكن للإنسان سماعها عند ذبذبات معينة (تزيد على 15 ذبذبة في الثانية).





شكل يوضح بؤرة الزلزال ومركزه السطحي ومستوى الصدع



• الموجات الثانوية S- Secondary Waves

وتسمى أيضاً بموجات القص أو القصيرة أو الإزاحة **Shear Waves**، وتنتقل في الأجسام الصلبة فقط عن طريق الاهتزاز من جانب إلى آخر كأنها تقوم بـ **قص** الصخر أو **إزاحته** في اتجاه عمودي على اتجاه حركتها وهي ذات سرعات منخفضة، وتصل إلى أجهزة الرصد بعد الموجات الأولية ولذا تسمى **بالموجات الثانوية**. وتستخدم **الموجات** الداخلية (الأولية والثانوية) في إعطاء صورة واضحة عن التركيب الداخلي للأرض، وتحديد مركز **الزلازل** وبؤرته. وتتوقف سرعة **الموجات** الأولية والثانوية على كثافة وخواص **الصخور**، وعند حدوث **الزلازل** يلاحظ في البداية تأثير الموجة الأولية وينتج عنها **اهتزاز** الأشياء غير الثابتة، **مثل**: الأثاث والأبواب والنوافذ، يلي ذلك الموجة **الثانوية** التي تهز الأرض في **الاتجاهين** الأفقي والرأسي، ينتج عنها **أضرار** في **المباني** والمنشآت.

$$V_P / V_S = (2 (1 - \alpha) / 1 - 2 \alpha)^{0.5}$$

وبالتالي

$$\alpha = V_P^2 - 2V_S^2 / 2 (V_P^2 - V_S^2)$$

$\alpha = 0$ معامل **بواسون** في السوائل، لذلك لا يمكن لموجات **S** أن تنتشر عبر **السوائل**. يتم **تحديد** نسبة **Poisson** نظرياً بين **0** و **0.5** وبالنسبة لمعظم **الصخور** تقريباً **0.25**، لذلك **عادةً** ما يكون **VP / VS** حوالي **1.7**





2. الموجات السطحية Surface Waves

تُعد الموجات السطحية **Surface Waves - L** الأكثر تدميراً، وهي تنتقل بالقرب من سطح الأرض دون أن تمر إلى جوفها، وهي أبطأ أنواع الموجات الزلزالية وآخر ما يتم التقاطه على أجهزة الرصد. وتُقسم الموجات السطحية إلى نوعين هما:

• موجة لوف

وتم تسميتها نسبة إلى العالم البريطاني أوغسطس لوف **Love** الذي اكتشفها عام 1885 م، وينتج عنها ذبذبات تشبه ذبذبات الموجة الثانوية ولكن في الاتجاه الأفقي فقط، وهي تؤثر بصفة خاصة على أساسات المنشآت.

• موجة رالي

وتمت تسميتها نسبة إلى العالم البريطاني رالي **Rayleigh** الذي اكتشفها عام 1911م، وهي تشبه أمواج البحر الدائرية، وفي تحريكها للماء، وتعمل هذه الموجة على تحريك الأشياء في المستويين الأفقي والرأسي في اتجاه عمودي على اتجاه الموجة.

وتتجلى أهمية الموجات السطحية في قدرتها المدمرة، بينما تكمن أهمية الأمواج الطولية والقصيرة في قدرتها على إجلاء الصورة الواضحة عن داخلية الأرض، وكذلك في تحديد بؤرة الزلازل حيث يتباين زمن وصول الموجتين، فالفرق بينهما يجعل من السهل تحديد الفرق الزمني

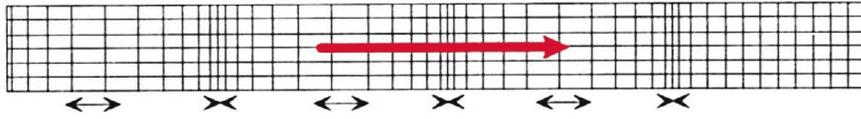


بين الموجتين القادمتين من مصدر وآخر للدلالة على بُعد الزلازل. وهذا هو بعينه ما يحدث في حالة البرق والرعد، فنحن نبصر البرق أولاً ثم نسمع الرعد بعد ذلك، وهذا يرجع إلى أن الضوء ينتقل بسرعة أكبر من سرعة الصوت، ونستطيع أن نحدد بُعد العاصفة بمعرفة الفرق بين زمن وصول كل من البرق والرعد إلينا، فإذا كانت تفصلهما فترة زمنية وجيزة كانت العاصفة قريبة، أما إذا استغرق وصول الرعد فترة طويلة فإن العاصفة تكون بعيدة.

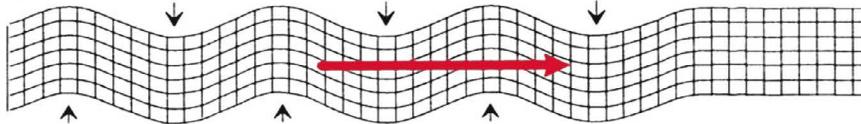




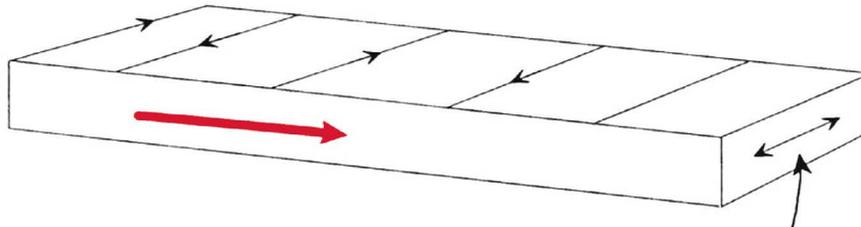
P- موجة أولية (طولية)



S- موجة ثانوية (قصيرة)

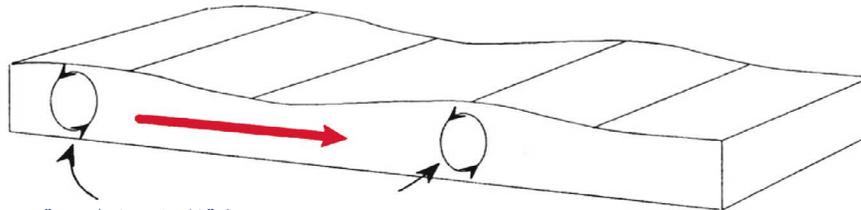


موجة سطحية (لوف)



موجة سطحية (موجة رايلي)

حركة الجزيء



حركة الجزيء اهليجية
تراجعية

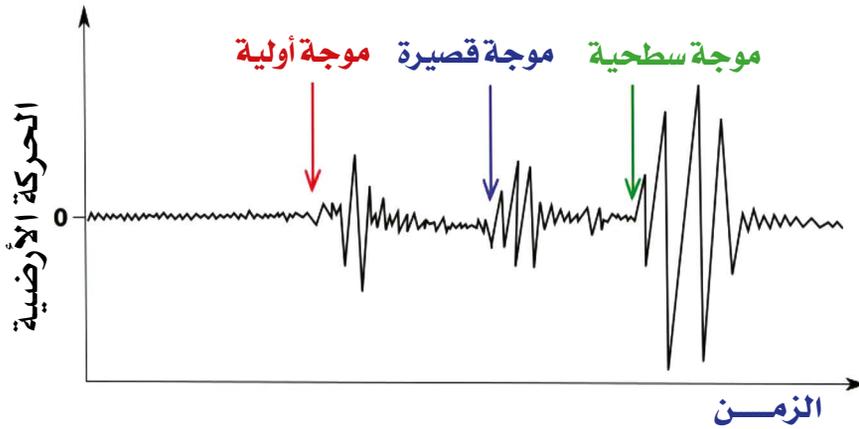


حركة الجزيء
اهليجية تقدمية

انتشار الموجة

اتجاهات حركة الجزيء

أنواع الموجات الزلزالية واتجاه حركتها



جهاز راصد الزلازل

زمن وصول الموجات الزلزالية وسعتها

عندما **تنظر** إلى مخطط **الزلازل**، سيكون هناك خطوط متعرجة في جميع أنحاءه. هذه هي كل الموجات الزلزالية التي سجلها جهاز قياس الزلازل. كانت معظم هذه الموجات صغيرة جداً لدرجة أن لا أحد يشعر بها. يمكن أن تحدث هذه الزلازل الصغيرة بسبب حركة المرور الكثيفة بالقرب من جهاز قياس الزلازل، والأمواج التي تضرب الشاطئ، والرياح، وأي عدد من الأشياء العادية الأخرى التي تسبب بعض اهتزاز جهاز قياس الزلازل. ستكون الموجة P هي أول اهتزاز أكبر من بقية الزلازل الصغيرة. لأن الموجات P هي أسرع الموجات الزلزالية، فعادة ما تكون الموجات الأولى التي يسجلها جهاز قياس الزلازل. ستكون المجموعة التالية من الموجات الزلزالية على مخطط الزلازل هي **الموجات S**. وعادة ما تكون هذه أكبر من **موجات P**. الموجات السطحية (**موجات لوف ورايلي**) هي الموجات الأخرى، **غالباً** ما تكون أكبر، **موضحة** على مخطط



الزلازل. لديهم تردد أقل، مما يعني أن **الموجات** (الخطوط؛ الصعود والهبوط) أكثر انتشاراً. تنتقل **الموجات السطحية** أبطأ قليلاً من **الموجات S** (التي بدورها تكون أبطأ من **الموجات P**) لذلك تميل إلى الوصول إلى جهاز قياس **الزلازل** بعد **موجات S**. بالنسبة للزلازل الضحلة (**الزلازل** مع التركيز بالقرب من سطح الأرض)، قد تكون **الموجات السطحية** أكبر **الموجات** التي سجلها جهاز قياس الزلازل. غالباً ما تكون **الأمواج الوحيدة** التي تم تسجيلها على مسافة طويلة من الزلازل متوسطة الحجم.

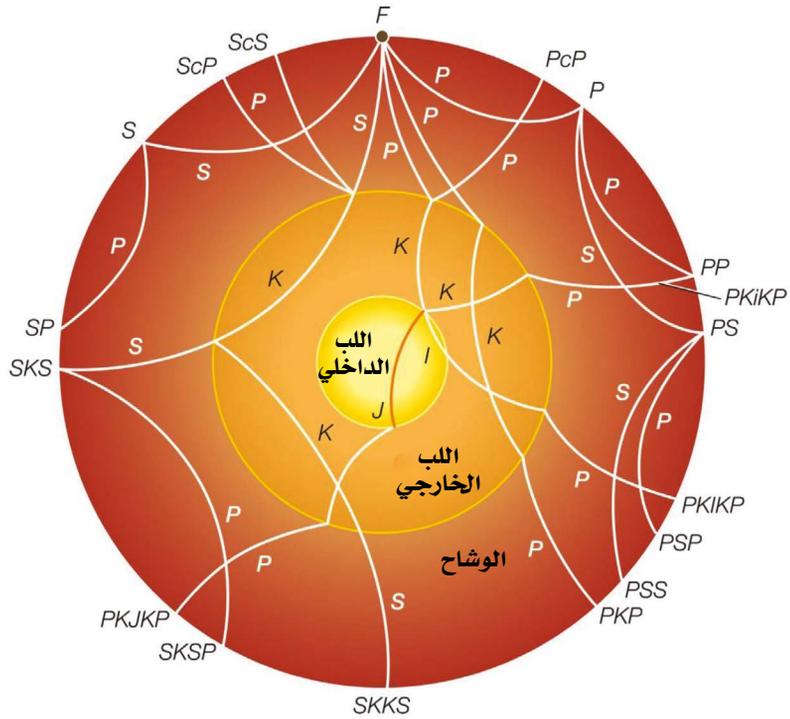




الأطوار الزلزالية Seismic Phases

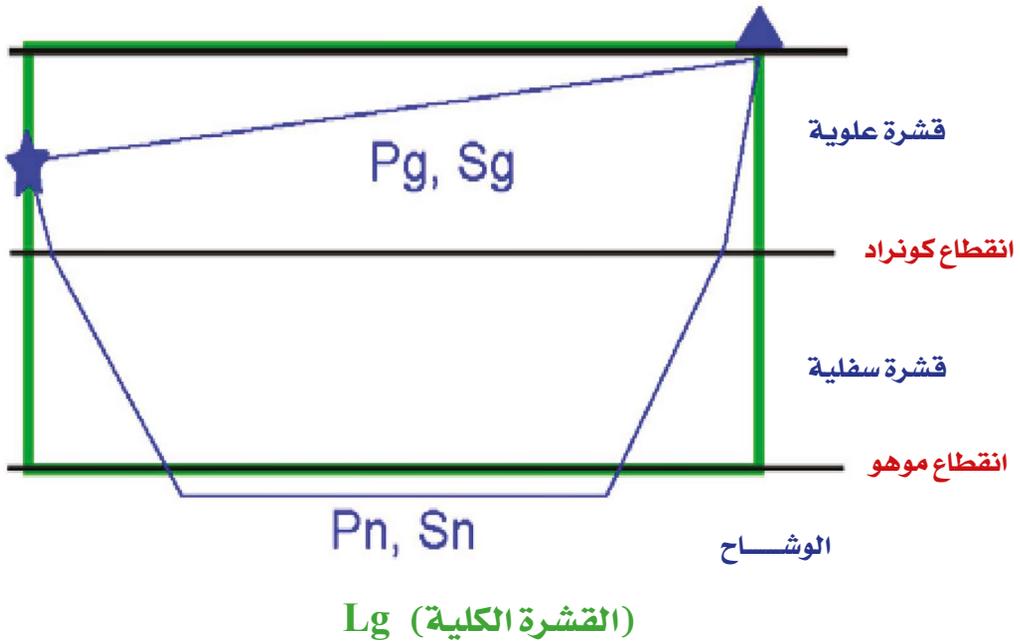
يؤدي **تغيير** السرعات **الزلزالية** داخل الأرض، وكذلك إمكانية تغيير النمط بين موجات **الانضغاط (P)** وموجات **القص (S)**، إلى العديد من **مسارات** الموجات **الممكنة**. ينتج كل **مسار** مرحلة **زلزالية** منفصلة على مخططات **الزلازل**. يتم وصف المراحل الزلزالية بحرف واحد أو أكثر، يصف كل منها جزءاً من مسار الموجة. تشير الأحرف الكبيرة إلى السفر عبر جزء من الأرض، مثل (P أو S)، بينما تشير الأحرف الصغيرة إلى انعكاسات من الحدود. ينقسم انتشار الموجات في الأرض إلى مسارات بعيدة المدى (Teleseismic) (مسافات أكبر من 2000 كيلو متر) ومسارات **إقليمية** (مسافات أقل من 2000 كيلو متر).





انعكاس وانكسار الأطوار الزلزالية في باطن الأرض

لاحظ كونراد نبضة حادة صغيرة بين Pn و P أطلق عليها اسم P*، وعزاها إلى الانكسار من خلال طبقة وسيطة بسرعة حوالي 6.5 كم / ثانية. سميت الحدود العليا لهذه الطبقة بانقطاع كونراد، الذي يفصل الطبقة الجرانيتية العليا من القشرة عن الطبقة البازلتية السفلى واقترح ترميزاً لها مثل Pg و Sg و S*، P*، إن Pg و Sg هما عملياً نفس الموجتين P و S. إن تحويل المراحل الزلزالية من P إلى S (Ps) أو S إلى P (Sp) عند انقطاع Moho راسخ جيداً، يشار إلى الأشعة المنعكسة من انقطاع Moho على أنها Pp (أو PmP) و Ss (أو SmS).



تمثيل مبسط لقشرة الأرض موضحاً عليها الانقطاعات السيزمية وانعكاس وانكسار
الأطوار الزلزالية



وفيما يلي توضيح للرموز المستخدمة في الأطوار السيزمية والمتعارف عليها في الأوساط العلمية:

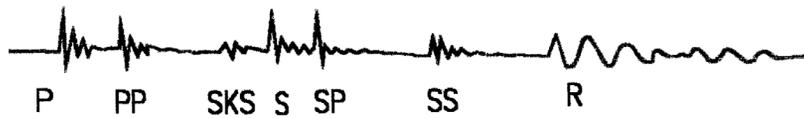
الرمز	التعريف
P	موجة طولية (P)
S	موجة قصيرة (S)
Small p	أطوار العمق (P)
Small s	أطوار العمق (S)
c	انعكاس من الحد الفاصل بين اللب الخارجي والوشاح (CMB)
K	موجة مخترقة اللب
i	موجة منعكسة من حد اللب الداخلي
I	موجة مخترقة اللب الداخلي
diff	موجة حصل لها حيود أو تشتت عند الحد الفاصل بين اللب الخارجي والوشاح (CMB)
أمثلة	.PcP، pPcS، SKS، PKKP، PKiKP، PKIKP، sSS، pSSS، sPcS، etc

تنتقل الموجات الزلزالية التي تصل إلى مسافة تتجاوز 10 حتى 30 درجة تقريباً عبر الوشاح العلوي (Moho إلى 410 كم) وعبر المنطقة الانتقالية إلى الوشاح السفلي (410-660 كم). الانقطاعات القوية في المنطقة الانتقالية لها عائق صوتي قوي *seismic impedance* (أي الكمية V_{xp} ، التي تزداد مع زيادة السرعة V والكثافة ρ). ينتج عن هذه النتائج تضاعف منحني وقت



السفر Triplications **لموجات P وموجات S** التي تؤدي إلى أشكال **موجية** معقدة قصيرة المدى تتكون من **تسلسل** بدايات متتالية ذات **سعة** مختلفة. تم تصنيف قاعدة المنطقة الانتقالية على أنها منطقة D، التي قد تكون ناجمة إما عن التمايز الكيميائي في الوشاح إما عن طريق التفاعلات الكيميائية بين اللب والوشاح.

على مسافات مركزية بين حوالي **30 و 100 درجة**، تنتقل **الموجتان P و S** عبر الوشاح السفلي الذي يتميز بسرعة موجبة وسلسلة إلى حد ما وتدرج كثافة. تم تصميم سجلات الزلازل بشكل واضح باستخدام وصول موجات P و S، متبوعاً بانعكاسات متعددة لحدود السطح بين اللب الخارجي والوشاح (CMB). يؤدي وجود انخفاضات كبيرة في السرعة عبر الإشعاع CMB إلى انحراف طاقة الموجات **الزلزالية** إلى منطقة **الظل** الهندسية على مسافات **تزيد** على **100 درجة**.

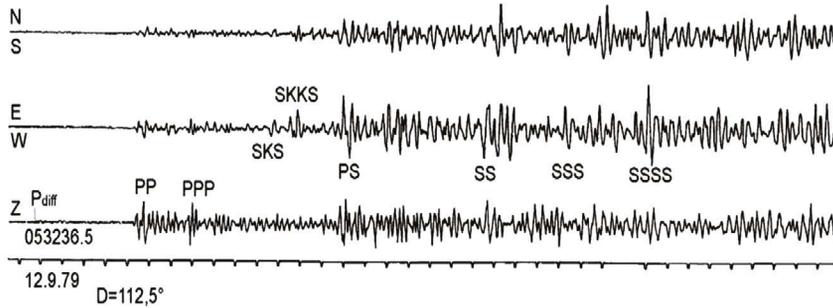
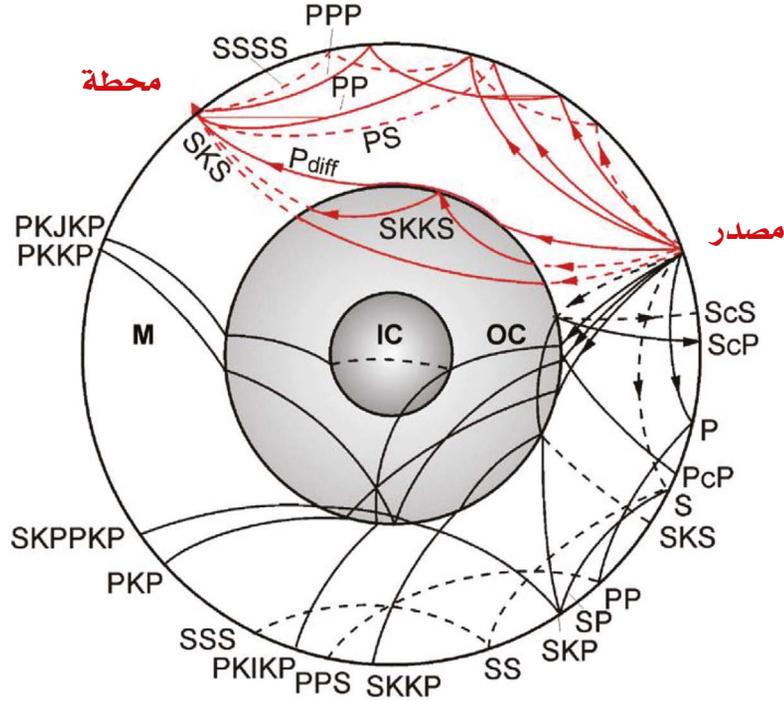


سجل زلزالي يوضح الأطوار الزلزالية المحولة عند الحد الفاصل بين اللب الخارجي والوشاح (CMB)



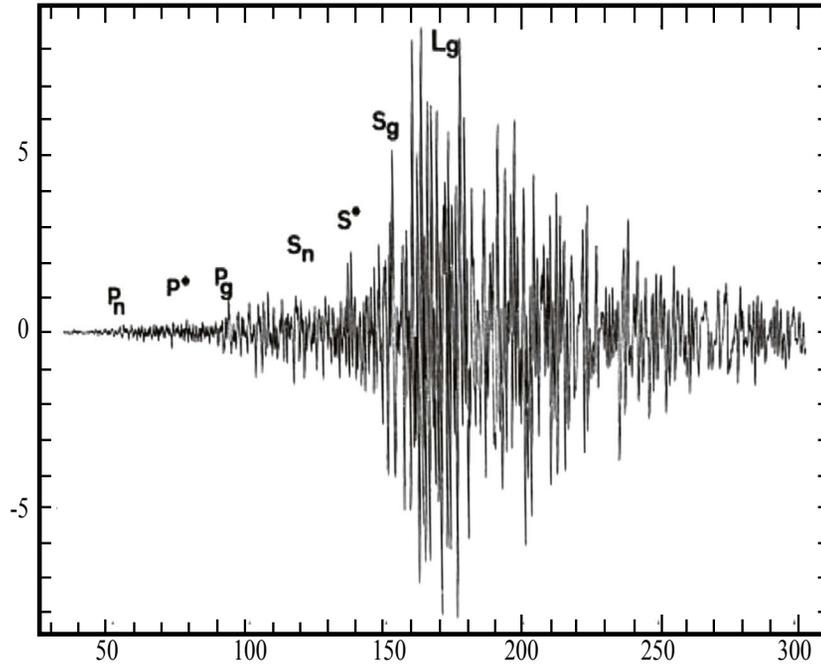
بعد **100 درجة**، تدخل **الموجة P** فقط في **اللب** الخارجي وتصل إلى السطح. هناك انخفاض كبير في سرعة الموجة **P**، من **13.7 كم / ثانية** في الجزء السفلي من الوشاح إلى **8.0 كم / ثانية** في اللب الخارجي العلوي. تشكل هذه الموجة **P** ظلاً أساسياً. لاحظ أولدهام (1906) لأول مرة أن الموجة **P** التي تصل إلى النقطتين المضادتين لزلازل متأخرة، مقارنةً بوقت الوصول المتوقع. اقترح وجود **نواة** ذات سرعة أقل من المنطقة الخارجية، وتوقع وجود منطقة **ظل** Shadow zone. تحقق **جوتنبرج** (1912) من وجود منطقة **ظل** لـ **P** بين $\Delta = 105^\circ$ و $\Delta = 143^\circ$ مع وصول قوي إلى ما بعد **143 درجة**. قدر **جوتنبرج** العمق إلى الحدود الأساسية بـ **2900 كم**. منطقة الظل من اللب الداخلي ليست كاملة، هناك وصول **موجات P** ذات سعة صغيرة عبر **المنطقة** بأكملها. اقترح **ليمان** (1935) أن هذه **تنشأ** من **النواة** الداخلية ذات **السرعة** العالية داخل اللب الرئيسي.



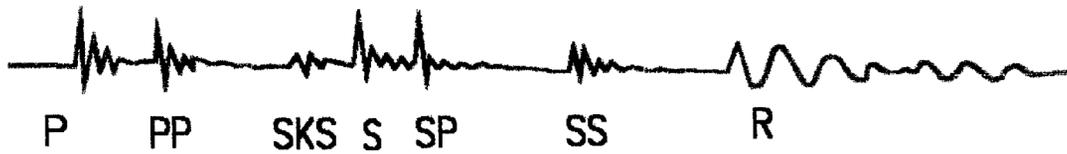


في الأعلى: مسارات الأشعة السيزمية عبر الوشاح (M) واللب الخارجي (OC) واللب الداخلي (IC) للأرض (أعلاه) مع رموز الطور ذات الصلة. الأشعة الحمراء تتعلق بالمراحل الزلزالية تم تحديدها في مخطط الزلازل ذي النطاق العريض SKD المكون من 3 مكونات (أسفل) موجات الجسم المحولة من زلزال على مسافة مركزية 112.5 درجة





سجل زلزالي يوضح الأطوار الزلزالية المحولة في القشرة القارية على مسافات قصيرة (Pg و Sg) وإقليمية (Lg) والمنكسرة عند الحد الفاصل بين القشرة القارية والمحيطية (انقطاع كونراد) والحد الفاصل بين القشرة والوشاح العلوي (انقطاع موهو Pn ، Sn)





مسار الأطوار السيزمية في باطن الأرض

موجة Lg

هي نوع من الموجات الموجهة في القشرة القارية. هذه هي في الأساس موجات لوف السطحية عالية التردد على مسافات إقليمية من القشرة القارية السميكة. تسافر Lg عبر مسارات قارية طويلة مع فقد قليل نسبياً من الطاقة، ولكنها تتقطع فجأة عندما يحتوي المسار على جزء محيطي صغير. يشير الحرف المنخفض Lg إلى طبقة الجرانيت. تحدث موجات Lg بشكل خطير على انقطاع Moho عن طريق الانعكاسات المتعددة داخل القشرة بسرعة نموذجية 3.5 كم / ثانية. تهيمن هذه الموجات على مخططات الزلازل، وخاصة القنوات الأفقية. عادةً ما يتم تسجيل Lg على مسافات مركزية تبلغ حوالي 5 درجات وأكبر من ذلك، وتم تعريفها على أنها أداة لإيجاد حدود البنية القارية.

موجة Rg

على مسافات محلية أو إقليمية، يُعرف النمط الأساسي للترددات العالية لموجات رايلي على أنه Rg. يعد وجود موجة Rg ذات الفترة الدورية القصيرة في مخطط الزلازل مؤشراً موثقاً به لحدث ضحل جداً، مثل: (الزلازل، والانفجار النووي، وانفجار الألغام، وما إلى ذلك). بعبارة أخرى، غياب Rg يدل على ان الحدث الزلزالي عميق. تنتقل موجات Rg ذات الفترة القصيرة كموجات موجهة عبر القشرة القارية بسرعة 3 كم / ثانية؛ مدى انتشارها يقتصر على 600 كم أو أقل.





الموجة الثالثة Tertiary wave

المصطلح T-wave في علم الزلازل يعني حرفياً الموجة الثالثة أو الموجة الثلاثية. هذه موجات بطيئة، تصل لفترة طويلة بعد الموجة الأولية (P) الأسرع أو الموجة الثانوية (S). يتم رصد هذه الموجات في المحطات الزلزالية الساحلية التي تسجل زلازل تحت المحيط على مسافات إقليمية.

موجة pP

هي موجة P التي بدأت صعوداً من المصدر ("P")، وانعكست عن سطح الأرض، وانتقلت إلى المحطة كموجة ("P").

sP

هي موجة S التي بدأت صعوداً من المصدر ("S")، وانعكست على سطح الأرض وتحولت أيضاً إلى موجة P، التي انتقلت بعد ذلك إلى المحطة على شكل موجة ("P").

pwP

على غرار طور الموجة pP. عبارة عن موجة م P التي بدأت صعوداً من المصدر ("P")، وانعكست عن سطح المحيط ("W" - الماء) وانتقلت إلى المحطة كموجة ("P").



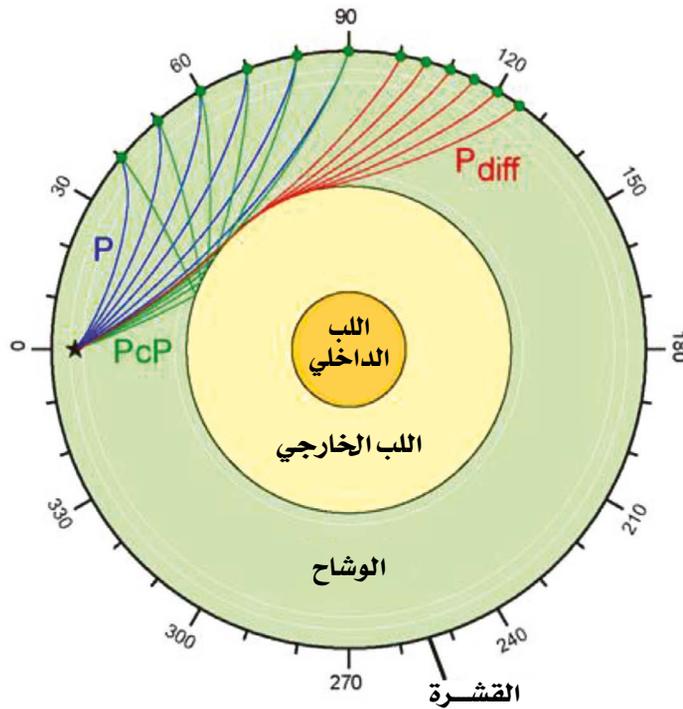


Pg (Sg)

على مسافات قصيرة لمحطة الحدث، موجة صاعدة P (S) من مصدر في القشرة العليا أو قاع موجة P (S) في القشرة العليا. على مسافات أكبر، تشتمل مرحلة Pg على الوافدين الناتج عن ارتدادات متعددة للموجة P داخل القشرة بأكملها، التي تنتشر بسرعة مجموعة حوالي 5.8 كم / ثانية.

Pn (Sn)

عبارة عن موجة P (S) في قاع الوشاح العلوي أو موجة P صاعدة من مصدر في الوشاح العلوي.





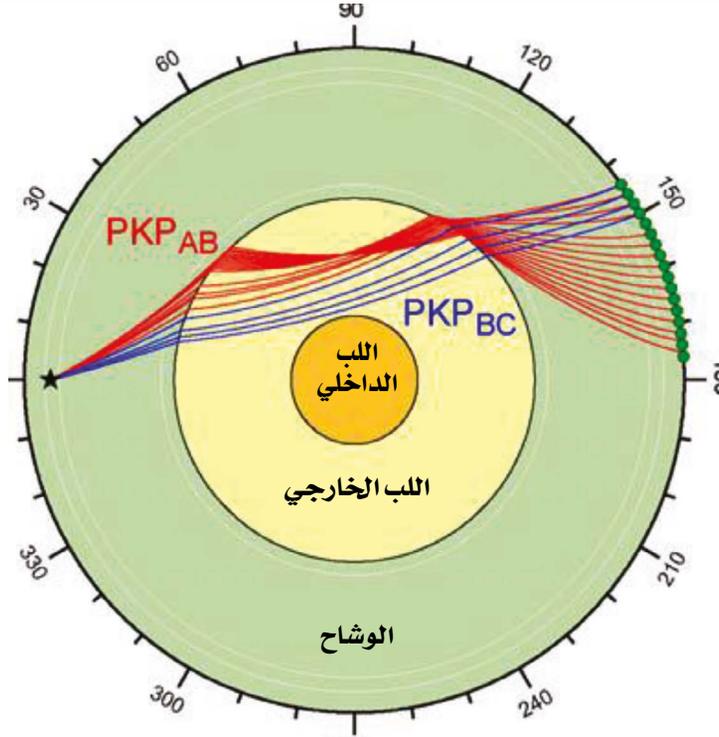
P : موجة أولية (انضغاطية) تتبع مساراً بسيطاً من مصدر الحدث إلى المحطة.

PcP : موجة P تنزل الى أسفل عبر الوشاح («P» الأولى) ثم تنعكس من أعلى اللب الخارجي («c») وتتجه صعوداً عبر الوشاح إلى المحطة («P» الثانية).

Pdiff : موجة أولية P المنحنية (المنعرجة) حول حدود اللب الخارجي وتصل إلى محطة في «ظل» الشعاع للنواة الخارجية.

S : موجة ثانوية (قص) تتبع مساراً مشابهاً للموجة P (غير موضحة في الشكل).

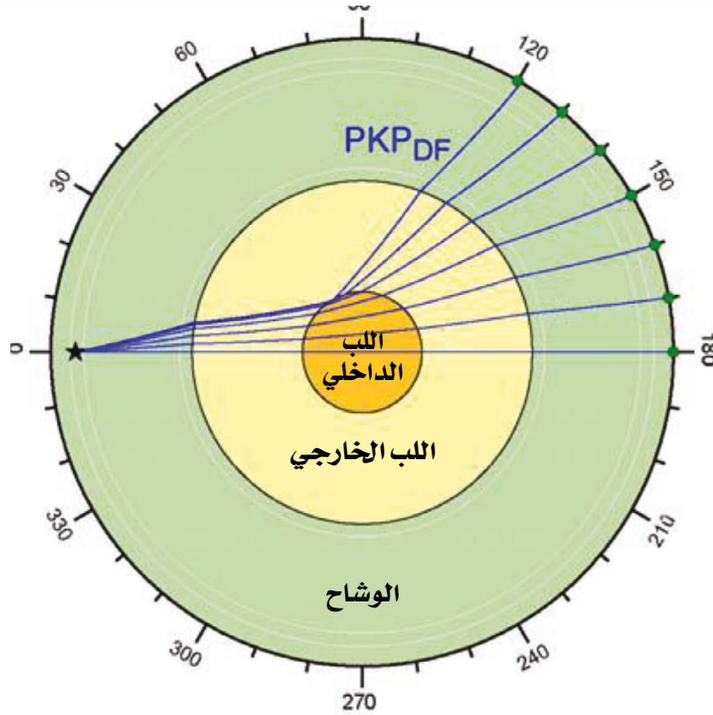




SS

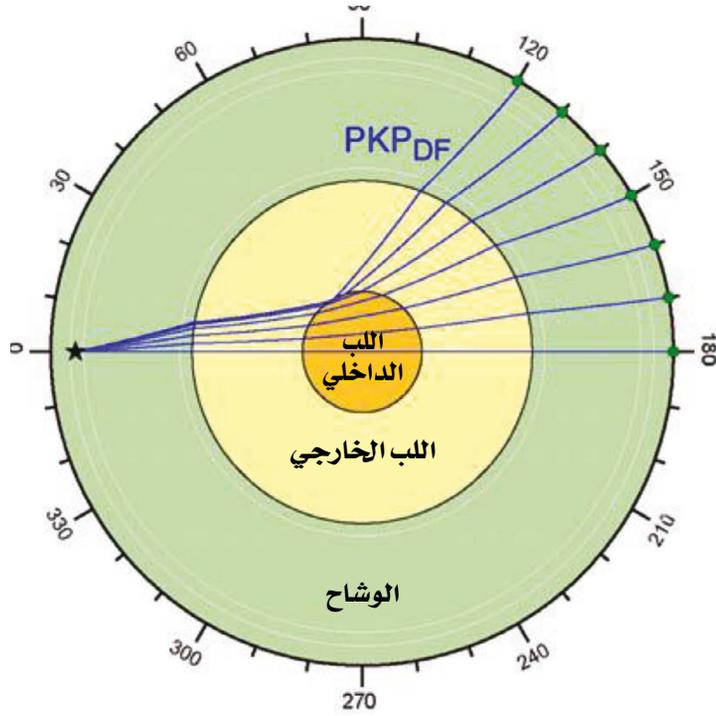
موجة **القص** التي انتقلت عبر **الوشاح** («S»), خضعت لانعكاس واحد من الجانب السفلي من سطح الأرض وانتقلت مرة أخرى عبر **الوشاح** («S» الثانية). على عكس معظم **الموجات** المنعكسة الأخرى، لا يوجد حرف **منفصل** للدلالة على **الانعكاس** على السطح؛ إنه ضمني.

PP موجة **انضغاطية** تتبع **مسارات** مشابهة لمسارات **SS** (غير موضحة في الشكل).



PKP

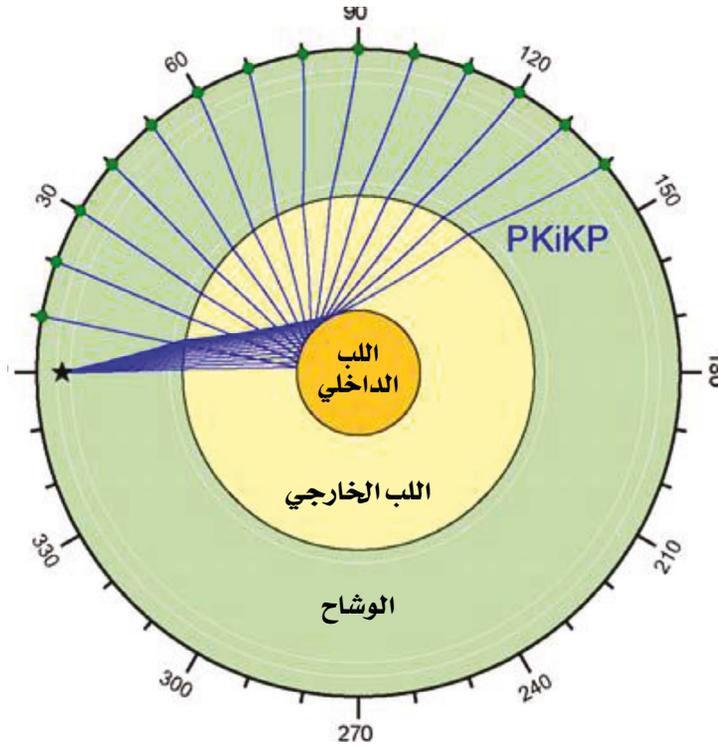
عبارة عن موجة P التي انتقلت عبر **الوشاح** («P»), تم نقلها عبر **حدود اللب الخارجي للوشاح** وانتقلت عبر **اللب الخارجي** («K»), ثم **انتقلت** عائدة عبر الحدود الخارجية **للغطاء الخارجي** وانتقلت **كموجة P** إلى المحطة («P»). بسبب **الاختلاف الكبير** بين سرعة **الموجة P** في **الوشاح** و**اللب الخارجي**، **تنحني** هذه **الموجة** (تتكسر) **بقوة** عند الحدود. يمكن أن **تتبع** **الموجات الزلزالية** مسارات **مختلفة قليلاً** (تسمى PKP_{AB} , PKP_{BC}) **ولا تزال** تصل في **نفس الوقت** تقريباً.



PKIKP

عبارة عن موجة P التي انتقلت عبر الوشاح («P»)، تم نقلها عبر حدود اللب الخارجي والوشاح («K»)، وعبرت حدود النواة الداخلية والخارجية للقلب وانتقلت عبر اللب الداخلي كموجة «P»، ثم اتبعت مساراً مماثلاً في الاتجاه المعاكس للانتقال من النواة الداخلية إلى المحطة («KP» الثانية). الاسم البديل لهذه المرحلة هو PKP_{DF} . (يظهر في الرسم التوضيحي للمسار).





PKiKP

اتبع هذا **الطور** سلسلة من **المسارات** المشابهة ل**طور** PKiKP، إلا أنها انعكست على **الجزء** العلوي من حدود **اللب** الداخلي والخارجي (هذا هو الجزء «i» من **المسار**)، بدلاً من أن **تنتقل** عبر **اللب** الداخلي.





نماذج وقت السفر العالمية Global Travel-time Models

تم مراجعة **منحنيات** المسافة الزمنية بواسطة Jeffreys (1932) **بتقنية** المربع الصغرى. في هذه **الطريقة**، يتم تقليل القيم **المتبقية**، أي **الفروق** بين أوقات الوصول المرصودة لـ P أو S وأوقات وصولها المحسوبة بناءً على الموقع الأولي ومنحنيات وقت السفر الأولية، عن طريق الضبط المتزامن لإحداثيات مركز الزلزال ووقت المنشأ ومنحنى وقت السفر.

يصبح عدد المعادلات كبيراً جداً مع استخدام المزيد من الزلازل والمحطات. ومع ذلك، ابتكر جيفريز طريقة لمعالجة الملاحظات في مجموعات. أنتج هذا التحليل بالتعاون مع جداول Bullen (1935) وجداول Jeffreys-Bullen (J-B) (1940) هذا يعطي أوقات سفر معدلة لموجات P و S وأيضاً للموجات المنعكسة والمنكسرة **كوظائف** لمسافات القوس Δ .

نموذج PREM **لسنوات** عديدة كان **النموذج** 1-D الأكثر استخداماً للسرعات **الزلزالية** في الأرض هو نموذج الأرض **المرجعي** الأولي (PREM) لـ Dziewonski و Anderson (1981). تم **تصميم** هذا **النموذج** ليلائم مجموعة **متنوعة** من مجموعات **البيانات** المختلفة، بما في ذلك **قياسات** تردد مركز **التذبذب** الحر، ورصد **تشقت** الموجة السطحية، وبيانات وقت السفر لعدد من مراحل **موجة** الجسم، والبيانات **الفلكية** الأساسية (نصف قطر الأرض، الكتلة، ولحظة الجمود). من أجل ملاءمة ملاحظات موجات **لوف** ورايلي في نفس الوقت، يكون PREM **متاحي الخواص** بشكل عرضي بين عمق 80 و 220 كم في **الوشاح** العلوي. الخواص **المستعرضة** هي شكل **متماثل** كروياً من **التباين**





حيث **تنتقل** موجات SH و SV بسرعات **مختلفة**. جميع **نماذج** Earth الحالية لها قيم قريبة **بشكل** معقول من PREM. توجد **أكبر** الاختلافات في **الوشاح** العلوي حيث يُظهر PREM انقطاعاً عند **220 كم** وهو غير موجود في **معظم** الطرز الأخرى.

في عام 1987، بدأت **الرابطة الدولية لعلم** الزلازل والفيزياء الداخلية للأرض (IASPEI) **جهداً** دولياً كبيراً **لإنشاء** جداول زمنية سفر عالمية جديدة لتحديد موقع **الزلازل** وتحديد **المرحلة**. نتيجة لذلك، تم **تطوير** نموذجين: IASP 91 و SP6 (Kennett and Engdahl, 1991). **تكمن** الاختلافات الأكثر أهمية بين هذه **النماذج الجديدة** ونموذج وقت السفر **الأقدم** J-B في **الوشاح** العلوي واللب. تم اعتماد **نموذج** IASP 91 كنموذج **مرجعي** عالمي لمركز البيانات الدولي في **فيينا**. في وقت لاحق قام **كينيت** وآخرون (1995) باستخدام خصائص طرازي IASP 91 و SP 6، و**تحسين** النموذج **المرجعي العالمي** إلى AK 135. يختلف **نموذج** AK 135 عن IASP 91 فقط في **تدرج** السرعة للطبقة D وفي **خط الأساس** لـ أوقات **السفر** S-wave.





البيانات الزلزالية

العديد من المنظمات ترصد الزلازل في جميع أنحاء العالم. توفر معاهد البحث التعاوني لعلم الزلازل (IRIS) و مركز المعلومات الوطني الأمريكي للزلازل NEIC والمركز الدولي للزلازل قاعدة بيانات زلزالي عريض متاحة للباحثين. يعد برنامج Seismographs in Schools مكاناً رائعاً للبدء. يمكنك البحث عن بيانات من الزلازل باستخدام خريطة العالم والعثور على روابط للمحطات التي سجلت ذلك.





الرصد الزلزالي

أجهزة الرصد الزلزالي

راصد الزلازل Seismometer

يأتي مقياس الزلازل من جذور الزلازل اليونانية، «مقياس اهتزاز»، ومترون، «مقياس». تعتمد جميع الراصدات تقريباً على أنظمة البندول بالقصور الذاتي الرطب بشكل أو بآخر. يتم ربط إطار مقياس الزلازل بشكل صارم بالأرض. عندما تهتز الأرض، يمكن لمقياس الزلازل أن يقيس بالضبط مقدار تحركه لأعلى ولأسفل. يأتي قياس نشاط الزلزال من مقارنة الحركة النسبية للوزن مقارنة بالإطار.



راصد زلزالي واسع المدى من نوع STS-2



قد يكون **Seismograph** بندولاً أو كتلة مركبة على **زنبرك**؛ ومع ذلك، غالباً ما يتم استخدامه بشكل **مترادف** مع «جهاز قياس الزلازل». وتوضع الراصدات في أماكن نائية بعيدة عن المنشآت العمرانية نظراً لحساسيتها ودقتها العاليتين في التقاط الهزات الأرضية. وتوضع الراصدات في ثلاثة اتجاهات عمودية وأفقية شمال - جنوب أو شرق - غرب.

أجهزة قياس الزلازل Seismographs

هي أدوات تستخدم لتسجيل حركة الأرض أثناء الزلزال. يتم تثبيتها في الأرض في جميع أنحاء العالم وتشغيلها كجزء من شبكة رصد الزلازل. يتم تثبيت جهاز قياس الزلازل بإحكام على سطح الأرض بحيث عندما تهتز الأرض، تهتز الوحدة بأكملها معها باستثناء الكتلة الموجودة في الزنبرك، الذي يعاني من القصور الذاتي ويظل في نفس المكان. عندما يهتز جهاز قياس الزلازل تحت الكتلة، يسجل جهاز التسجيل الموجود على الكتلة الحركة النسبية بينه وبين بقية الجهاز، وبالتالي يسجل حركة الأرض. في الواقع، لم تعد هذه الآليات يدوية، بل تعمل عن طريق قياس التغيرات الإلكترونية التي تنتجها حركة الأرض فيما يتعلق بالكتلة. تم تصميم مقاييس الزلازل المستخدمة في دراسات الزلازل لتكون شديدة الحساسية لتحركات الأرض الصغيرة جداً.

سجلات الزلازل Seismograms

تقوم بتسجيل الموجات الزلزالية إما باستخدام الطرق البيانية بواسطة قلم تسجيل تتحرك أمامه وملامسة له أسطوانة مثبت عليها ورق خاص لهذا الغرض تسجل عليه الموجات الزلزالية على شكل خطوط متعرجة وتسمى السجلات

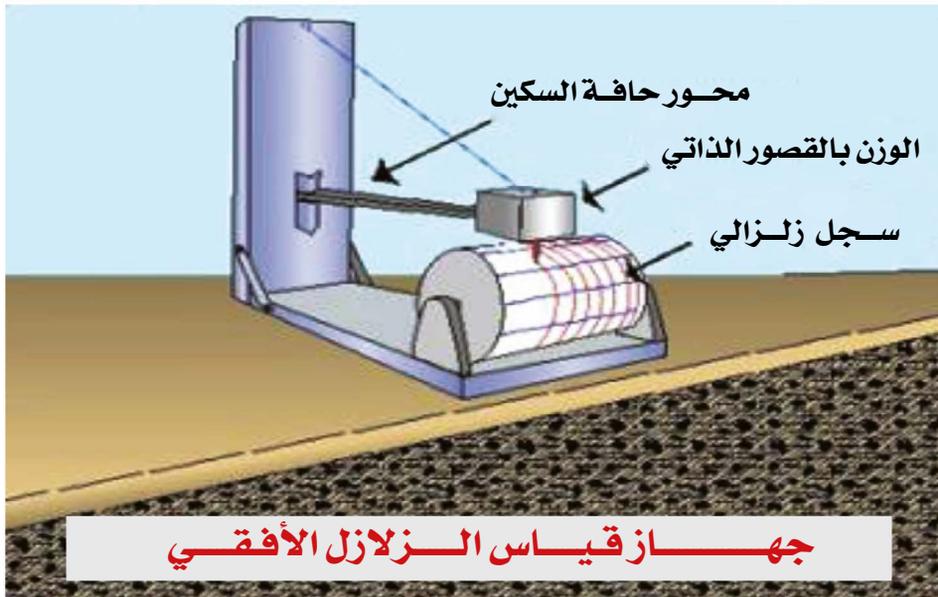
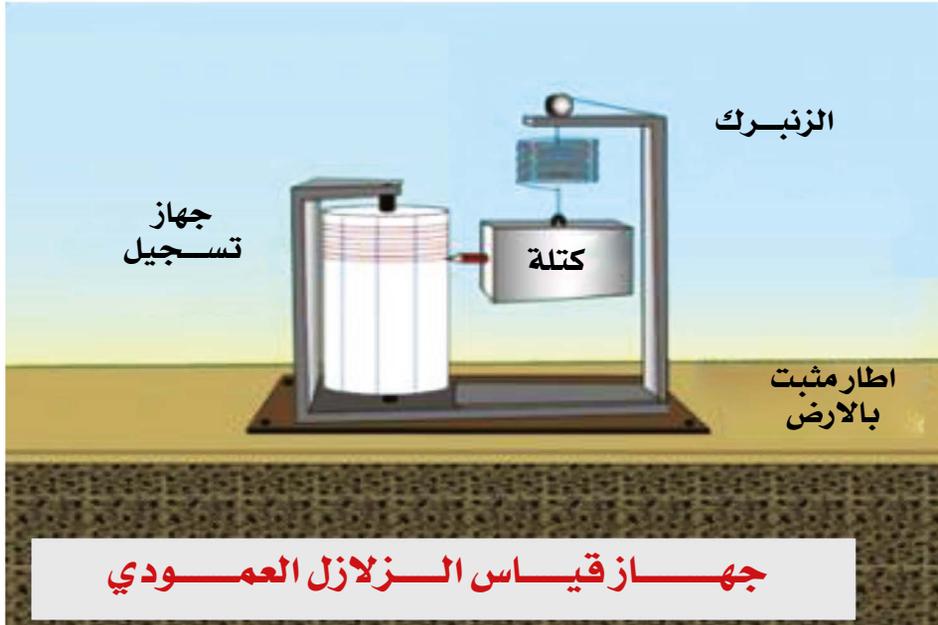




الزلزالية الورقية Seismograms. في سجل الزلازل، المحور الأفقي = الوقت (يقاس بالثواني) والمحور الرأسي = إزاحة الأرض (يقاس عادةً بالمليمترات). عندما لا تكون هناك قراءة للزلازل، يوجد فقط خط مستقيم باستثناء الاهتزازات الصغيرة الناتجة عن اضطراب محلي أو «ضوضاء» وعلامات الوقت.

أما الطرق الرقمية الحديثة فتستخدم أجهزة مغناطيسية أو أجهزة حاسبة متطورة لتخزين المعلومات الزلزالية وتتميز بأنها خالية من الضوضاء الزلزالية وسهولة تبادلها مع الأوساط العلمية الأخرى.. أصبحت مخططات الزلازل رقمية الآن - لم يعد هناك المزيد من التسجيلات الورقية.

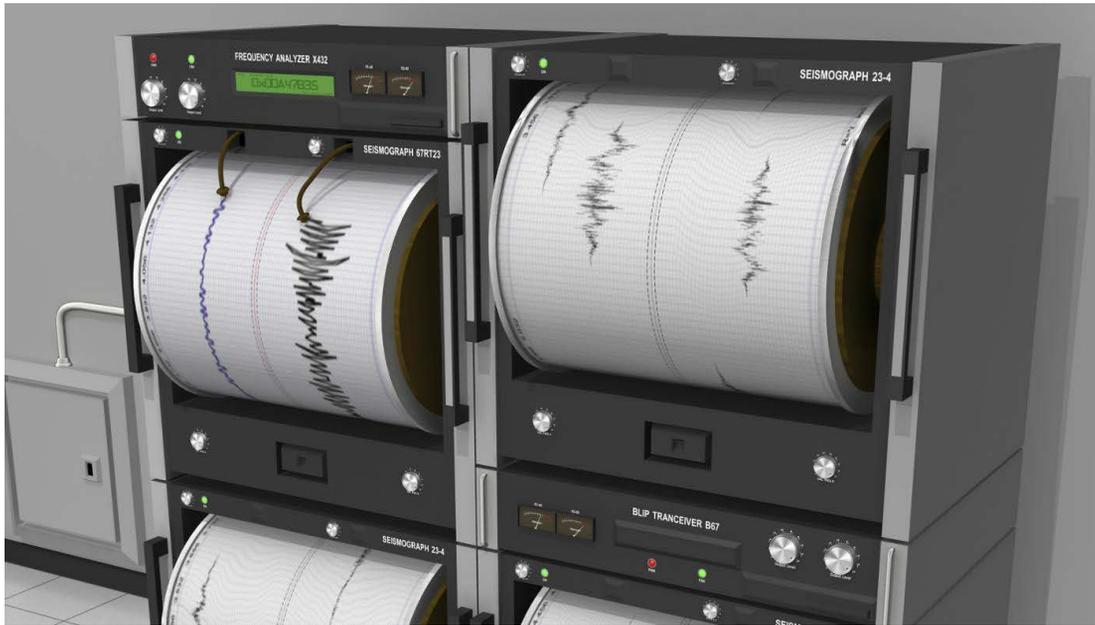




جهاز قياس الزلازل العمودي (أعلى الصورة) والأفقي (أسفل الصورة) من تصميم IRIS يميل القصور الذاتي للوزن المستدير إلى تثبيت القلم بينما تتحرك القاعدة



إن مقاييس الزلازل البحثية الحديثة إلكترونية، بمعنى أن الحركة النسبية بين الوزن والإطار تولد جهداً كهربائياً يتم تسجيله بواسطة الكمبيوتر. من خلال تعديل ترتيب الزنبرك والوزن والإطار، يمكن لأجهزة قياس الزلازل تسجيل الحركات في جميع الاتجاهات. تسجل أجهزة قياس الزلازل أيضاً الحركات الأرضية التي تسببها مجموعة متنوعة من المصادر الطبيعية، والتي من صنع الإنسان، مثل: الأشجار والسيارات والشاحنات، وتحطم أمواج المحيط على الشاطئ.



منظار الزلازل Seismoscope هو أداة تعطي مقياساً نوعياً للحركة التذبذبية الناتجة عن الزلزال أو أي اضطراب آخر في سطح الأرض. على عكس جهاز قياس الزلازل Seismograph، فإنه يفتقر إلى جهاز معايرة الوقت. توجد العديد من التصميمات والاختلافات، والعديد منها سهل البناء باستخدام مواد مشتركة.



لايستخدم **الجيولوجيون** مناظير **الزلازل** على نطاق واسع، لأن نطاق البيانات التي يمكنهم تسجيلها محدود عند مقارنتها **بالمعدات** الأكثر تطوراً. يمكن استخدام منظار **الزلازل** لإخبار الناس بالإخلاء قبل حدوث **تسونامي** محتمل. يبدو أن بعد الميلاد. كانت هذه جرة كبيرة من الخارج عبارة عن ثمانية رؤوس تتين تواجه الاتجاهات الثمانية الرئيسية للبوصلية.



أقدم منظار زلازل seismoscope معروف اخترعه الفيلسوف الصيني تشانغ هنغ في عام 132م عبارة عن إناء كبيراً من **البرونز**، يبلغ قطره حوالي مترين؛ عند **ثمانية** نقاط حول القمة كانت رؤوس **تتين** تحمل كرات برونزية. عندما يكون هناك **زلزال**، يفتح أحد الأفواه ويسقط كرته في ضفدع من **البرونز** في القاعدة، ويصدر صوتاً ويفترض أنه يُظهر اتجاه **الزلازل**.



مقياس الحركات القوية Accelerographs

هو مُسجِّل يكتشف تسارع الأرض و يسجل حركتها من حيث: الإزاحة و السرعة والتسارع. والجزء الداخلي منه عبارة عن **راصد التسارع Accelerometer**. تعتبر مقاييس التسارع أقل حساسية بكثير من أجهزة قياس الزلازل، ولكن لها نطاق أكبر بكثير، حيث تكتشف ± 2 جرام أو أكثر من تسارع الأرض (تبدأ الأشياء في التحليق عن الأرض عند 1 جرام، عندما يتم التغلب على الجاذبية). **مقاييس الزلازل** جيدة لاكتشاف مستويات صغيرة جداً من حركة الأرض (من أحداث صغيرة جداً أو بعيدة جداً)، ومقاييس التسارع جيدة في تسجيل **حركة أرضية قوية** من المحتمل أن تكون ضارة في موقع التسجيل. عادة ما تكون أجهزة قياس السرعة ذات الحركة القوية هي كل ما هو مطلوب لمراقبة استجابة الهيكل أثناء الزلازل، سواء أكان هذا المبنى أم الجسر أم السد أم **محطة الطاقة** أم أي بنية تحتية مهمة أخرى يمكن أن تتأثر بزلزال كبير. الإشارات التي تكون **ضعيفة جداً** بحيث لا يمكن رؤيتها بوضوح على جهاز قياس السرعة لن تكون عموماً مصدر قلق للسلامة الهيكلية للأصل.

سجل التسارع Accelerogram الذي تم الحصول عليه من أداة تسمى **مقياس التسارع Accelerograph** الذي يُظهر **تسارع نقطة** على الأرض أو نقطة في مبنى كدالة للوقت. عادةً ما يتم استخدام ذروة التسارع، وهي أكبر قيمة للتسريع على السجل في معايير التصميم. يتم اشتقاق **التواريخ الزمنية** للسرعة والإزاحة وطيف الاستجابة بشكل تحليلي من التاريخ الزمني للتسارع.



معايير مواقع محطات الرصد

يتم نشر **أجهزة قياس** الزلازل عن طريق حفر حفرة كبيرة يصل **عمقها** إلى **3 أمتار** ووضعها في الأرض، إن أمكن على قطعة **صلبة** من الصخور (صخرية أو صخرية صلبة) بحيث تلتقط الاهتزازات والحركات الصغيرة جيداً. يجب أن تكون مستوية تماماً وأن تظل جافة. يجب الإشارة إلى الشمال ليسهل معرفة الاتجاه الذي تأتي منه الطاقة الزلزالية. يجب وضعهم في أماكن هادئة حقاً حتى لا يسجل أشياء أخرى يمكن أن تجعل الأرض تتحرك قليلاً، مثل حركة الأشخاص، والسيارات، والأنهار، والرياح العاتية التي تتحرك بالقرب من جذور الأشجار وما إلى ذلك. يمكن للكتلة أن تتحرك بحرية في الداخل فقط. اتجاه واحد، لذلك تسجل أجهزة قياس الزلازل في ثلاثة اتجاهات مختلفة للحركة (أعلى / أسفل، شمال / جنوب، شرق / غرب) لوصف حركة الأرض في صورة ثلاثية الأبعاد.

في المواقع البعيدة، يلزم وجود ألواح شمسية لتوليد الكهرباء من الشمس. ستسجل أجهزة قياس الزلازل الحركات الصغيرة للأرض، وتجمع عينات من الحركة حتى **200 عينة** في الثانية. سيتم **إرسال** هذه المعلومات مباشرة إلى مركز التسجيل **عبر VSAT** أو تخزينها في ذاكرة نظام مسجل البيانات في الموقع حتى نعود في الزيارة التالية ونقوم بتنزيلها.





عموماً يتضمن إجراء اختيار موقع محطة الرصد الزلزالي في الطبيعة اتباع وتطبيق المعايير العلمية والإدارية التالية:

- إجراء الدراسة المكتبية أولاً وتشمل دراسة الخرائط وجمع معلومات حول المواقع المحتملة من الجهات ذات العلاقة والقريبة من موقع المحطة.
- دراسة المنطقة جغرافياً وجيولوجياً وتحديد الفوالق النشطة. يفضل اختيار الموقع الذي تكون صخور القاعدة جرانيتية أو متحولة وإذا تعذر ذلك يتم اختيار الصخور الرسوبية الصلبة التي لا تحتوي على فراغات أو فجوات.
- إمكانية الوصول إلى المحطة بسهولة.
- تحديد مصادر الضوضاء الزلزالية في المنطقة. قمم الجبال عادة ما تكون أكثر عرضة للضوضاء الزلزالية الناتجة عن الرياح، وضربات الصواعق،. لذلك يجب تجنب مثل هذه المواقع إن أمكن. يجب أيضاً مراعاة التضاريس لشبكات القياس عن بُعد للترددات الراديوية (RF).
- البُعد قدر الامكان عن مصادر الضوضاء البشرية على الطرق والسكك الحديدية والصناعات الثقيلة والتعدين وأنشطة المحاجر، والمناطق الزراعية المستغلة على نطاق واسع، والعديد من المصادر الأخرى من صنع الإنسان.
- يجب أخذ المعايير المناخية بالاعتبار وتشمل معرفة درجات الحرارة الدنيا والقصوى وسرعة الرياح القصوى في المواقع. تعتبر الرياح من أكبر مصدر الضوضاء الزلزالية؛ لذا فإن المواقع التي تقل فيها الرياح أفضل من المواقع التي تتعرض للرياح.
- هناك حاجة لبيانات الطاقة الشمسية لتحديد الحجم الأدنى المطلوب للألواح الشمسية، إن وجدت مطلوبة لتوفير الطاقة.
- يجب معرفة كمية هطول الأمطار والبُعد عن مواقع الصواعق.
- يجب التحقق من ظروف إرسال بيانات التردد اللاسلكي المحلية (إن وجدت) وكذلك التحقق من توفر خطوط الكهرباء والهاتف.



مواصفات ومكونات محطة الرصد

- ✓ حفر وإنشاء غرفة معزولة عمقها 3 أمتار تقريباً يوضع بداخلها اللواقط واسعة المدى فوق قاعدة أسمنتية على صخور الأساس الصلبة.
- ✓ عزل الراصد بصوف حراري من أجل تقليل تأثير الاختلاف في درجات الحرارة.
- ✓ ترك مسافة مقبولة بين الأجهزة الإلكترونية المخصصة لقياس البيانات والبطارية والألواح الشمسية.
- ✓ حماية المحطة بسياج من الأسلاك الشائكة.

تشمل التجهيزات في كل محطة رصد زلزالية على:

- ✓ الراصد Seismometer: هو عبارة عن جهاز لتحويل الموجات الزلزالية إلى إشارة رقمية تناظرية تُعبّر عن سرعة الموجات الزلزالية.
- ✓ المرقم Digitizer: عبارة عن جهاز لتحويل الإشارة الكهربائية التناظرية الصادرة من اللاقط إلى إشارة رقمية، ومن ثم يتم تحويلها إلى بيانات رقمية لتخزينها في الجهاز و إرسالها من خلال منظومة الاتصالات إلى المركز الرئيسي، ويتضمن جهاز تحديد المواقع (GPS) وذلك لضبط الوقت بدقة.



مرقم الإشارة الزلزالية

✓ منظومة الاتصالات الفضائية. عبارة عن نظام اتصالات يقوم بإرسال واستقبال البيانات من خلال الأقمار الاصطناعية ويفضل استخدام تقنية *VSAT* التي تسمح باستخدام هوائى صغير نسبياً و جهاز الإرسال و الاستقبال، ويتضمن *GPS* وذلك لضبط الوقت بدقة لتحقيق التزامن بين المحطات ومركز الاستقبال.

✓ منظومة الطاقة. تقوم بإمداد جميع المكونات بالطاقة الكهربائية التي تحتاجها وتتكون هذه المنظومة من: خلايا شمسية - مُنظَم شحن للخلايا الشمسية - بطاريات خاصة بمنظومة الطاقة الشمسية.



عمل ميداني لمحطة رصد زلزالية في منطقة نائية بعيدة عن الضوضاء

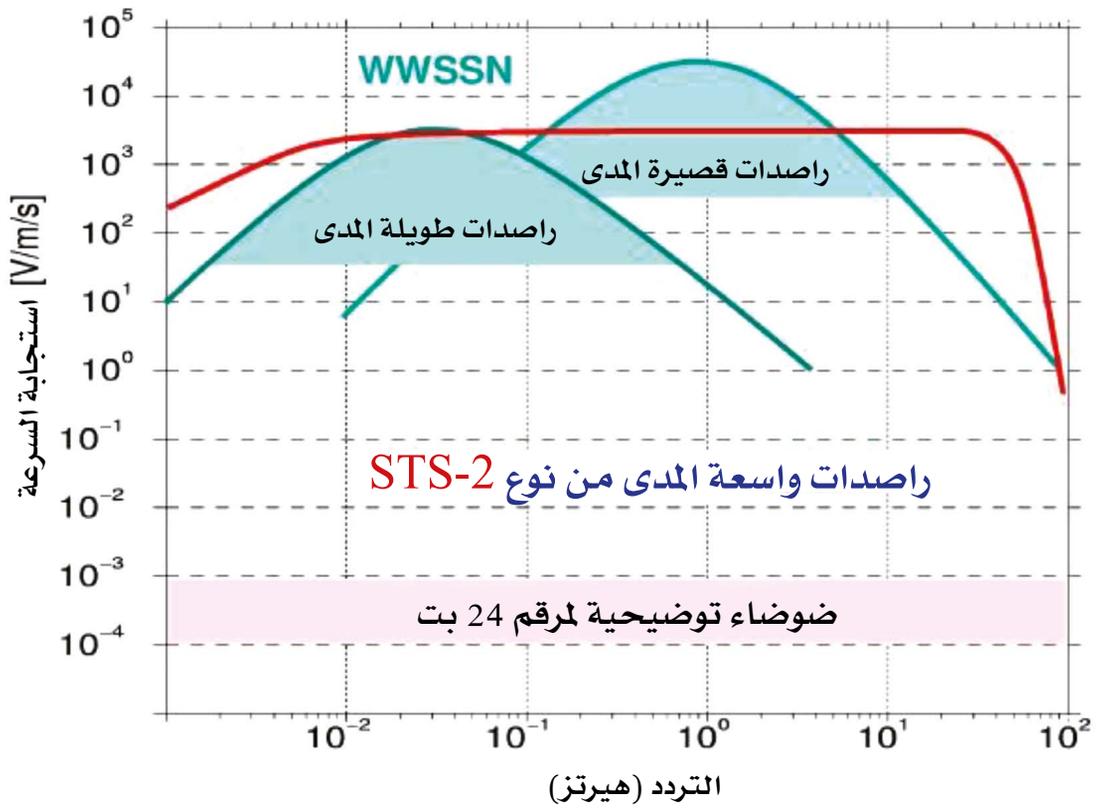


المدى الترددي للأجهزة والأحداث الزلزالية

حديثاً أمكن تمييز عدة أنواع من التحليل الطيفي للموجات الزلزالية. ونظراً للطيف العريض الذي تقع فيه الأطوار الموجية في مجال الدورة الزمنية (Period) في المجال المحصور بين (0.1 ثانية - 1 ساعة) وكذلك في المجال الترددي (Frequency) في المجال المحصور بين (0.05 - 50 هرتز) ولاستيعاب هذه الأطياف الموجية فإن المراصد الزلزالية تحتوي في الأساس على الأجهزة الأساسية الآتية:

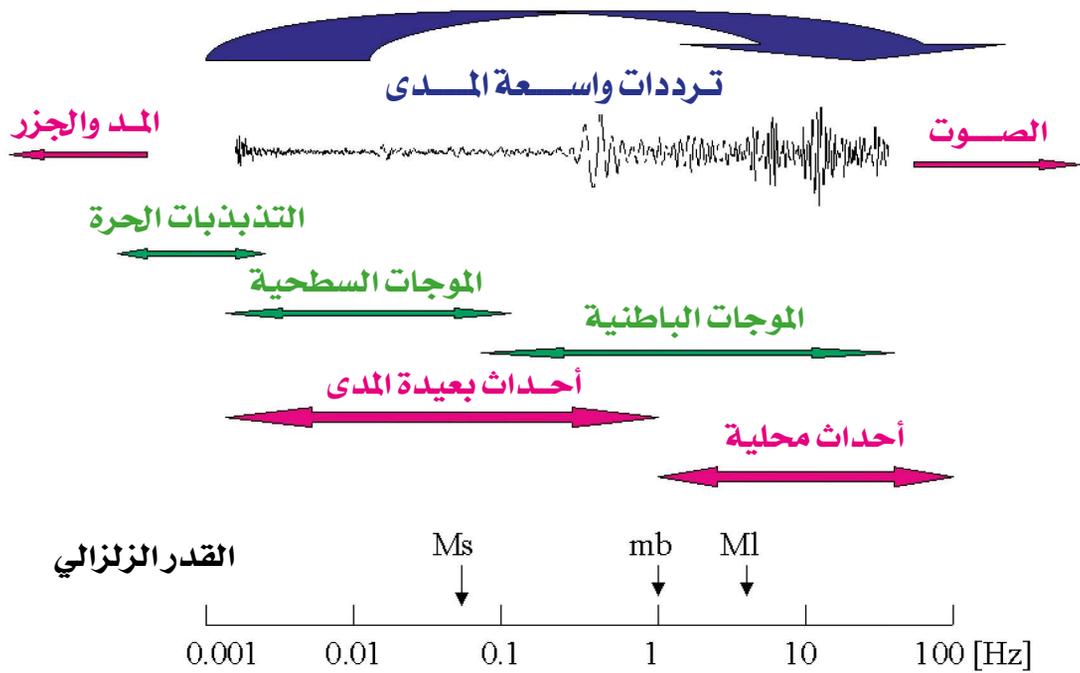
- أجهزة الترددات القصيرة: ثلاثة مركبات (E-W، N-S، Z) (Short Period Seismographs) وهي مخصصة للزلازل المحلية القريبة وللدورة زمنية محصورة بين (0.1 - 2 ثانية).
- أجهزة الترددات المتوسطة: ثلاثة مركبات (E-W، N-S، Z) (Intermediate Period Seismographs)، وهي مخصصة للزلازل القريبة والبعيدة نسبياً وفي سعة محصورة بين (2 - 15 ثانية).
- أجهزة الترددات الطويلة: ثلاثة مركبات (E-W، N-S، Z) (Long Period Seismographs) وهي مخصصة للزلازل البعيدة (Teleseismic) وللدورة زمنية محصورة بين (15 ثانية - 1 دقيقة).
- أجهزة التردد الواسع: (Broad Band Seismographs) وهي مفتوحة لكافة الدورات الزمنية ولأكبر من دقيقة واحدة وبمدى ترددي (0.05 - 50 هرتز).
- أجهزة التسجيل العنيف: (Strong Motion Seismographs) وهي مخصصة للتشغيل عند وقوع الزلازل الكبيرة المقدار لتسجيل مركبات التعجيل الأرضي لاستخدامها في الدراسات الزلزالية الهندسية.





المدى الترددي للراصدات ذات الفترة الدورية القصيرة **SP** والطويلة **LP** وواسعة المدى **BB**





المدى الترددي للموجات والأحداث الزلزالية



قياس الضوضاء الزلزالية

الضوضاء الزلزالية الخلفية هي مشكلة لا مفر منها في مراقبة الزلازل. تتخفف اتساع الموجات القادمة مع المسافة والحجم الزلزالي. تؤدي تأثيرات انتشار المسار، مثل التوهين والبنية المرنة إلى تغيرات في السعات الزلزالية. تمنع الضوضاء اكتشاف الوافدات الزلزالية الضعيفة (المراحل) من الأحداث البعيدة و / أو الصغيرة.

تتولد الضوضاء الزلزالية من مجموعة متنوعة من المصادر. وتشمل هذه المصادر من صنع الإنسان، مثل: (الطرق، والآلات) والمصادر الطبيعية، مثل: (الرياح وأمواج المحيطات، وتأثيرات درجات الحرارة). يمكن أن تختلف خصائص الضوضاء بين النهار وساعات الليل وبين المواسم، مثل: (الصيف، والشتاء). كما أن الطابع الجيولوجي لوضع مقياس الزلازل له تأثير كبير على الضوضاء - مواقع الصخور الصلبة عادةً ما يكون لها مستويات ضوضاء أقل من المواقع الموجودة على الصخور المتجمدة أو الرسوبية أو المواد غير المجمععة. نظراً لتنوع مصادر الضوضاء وتنوع الضوضاء والانتشار وخصائص الموقع في مواقع الشبكة، فإن خصائص الضوضاء في المحطات الزلزالية تعتمد على التردد ويمكن أن تكون شديدة التباين بين المواقع.

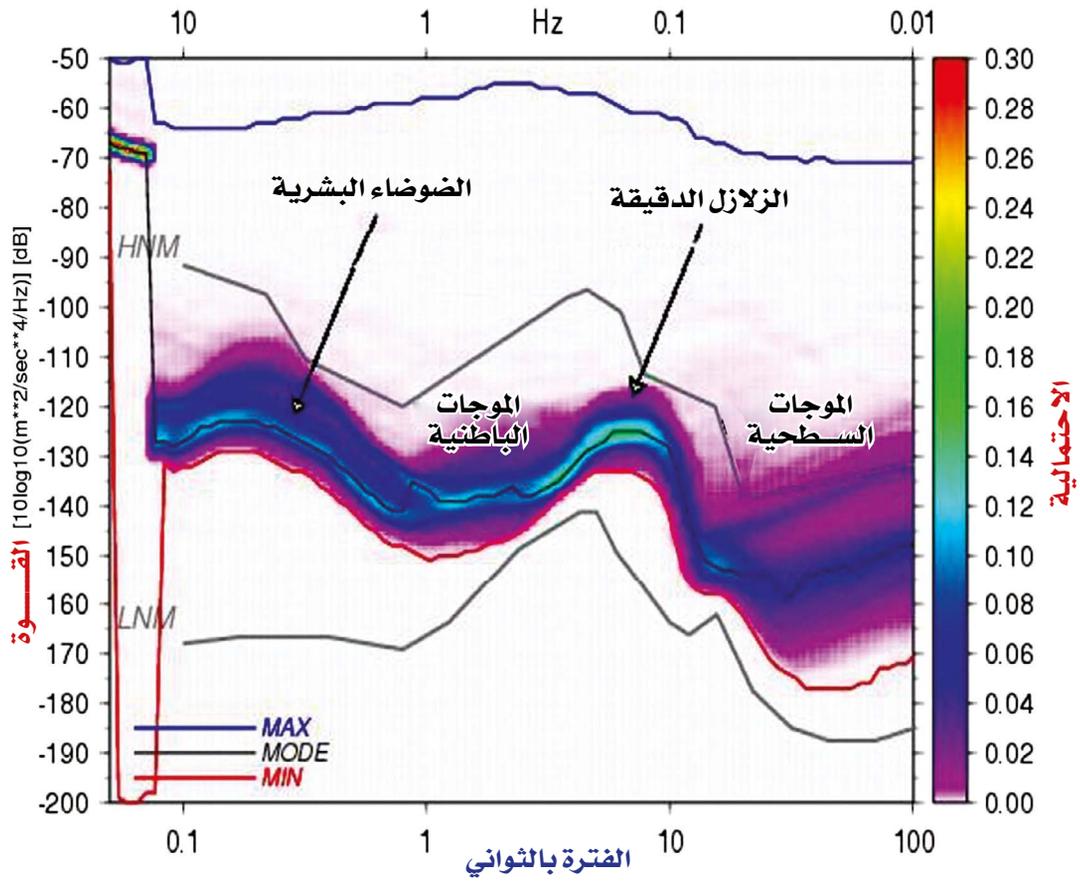
يعتبر نظام **تحليل الضوضاء الزلزالية** في الوقت الحقيقي **لمراقبة** جودة البيانات وأداء **المحطة** هذا **فريداً** من حيث أنه لا توجد حاجة لفحص البيانات بحثاً عن **الزلازل** أو مواطن **الخلل** في النظام أو البيانات **الفنية** العامة، كما هو شائع في تحليل الضوضاء **الزلزالية**. بدلاً من ذلك، باستخدام **نظام** التحليل



هذا، يتم **تعيين** الموجات القادمة إلى احتمالية خلفية منخفضة المستوى بينما **تكشف** ظروف الضوضاء المحيطة عن نفسها على أنها احتمالية عالية. في الواقع، يتيح لنا **فحص** المصنوعات اليدوية المتعلقة **بتشغيل** المحطة والضوضاء الثقافية العرضية **تقدير** كل من جودة المحطة الإجمالية والمستوى الأساسي لضوضاء **الأرض** في كل موقع. تشمل **مزايا** هذا النهج الجديد ما يلي:

1. يقدم رؤية تحليلية تمثل المستويات الحقيقية للضوضاء المحيطة بدلاً من الحد الأدنى البسيط المطلق.
2. يوفر تقييماً للصحة العامة للجهاز / المحطة.
3. يقدم تقييماً لصحة أنظمة التسجيل والقياس عن بُعد.

تولد الضوضاء الثقافية الناتجة عن حركة مرور السيارات والآلات والأنشطة البشرية الأخرى إشارة **قوية** يمكن أن تختلف بمقدار **10 ديسيبل** بين النهار والليل ويمكن ملاحظتها **بترددات** عالية (**1-10 هرتز، 0.1-1 ثانية**). تحدث موجات الجسم من **الزلازل** كإشارة احتمالية منخفضة في نطاق **1 ثانية** بينما تكون الموجات السطحية عموماً أعلى **قوة** في فترات أطول. الإشارة الواسعة التي تزيد على **10 ثوانٍ** ترجع إلى عدم **الاستقرار** الحراري لتصميم الخزانة المحمولة.

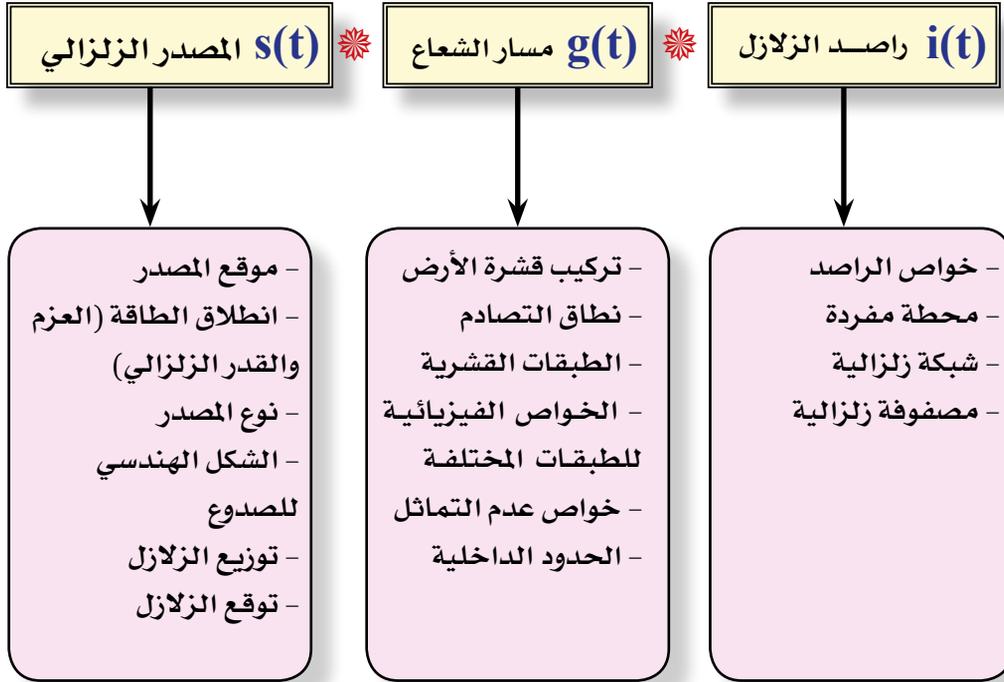


نظام تحليل الضوضاء الزلزالية في الوقت الحقيقي لمراقبة جودة البيانات وأداء المحطة



السجل الزلزالي $u(t)$

$$u(t) = s(t) * g(t) * i(t)$$



العوامل المختلفة (بدون ضوضاء زلزالية) التي تؤثر على السجل الزلزالي (المربعات الصفراء) والمعلومات التي يمكن اشتقاقها من تحليل التسجيل (المربعات الزرقاء)



آلية تحديد موقع الزلزال

أجهزة قياس الزلازل Seismographs هي أدوات تستخدم لقياس **الموجات** الزلزالية. تقيس **اهتزاز** الأرض باستخدام **البندول** أو **الزنبرك**. يتضمن مبدأ قياس الزلازل تركيب جهاز تسجيل بقوة على الأرض وتعليق قلم أو أداة كتابة فوقه على زنبرك أو بندول. عندما تهتز الأرض، يسجل القلم المعلق الاهتزاز على جهاز التسجيل. الرسم البياني الناتج عن قياسات جهاز قياس الزلازل هو مخطط للزلازل أو يطلق عليه السجل الزلزالي Seismogram. كانت أجهزة قياس الزلازل في أوائل القرن العشرين عبارة عن نوابض أو بندولات عليها أقلام كتبت على أسطوانة دوارة من الورق. وحالياً تستخدم الأجهزة الرقمية المغناطيسات وملفات الأسلاك لقياس حركة الأرض. تقيس مصفوفات قياس الزلازل النموذجية الاهتزازات في ثلاثة اتجاهات: الشمال والجنوب (X)، والشرق والغرب (Y)، ومن أعلى إلى أسفل (Z).

تولد الزلازل أنواعاً مختلفة من **الموجات الزلزالية** وتنتقل هذه الموجات بسرعات **مختلفة** عبر الأرض. الموجات P هي الأسرع وهي أول إشارة تصل إلى مخطط الزلازل، تليها الموجة S الأبطأ، وأخيراً الموجات السطحية، التي لها أكبر سعة على مخطط الزلازل ولكنها تفقد الطاقة بسرعة، وبالتالي لا يتم قياسها على مسافات بعيدة من بؤرة الزلزال. يتم استخدام أوقات وصول الموجات P و S بمقاييس الزلازل المختلفة لتحديد موقع الزلزال. بافتراض أننا نعرف السرعة النسبية للموجات P و S، فإن الفارق الزمني بين وصول الموجات P و S يحدد المسافة التي يبعدها **الزلزال** عن جهاز الرصد.



الموجات السطحية

موجة اولية

موجة قصيرة



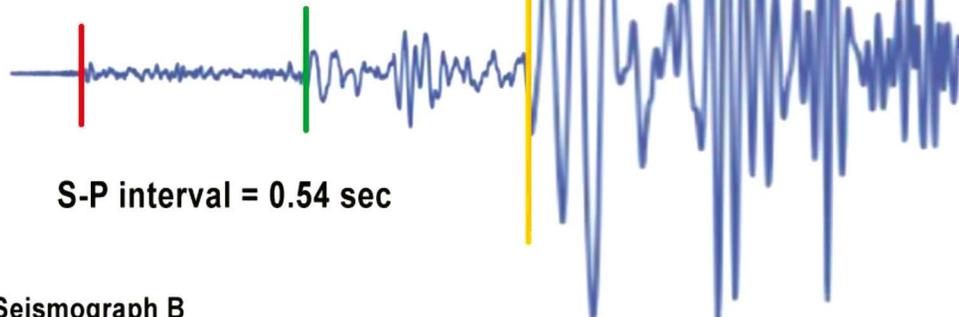
Seismograph A



الموجات السطحية

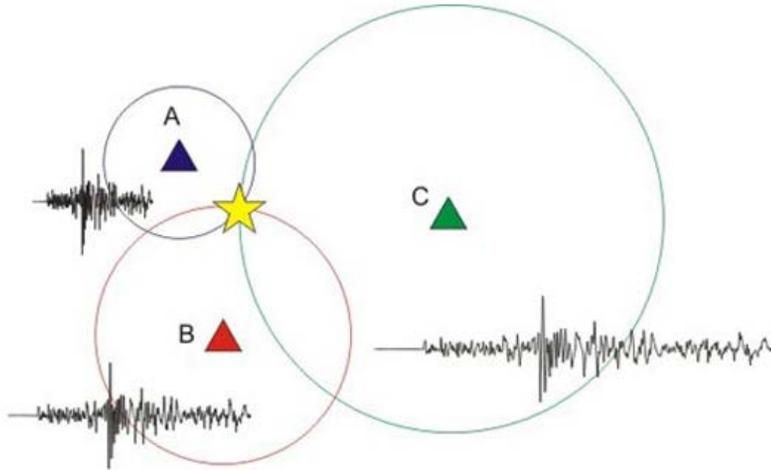
موجة اولية

موجة قصيرة



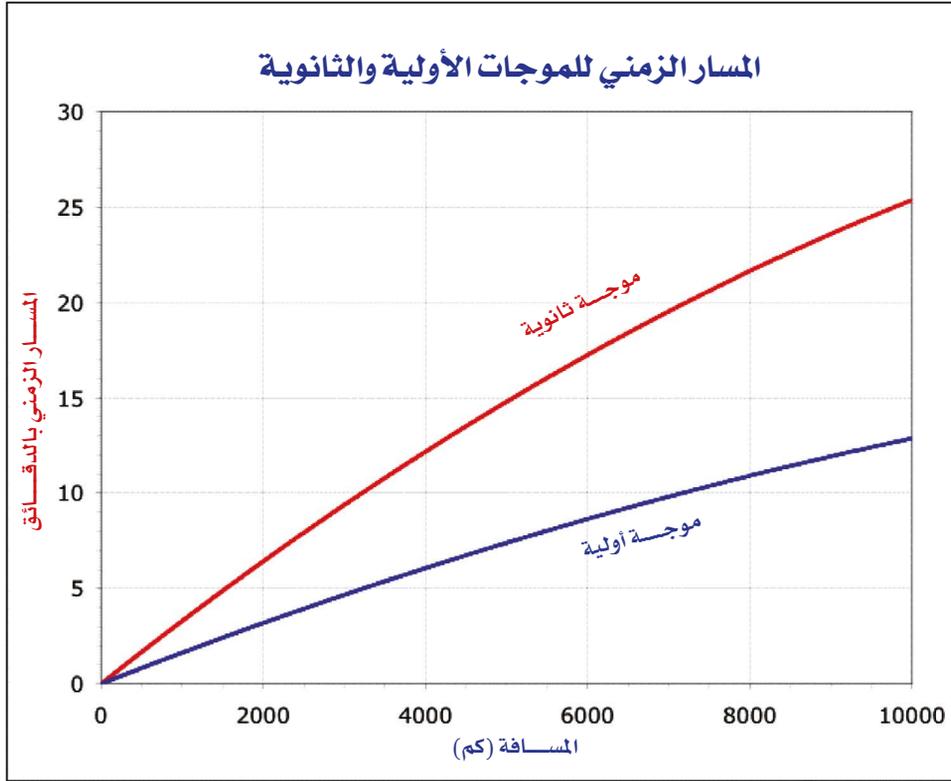
Seismograph B





تصور A و B و C ثلاث محطات رصد مختلفة لقياس الزلازل في مواقع بعيدة. يمكننا تحديد موقع الزلزال من خلال النظر إلى السجلات الزلزالية من محطات تسجيل مختلفة، حيث تصل الإشارات أولاً إلى أقرب محطة وأخيراً تصل إلى الأبعد. يخبرنا الفارق الزمني بين الموجتين P و S بمسافة الزلزال عن مقياس الزلازل. إذا قمنا بحساب الوقت S ناقص P لتحديد المسافة من مقياس الزلازل في ثلاث محطات، فيمكننا معرفة مكان مركز الزلزال السطحي.

التثليث Triangulation ارسم دائرة حول كل محطة بنصف قطر يساوي المسافة التي تفصلها عن الزلزال. يقع الزلزال في النقطة التي تتقاطع فيها الدوائر الثلاث. الاتصال الإلكتروني بين المحطات الزلزالية وأجهزة الكمبيوتر المتصلة تستخدم لإجراء الحسابات أن مواقع الزلازل والتقارير الإخبارية عنها يتم إنشاؤها بسرعة في العالم الحديث.



وحسابياً يمكن إجراء **تقريب** جيد جداً لمركز **الزلازل** بطريقة القوس أو طريقة الدائرة **بثلاث مرات** أو أكثر من S-P. يوضح الشكل 11 أ الشكل الهندسي البسيط للمسافة المركزية X والمسافة من بؤرة الزلازل الى محطة الرصد D والعمق البؤري (H) للزلازل. إذا كان T_p هو وقت وصول الموجة P و T_s هو وقت وصول الموجة S، فيمكننا كتابة:

$$V_s / D = T_s \quad \text{و} \quad V_p / D = T_p$$

حيث V_p تمثل **سرعة** الموجات الطولية و V_s تمثل **سرعة** موجات القص

$$T_s - T_p = D (1/V_s - 1/V_p)$$





وإذا افترضنا أن $V_p/V_s = 1.73$

فإن المسافة من بؤرة الزلزال إلى محطة الرصد يمكن تقديرها من D

$$D = 8 (T_s - T_p)$$

حيث D بالكيلومتر و S - P بالثواني.

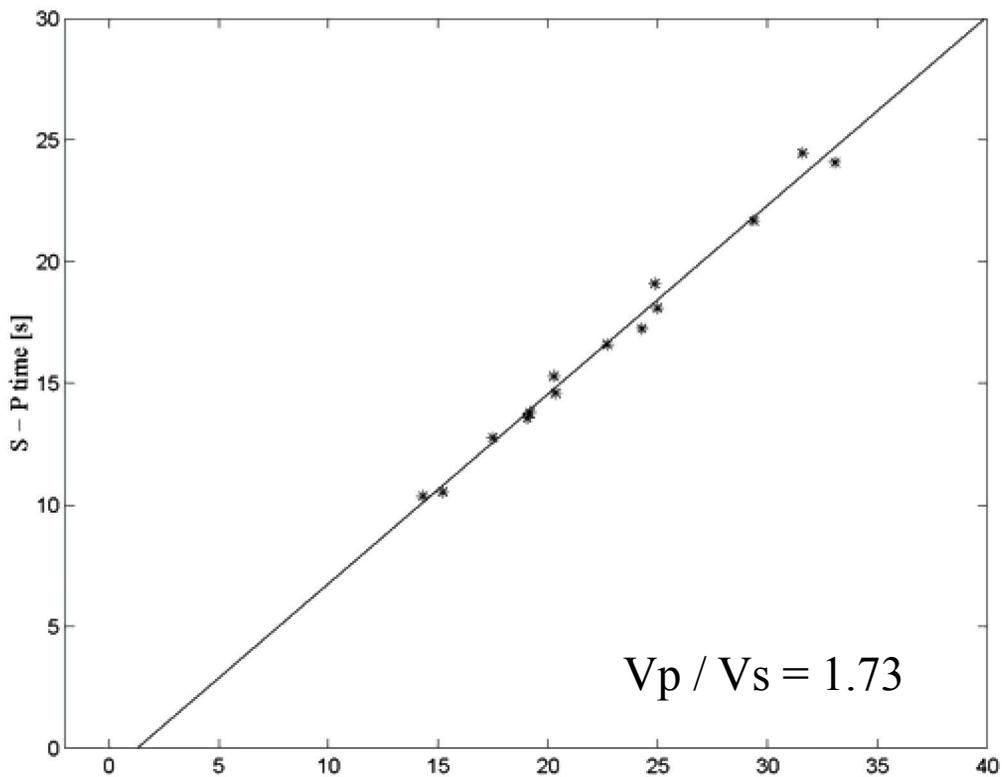
بعد تحديد D في ثلاث محطات أو أكثر، يمكن رسم الأقواس بحيث يكون كل قوس متمركزاً على المحطة المعنية و D يساوي طول القوس. كما هو مبين في الشكل 11 ب، يقع مركز الزلزال في المنطقة التي تتداخل فيها الأقواس. تستخدم هذه الطريقة بشكل شائع كوسيلة سريعة لتحديد موقع الزلازل. يمكن الحصول على العمق البؤري (H) على شكل

$$H = (D^2 - X^2)^{1/2}$$

ستؤدي إضافة المزيد من الملاحظات إلى توفير تقاطعات إضافية التي من الناحية النظرية يجب أن تمر عبر مركز الزلزال. من الناحية العملية، يوجد خطأ دائماً، سواء في البيانات أو في الافتراضات، أن ممرات الشعاع مستقيمة والأرض متجانسة؛ عادة ما يحدث مبعثر في التقاطع.



مخطط وداتي يوضح وقت المنشأ (V_p / V_s و 1.2 دقيقة و 20 ساعة و 13) و



زمن وصول الموجة الأولية P (ثانية)

منحنى Wadati وقت المنشأ (13h 20m 1.2 s) Origin time





يمكن تحديد وقت نشوء الزلزال Origin Time باستخدام تقنية رسومية بسيطة للغاية، تسمى رسم بياني وداتي (وداتي، 1933). يتم رسم الفاصل الزمني (ts-tp) للمرحلتين P و S مقابل وقت وصول الموجة P. نظراً لأن $ts-tp = 0$ عند البؤرة تحت المركز، فإن الخط المستقيم الملائم على مخطط Wadati يعطي وقت الأصل عند التقاطع مع محور وقت الوصول P.

عموماً يعطي منحنى وداتي الوقت الأصلي للزلزال (حيث $S-P \text{ time} = 0$) وكذلك تحدد V_p / V_s (بافتراض أنها ثابتة وأن مرحلتي P و S من نفس النوع - على سبيل المثال Pn و Sn أو Pg و Sg) ويشير إلى اختيار الأخطاء.



مقاييس الزلازل

تحدث **معظم** أضرار **الزلازل** عن طريق **اهتزاز** الأرض. يعد حجم أو حجم (إطلاق الطاقة) الزلازل، والمسافة إلى بؤرة الزلازل أو مصدره، والعمق البؤري، ونوع الصدع، ونوع المادة عوامل مهمة في تحديد مقدار اهتزاز الأرض الذي قد ينتج في موقع معين. عندما يكون هناك تاريخ طويل لنشاط الزلازل، يمكن تقدير هذه المعلومات في كثير من الأحيان. بشكل عام، تنتج الزلازل الكبيرة حركات أرضية ذات اتساع كبير وفترات طويلة. تنتج الزلازل الكبيرة أيضاً اهتزازاً قوياً على مناطق أكبر بكثير من الزلازل الصغيرة. بالإضافة إلى ذلك، يتناقص اتساع حركة الأرض مع زيادة المسافة من بؤرة الزلازل. يتغير محتوى التردد للاهتزاز أيضاً مع المسافة. بالقرب من مركز الزلازل، توجد حركات عالية (سريعة) ومنخفضة (بطيئة). بعيداً، تسود حركات التردد المنخفض، وهي نتيجة طبيعية لتوهين الموجة في الصخور. يعد تكرار حركة الأرض عاملاً مهماً في تحديد شدة الضرر الذي يلحق بالهياكل وأنها يتأثر.

عموماً يتم رصد **الزلازل** وتسجيلها بواسطة شبكة من محطات الرصد، وتؤدي الحركة الأرضية إلى إطلاق كميات كبيرة من الطاقة تسبب اهتزازاً في الطبقات الصخرية المجاورة لمركز حدوث الزلازل، إذ تنتقل هذه الاهتزازات على شكل موجات، وبالتالي يتم رصد الزلازل بواسطة هذه الموجات. يقيس القدر والشدة الزلزالية الخصائص المختلفة للزلازل. الأول يقيس الطاقة المنبعثة من مصدر الزلازل. والأخير يقيس قوة الاهتزاز الناتج عن الزلازل في مكان معين. يتم تحديد قدر (حجم) الزلازل من القياسات على أجهزة قياس الزلازل، في





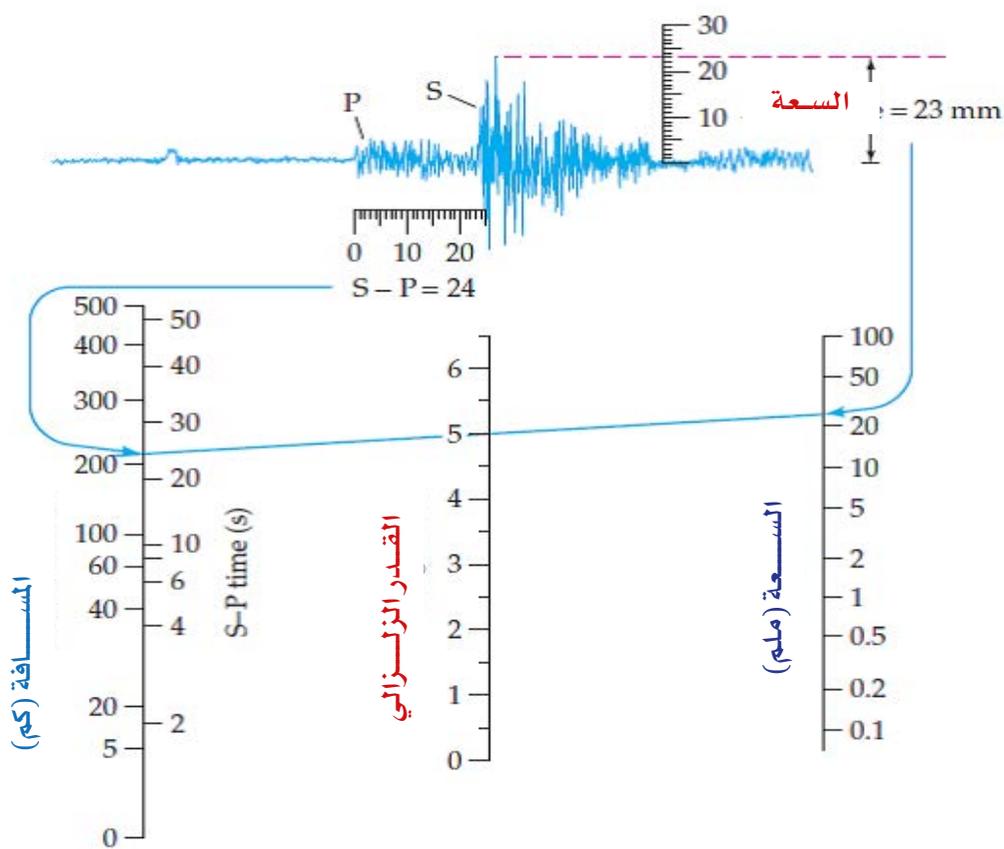
حين يتم تحديد شدته من التأثيرات على الأشخاص والهيكل البشرية والبيئة الطبيعية. وفيما يلي نلقي الضوء على أوجه الاختلاف والتشابه بين المقياسين.

1. القدر (الحجم) الزلزالي Earthquake Magnitude

لكي تتمكن من المقارنة بين الزلازل في كافة أنحاء العالم لا بُدَّ من إيجاد مقياس لا يعتمد على كثافة السكان أو نوع المنشآت، ولكن مقياس كمي ينطبق على الزلازل في أي مكان. وكان أول مقياس للقدر الزلزالي على المستوى العالمي هو الذي استخدمه العالم الياباني واداتي Wadati في عام 1931م، ثم قام العالم ريختر Richter بتطويره في ولاية كاليفورنيا عام 1936م اعتماداً على قياس اتساع موجة الزلزال طبقاً لقياسها بآلة التسجيل المعروفة بالسيزموجراف. ونظراً للاختلاف الكبير في اتساع موجة الزلزال فقد استخدم ريختر المقياس اللوغاريتمي للموجة، وعرف المقدار الزلزالي بأنه عبارة عن رقم لوغاريتمي عشري اشتق من معرفة سعة أكبر حركة أرضية أمكن تتبعها بواسطة جهاز الرصد على بُعد 100 كم من مركز الزلزال، ولكن من النادر أن تكون جميع المحطات موزعة على بُعد 100 كم من المركز، فإن السعة يجب أن تصحح فيما لو كان عند تلك المسافة. تسجل الزلازل الكبيرة بشكل عادي على مقياس ريختر ولكن العلماء حالياً يفضلون وصف الزلازل ذات القدر الزلزالي أكبر من 6 درجات باستعمال مقياس العزم الزلزالي Moment Magnitude (Mw) لدقته العالية.



الزلازل والتفجيرات



رسم بياني يربط المسافة بالسعة لاستنباط قدر (حجم) الزلزال على مقياس ريختر





ويمكن تقسيم القدر الزلزالي حسب نوعية الموجة والسعة والعمق (2) إلى:

• المقدار الزلزالي للموجات السطحية Surface Waves Magnitude (M_s)

$$M_s = \text{Log} (A/T)_{\max} + 1.66 \text{ Log} (\Delta) + 3.3$$

$A/T)_{\max}$ = النسبة بين السعة العظمى وفترة التذبذب Period إلى المركبة الأفقية لموجات رايلي (Rayleigh Wave).

T = فترة التذبذب وتتنحصر بين (18-22) ثانية.

Δ = المسافة بالدرجات وتتنحصر بين ($20^\circ - 160^\circ$).

تستخدم هذه العلاقة للمقارنة بين الهزات ذات الترددات المنخفضة والأعماق الضحلة التي أقل من 50 كم.

• المقدار الزلزالي للموجات الجسمية Body Waves Magnitude (m_b)

وهذا المقدار ابتكره العالم Gutenberg عام 1956م للزلازل العميقة ويعتمد على السعة الموجية للموجة الجسمية ويعبر عنه بالمعادلة التالية :

$$m_b = \text{Log}(A/T)_{\max} + Q(\Delta, h)$$

$Q(\Delta, h) =$ معامل تجريبي.

Δ = المسافة البؤرية وتتنحصر بين ($5^\circ - 100^\circ$) درجة.

T = فترة التذبذب ومدaha هو (0.1 - 3) ثانية.

ويمكن تطبيق هذه العلاقة للهزات ذات التردد العالي.





• المقدار الزلزالي المحلي (Local Magnitude (ML)

استنتج من قبل ريختر لتصنيف الهزات في جنوب كاليفورنيا على أساس الحجم بطريقة تختلف عن تأثيرها على الناس والمنشآت، وعبر عن المقدار الزلزالي المحلي (ML) بالمعادلة التالية:

$$ML = \text{Log}(A) - \text{Log}(A_0)$$

A = السعة المسجلة للهزة الأرضية.

A_0 = السعة لهزة معينة اختيرت كهزة قياسية، تدعى الهزة القياسية بالهزة الصفرية (Zero Shock) وذلك لأنه إذا كانت ($A=A_0$) فإن $M=0$ ، وهذا لا يعني عدم وجود هزات أرضية صغيرة وإنما قد تحصل على قيم سالبة لـ (A) وذلك عندما تسجل هزات أرضية صغيرة تمتلك سعات أصغر من سعة الهزة الصفرية.

• المقدار الزلزالي المعتمد على فترة التردد (Duration Magnitude MD)

إن المقدار الزلزالي المحلي المعين من جهاز التسجيل ذو فترة قصيرة التردد (Short Period) ومركبة عمودية يعتمد خطياً على اللوغاريتم الاعتيادي وفترة التردد والمسافة للمركز السطحي. لقد ابتكر العالم Lee هذا المقدار وطبقه على الزلازل الصغيرة حسب المعادلة:

$$MD = -0.87 + 2.0 \text{ Log } D + 0.0035 \Delta$$





MD = المقدار الزلزالي المعتمد على فترة التردد .

D = فترة التردد .

Δ = بعد المركز السطحي للزلازل بالكيلومترات .

وهناك معادلات رياضية أساسية تربط بين المقادير الزلزالية السطحية (Ms) والجسمية (mb) والمحلية (ML) و (MD):

$$mb = 0.56 Ms + 2.9$$

$$Ms = 1.79 mb - 5.18$$

$$mb = 1.7 + 0.8 ML - 0.01 ML^2$$

$$ML = 0.0357 + 0.98 MD$$

• مقدار العزم الزلزالي (Mw) Moment Magnitude

وهذا النوع ينطبق على الزلازل القوية التي يبلغ قدرها في الغالب أكثر من 6. وقام Kanamori عام 1983م بتطوير مقدار ينطبق على الزلازل الضحلة والعميقة:

$$Mw = 2/3 \text{ Log } Mo - 10.7$$

Mo: العزم الزلزالي. فالأحداث الزلزالية التي قدرها أقل من 8 تنطبق الـ Ms مع الـ Mw في حساب المقدار.





العزم الزلزالي Seismic Moment

يعرف العزم الزلزالي بأنه مقياس لحجم الزلازل وهو عبارة عن صلابة الصخرة مضروبة بمساحة التصدع مضروبة بمقدار الانزلاق. أو بمعنى آخر هو قياس قوة الزلازل الناتجة عن إزاحة الصدع. ومن المعروف أن مقاييس المقادير الزلزالية تعتمد على معرفة سعة الموجة السطحية، وفترة التذبذب لها، ولما كانت الزلازل ذات البؤر العميقة تكون لها موجات سطحية صغيرة فقط أو على شكل سلسلة من الموجات السطحية غير المهمة لذلك فمن المفضل عند التعامل مع كل الزلازل الأرضية أن نكون قادرين على حساب مقدار زلزالي منتظم لا يعتمد على وجود أو غياب الموجات السطحية، وقد يمكن تجنب هذه المشكلة باستخدام قياس جديد لقوة الزلازل يُدعى العزم الزلزالي. يمكن تمثيل العزم الزلزالي من خلال **نظرية الإزاحة** Dislocation Theory كمكافئ للمصادر المزدوجة ومن ذلك جاء تعريف **العزم الزلزالي** كتعبير عن **الإزاحة** على الصدع ومنطقة المصدر. ويمكن التعبير عن العزم الزلزالي (M_0) **بالمعادلة** الآتية:

$$M_0 = U D S$$

U = ثابت **المرونة** (معامل القص).

D = معدل **الإزاحة** (Dislocation) على مستوى الصدع.

S = مساحة مستوى **الصدع**.

كما أن هناك **علاقات** تربط بين **العزم** الزلزالي والمقادير الزلزالية السطحية والمحلية

$$\text{Log } M_0 = 20.15 + 1.12 \text{ ML}$$

$$\text{Log } M_0 = 10.92 + 1.11 \text{ Ms}$$





الطاقة الزلزالية Seismic Energy

من المعروف أن **الهزات** الأرضية تتكون نتيجة **لتحرر** المفاجئ لطاقة الانفعال Strain Energy المخزونة مسبقاً في **الصخور** ومن قياس طاقة الموجة **الزلزالية** الناجمة عن **الكسر** المفاجئ يمكن تخمين الطاقة المتحررة من الهزات الأرضية، وهناك **العديد** من العلاقات التي تربط بين طاقة الموجة **الزلزالية** (E) والمقدار **الزلزالي** (M)

$$\text{Log (E)} = 11.8 + 1.5 M$$

$$\text{Log (E)} = 12.66 + 1.4 M$$

وقد بين بعض **الباحثين** صلاحية هذه المعادلة لحساب الطاقة **الزلزالية** للهزات الدقيقة.

وهناك **علاقات** تجريبية أخرى مقدمة من **العالم باث** (Bath) عام 1973م للربط بين الطاقة **الزلزالية** (E) والمقدار **الزلزالي** السطحي (Ms) **للزلازل** التي قدرها أكبر من 5 والموجات الجسمية (mb) كالاتي:

$$\text{Log (E)} = 5.24 + 1.44 Ms$$

$$\text{Log (E)} = 4.78 + 2.57 mb$$

وترتبط الطاقة الزلزالية (E) بالمقدار **الزلزالي** السطحي (Ms) والمقدار **الزلزالي** الجسمي (mb)، والشدة **الزلزالية** القصوى (Io) على النحو التالي:





Io	Mb	Ms	الطاقة E (إرج)
7 - 6	5.9	5.4	10^{20}
8 - 7	6.3	6.1	10^{21}
9 - 8	6.7	6.8	10^{22}
10 - 9	7.1	7.5	10^{23}
11 - 10	7.5	8.2	10^{24}
12	7.8	8.9	10^{25}

هناك **علاقة** تجريبية تربط بين المقدار **الزلزالي** (M) والإزاحات السطحية الناتجة عن الصدوع والتشوهات في **القشرة** الأرضية. فمثلاً هناك علاقة تربط المقدار **الزلزالي** وطول الصدع (L) **بالكيلومترات**:

$$M_s = 6.10 + 0.70 \text{ Log } L$$

كما أن هناك **علاقة** تجريبية تربط بين إزاحة **الصدع** (U) (Fault Offset) والمقدار **الزلزالي** (M)

$$\text{Log } (U) = 0.55 M - 3.71$$

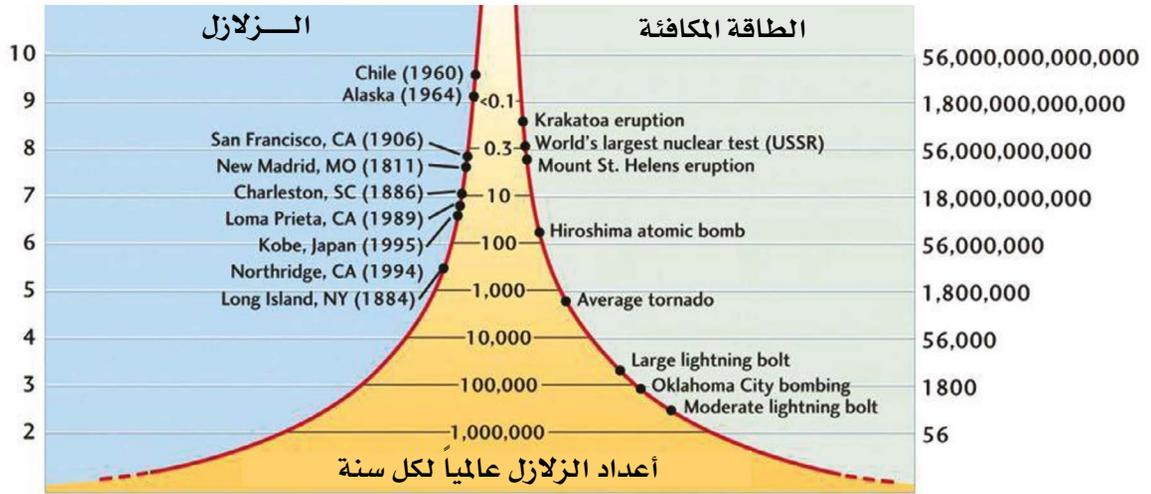
$$\text{Log } (U) = 0.67 M - 4.33$$





القدر الزلزالي

الطاقة المنطلقة
(المكافئة للانفجار ب كجم)



العلاقة الطردية بين القدر الزلزالي وكمية الطاقة الزلزالية



2. الشدة الزلزالية Earthquake Intensity

لقد قامت عدة محاولات لقياس شدة **الزلازل** اعتماداً على حجم التأثيرات ونوعيتها ومقدار **الدمار**، ومن تلك المحاولات ما قام به **عالم** البراكين الإيطالي **ميركالي Mercalli** عام 1887م من وضعه مقياساً وصفيّاً من **ثمانى درجات** تكون الشدة مختلفة حسب القُرب والبُعد عن البؤرة، فالمناطق الواقعة فوق بؤرة الزلازل تكون الشدة فيها أعلى من المناطق البعيدة عن البؤرة، لقد قام ميركالي برسم خطوط كنتورية تمثل الشدة الزلزالية لكل منطقة، وتربط المناطق التي حصل لها نفس التشويه، وطور هذا المقياس إلى 12 درجة في عام 1931م، وتدل الشدة الزلزالية على التأثير المحلي أو مدى إصابة الناس بالزلازل، وكل هذه التأثيرات تختلف باختلاف المسافة.

إن للشدة **الزلزالية** أهمية كبيرة حيث يمكن أن تستخدم في **رسم** خرائط تساوي الشدة Isoseismal Maps **وتزودنا** مثل هذه الخرائط بمعلومات عن أقصى شدة للهزة المحتملة وعن طبيعة الاهتزازات الأرضية وتأثير الطبقات الصخرية للجيولوجية التحتية والترية السطحية على شدة الهزة. استخدمت الشدة الزلزالية أيضاً في دراسة المخاطر الزلزالية حيث تستخدم الشدة العظمى عند المركز السطحي أو تستخدم الشدة في أية نقطة لبناء خرائط تقسيم زلزالي Seismic Zoning يمكن أن نتوقع منها أقصى شدة للهزة المحتملة الوقوع.

وهناك ارتباطاً نسبياً بين القدر الزلزالي (M) والشدة الزلزالية (I)، فكلما زادت الشدة في منطقة ما فإن هذا يعني أن القدر الزلزالي مرتفع. ويرتبط الحد الأعلى للشدة الزلزالية بالقدر الزلزالي على النحو المبين بالجدول التالي وحسب **المعادلة التقريبية**:

$$I = 8.16 + 1.45 M - 2.46 \log_{10} D$$





حيث D تمثل المسافة البؤرية

لا يوجد في مقياس ريختر حد أعلى أو حد أدنى، ولو أن أقصى درجة سجلها المقياس كانت 8.9، وأن تزايد درجة واحدة في القدر يعني تضاعف في حركة الأرض عشر مرات وانطلاق طاقة أكبر بـ 30 مرة، وهكذا فإن زلزالاً قدره 6 سيطلق طاقة أكبر بـ 30 مرة من زلزال قدره 5 وأكبر بـ 900 مرة من زلزال قدره 4.

كذلك ترتبط الشدة الزلزالية بمعامل التوهين والطاقة الزلزالي والمسافة من مصدر الزلزال من خلال العلاقات التالية:

$$I(R) = I_0 + a + bR + C \log_{10} R$$

R نصف قطر الدائرة من مركز الزلزال

I(R) الشدة الزلزالية من المسافة R

a, b, c ثوابت

$$I(R) = I_0 + 6.453 - 0.00121 R - 2.15 \ln(R+20)$$

$$I_0 = 0.95 M_s + 1.99$$

مع إهمال R 0.00121

$$I = 8.443 + 0.95 M_s - 2.15 \ln(R+20)$$

M_s القدر الزلزالي المبني على الموجات السطحية

$$\text{Log(PGA)} = 0.57 + 0.5 m_b - 0.83 \log(R^2 + h_m^2)^{1/2} - 0.00069R$$





ذروة التسارع الأرضي (PGA)

R: المسافة من بؤرة الزلزال

h_m : أدنى عمق بؤري

$$h_m = -1.73 + 0.456 mb \quad mb > 4.5$$

$$\text{Log (PGV)}_h = -3.6 + 1.0 mb - 0.83 \text{Log}(R^2 + h_m^2)^{1/2} - 0.00033R$$

ذروة السرعة الأرضية (PGV)

العلاقة الطردية بين الحجم والشدة الزلزالية

التأثير	القدر الزلزالي Magnitude	الحد الأعلى للشدة الزلزالية Intensity
الحركة تسجل والأشياء المعلقة تهتز.	3	3 - 2
يشعر بها من في الداخل - الأضرار محلية.	4	5 - 4
يشعر بها الجميع - بعض الأضرار في المباني.	5	7 - 6
أضرار في المناطق الأهلة بالسكان والمباني العادية تتحطم.	6	8 - 7
تحطم المباني - تشققات كبيرة - إنحناء السكك الحديدية.	7	10 - 9
دمار كامل - تحطم الجسور.	8	12 - 11



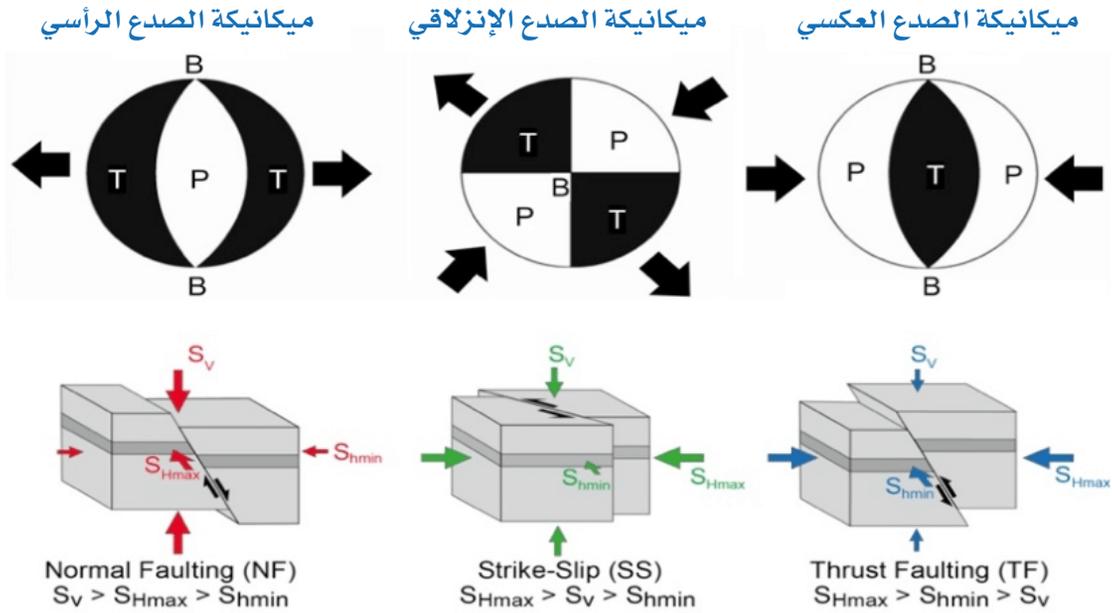
أوجه الشبه والاختلاف بين حجم الزلزال وشدته

الشدّة الزلزالية Intensity	القدر (الحجم) الزلزالي Magnitude
مقياس نوعي للاهتزاز الفعلي في موقع ما أثناء الزلزال.	مقياس كمي للحجم الفعلي للزلزال.
يتم تعيين الشدة كأرقام رومانية كبيرة.	تستخدم الأرقام الطبيعية لتحديد حجم الزلزال.
هناك العديد من مقاييس الشدة. اثنان منها شائع الاستخدام هما مقياس كثافة Mercalli المعدل (MMI) و مقياس MSK . كلا المقياسين متشابهان تماماً ويتراوحان من الأول I (الأقل إدراكياً) إلى الثاني عشر XII (الأكثر حدة).	يستخدم مقياس ريختر (يسمى مقياس الحجم المحلي) لقياس الحجم. هناك مقاييس حجم أخرى، مثل: مقدار العزم، وحجم موجة الجسم، و حجم الموجة السطحية، و حجم طاقة الموجة. هذه المقاييس العددية الحجم ليس لها حدودٍ عليا وسفلى؛ يمكن أن يكون حجم زلزال صغير جداً صفراً أو حتى سالباً.
تعتمد مقاييس الشدة على ثلاث سمات للاهتزاز - الإدراك من قبل الناس والحيوانات، وأداء المباني، والتغيرات في البيئة المحيطة الطبيعية.	يتم الحصول على المقياس من مخططات الزلازل ويحسب اعتماد سعة شكل الموجة على المسافة المركزية.
عند حدوث زلزال ، تكون شدته متغيرة على المنطقة المتأثرة بالزلازل ، مع شدة عالية بالقرب من مركز الزلزال وقيم أقل بعيداً. يتم تخصيص قيمة بناءً على تأثيرات الاهتزاز.	عندما يحدث زلزال ، يمكن إعطاء حجمه قيمة عددية واحدة على مقياس ريختر .
تم تصميم الهياكل لتحمل مستويات معينة من شدة الاهتزاز، و ليس الحجم الكبير. ذروة تسارع الأرض (PGA) هي إحدى طرق قياس شدة اهتزاز الأرض المستخدمة في مقاومة الزلازل للهياكل.	الحجم ليس هو أساس تصميم الهياكل لأن نفس الحجم سيكون له شدة مختلفة في مواقع مختلفة.
لا يوجد علاقة عددية ولكنها طردية.	تشير الزيادة في الحجم (M) بمقدار 1.0 إلى سعة شكل موجة أعلى بمقدار 10 مرات وإطلاق طاقة أعلى بحوالي 31 مرة.
يتم تحديد قيمة الشدة من التأثيرات الملحوظة للاهتزاز على الأشخاص، وعلى الهياكل التي يصنعها الإنسان ومحتوياتها، وعلى المنظر الطبيعية.	تستخدم أجهزة قياس الزلازل لتسجيل مقدار الزلازل .



حلول مستوى الصدع Fault-Plane Solutions

تصف الحلول البؤرية للزلازل التشوه في منطقة المصدر التي تولد الموجات الزلزالية. في حالة وقوع حدث متعلق بالصدع، فإنه يشير إلى اتجاه مستوى الصدع الذي انزلق وناقل الانزلاق، ويُعرف أيضاً باسم **حلول مستوى الصدع**. يتم اشتقاق الآليات البؤرية من حل موتر اللحظة Moment Tensor للزلازل، الذي يتم تقديره من خلال تحليل أشكال الموجات الزلزالية المرصودة. يمكن اشتقاق الآلية البؤرية من مراقبة نمط «الحركات الأولى»، أي ما إذا كانت الموجات P القادمة **تتفكك** أم **تنخفض**. تم استخدام هذه الطريقة قبل تسجيل الأشكال الموجية وتحليلها رقمياً.

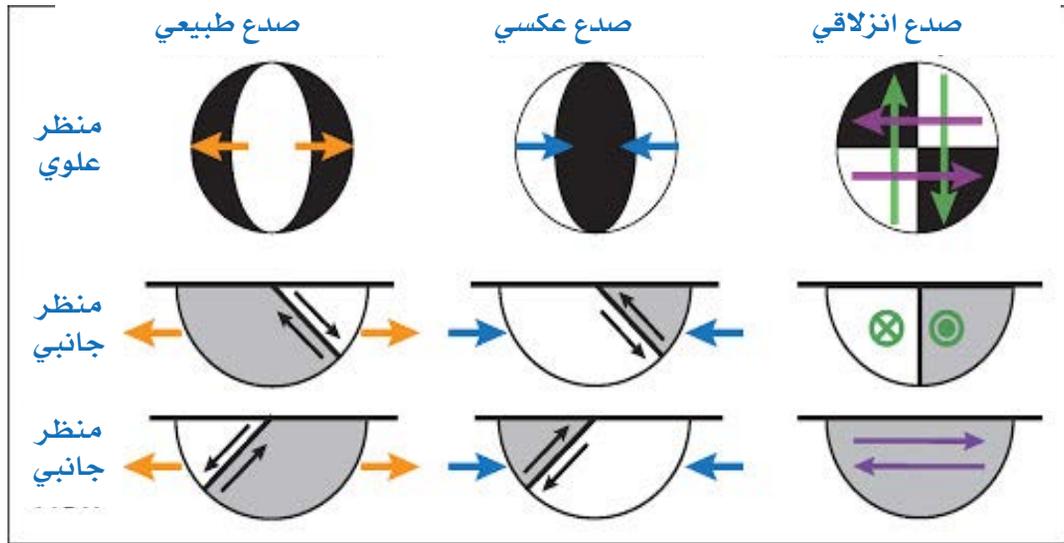


توجيه محاور الإجهاد الرئيسية (P، T و B) للآلية البؤرية ومحاور الإجهادات المقابلة (S_{Hmin} و S_v ، S_{Hmax})



يشير علماء **الزلازل** إلى اتجاه الانزلاق في الزلزال واتجاه **الصدع** الذي يحدث فيه باعتباره الآلية **البؤرية**. يستخدمون معلومات من مخططات الزلازل لحساب الآلية البؤرية وعرضها عادةً على الخرائط كرمز كرة الشاطئ. هذا الرمز هو الإسقاط على مستوى أفقي **للنصف السفلي من غلاف كروي** وهمي (كرة بؤرية) يحيط بمصدر الزلزال (أ). يتم رسم خط حيث يتقاطع مستوى الصدع مع الغلاف. يتحكم اتجاه مجال الإجهاد في وقت التمزق في اتجاه الانزلاق على مستوى الصدع، وتصور كرة الشاطئ أيضاً اتجاه الإجهاد هذا. في هذا المخطط، تحتوي الأرباع الرمادية على محور التوتر (T) الذي يعكس الحد الأدنى لاتجاه ضغط الضغط، وتحتوي الأرباع البيضاء على محور الضغط (P)، والذي يعكس **أقصى اتجاه للضغط الانضغاطي**.

تصف الآلية المحورية للزلزال التشوه في منطقة المصدر التي تولد الموجات الزلزالية. يشير إلى اتجاه مستوى الصدع الذي انزلق وناقل الانزلاق، ويعرف أيضاً باسم حل مستوى الصدع. يتم **اشتقاق الآليات البؤرية** من حل موتر اللحظة للزلزال، الذي يتم تقديره من خلال تحليل أشكال الموجات الزلزالية المرصودة. يمكن اشتقاق الآلية البؤرية من مراقبة نمط «الحركات الأولى»، أي ما إذا كانت الموجات P القادمة **تتنفك أم تنخفض**.



حول ميكانيكة البؤر الزلزالية لأنواع الصدوع



حلول موتر العزم Moment Tensor Solutions

عادةً ما يتم عرض حلول موتر العزم بيانياً باستخدام ما يسمى بمخطط كرة الشاطئ Beachball. يمكن نمذجة نمط الطاقة المشع أثناء الزلزال مع اتجاه واحد للحركة على مستوى صدع واحد كزوجين مزدوجين، الذي يوصف رياضياً كحالة خاصة من موتر من الدرجة الثانية (على غرار تلك الخاصة بالإجهاد والانفعال) المعروف موتر العزم.

الزلازل التي لا تسببها حركة الصدع لها أنماط مختلفة تماماً من إشعاع الطاقة. في حالة حدوث انفجار نووي تحت الأرض-على سبيل المثال- يكون موتر العزم الزلزالي متماثلاً ويسمح هذا الاختلاف بتمييز مثل هذه الانفجارات بسهولة عن استجاباتها الزلزالية. هذا جزء مهم للتمييز بين الزلازل والانفجارات.

هل يمكن التنبؤ بالزلازل؟

لقد عانت البشرية ولا تزال تعاني من كوارث الزلازل التي يذهب ضحيتها آلاف البشر بجانب الخسائر المادية الجسمية، ونتيجة لكون مسببات الزلازل والعمليات التي تحدث في البؤرة أثناء حدوث الزلازل ليست معروفة بشكل مطلق، لذا أصبحت عملية التنبؤ بالزلازل أمراً في غاية الصعوبة على الرغم من بعض المحاولات الناجحة في بعض الدول المتقدمة. يعتقد معظم الباحثين في مجال الزلازل أن التنبؤ بالزلازل هدف يمكن الوصول إليه، لذا بذلت كل الجهود الممكنة من أجل الوصول إلى هذا الهدف ولو أن البعض يرى أن نتائج التنبؤ ربما تكون ضارة وغير نافعة وخصوصاً عند فشل إحدى هذه التنبؤات، فإن الناس بالتأكيد ستتجاهل أي تحذيرات بقرّب وقوع كارثة بعد ذلك.





هناك **فرق كبير** بين التنبؤ وتوقع حدوث **الزلازل**. فالتنبؤ هو تحديد مكان وزمان حدوث الزلازل بدقة، ويكون في حدود عدة ساعات، وهذا غير متاح على المستوى العالمي. أما التوقع بالتخمين فهو مبني على دراسات تاريخية مستمرة للمنطقة **زلزالياً وجيولوجياً**.

إن **البركان** مهما كان أمره يمكن الفرار منه فهو ينذر الناس قبل ثورانه، أما الزلازل فإنها لا تنذر الناس قبل وقوعها ولا يمكن التنبؤ عما إذا كانت ستحدث بعد يوم أو شهر أو سنة، ولذلك فلا مفر منها، حيث إنها تضرب ضربتها فجأة **وبعد دقيقتين أو ثلاث دقائق** يكون كل شيء قد انتهى، لذا بلغ عدد من فقدوا حياتهم بسبب **الزلازل** أضعاف أولئك الذين فقدوا بسبب **ثوران** البراكين.

لقد نجح **العلماء السوفييات** في تحديد وقت **زلزال** نوفمبر 1978م في أدي فيرجاتا قبل حدوثه، وكذلك في فبراير 1975م **تنبأ** علماء الزلازل في **الصين** بحدوث الزلازل وأعطوا تحذيرات قبل حدوثه بحوالي 24 ساعة بناء على مراقبة حركة الحيوانات بصورة رئيسية، ودراسة ورصد كل المتغيرات في المنطقة. ولكن في العام الذي يليه وبالتحديد في 27 يوليو 1976م وأثناء عقد مؤتمر لعلماء الزلازل في الصين لمناقشة النجاح في توقع زلزال العام الماضي حدث زلزال عظيم مفاجئ **قتل** حوالي **250 ألف شخص**.

لم **تتمخض** الدراسات التي قام بها علماء الزلازل في اليابان وروسيا والصين وأمريكا عن أي قواعد ثابتة يمكن اتباعها للتنبؤ بقرّب حدوث الزلازل، وكان أقصى ما وصلوا إليه هو معدل تكرار الزلازل في مكان معين، وأوصوا بأن تكون المباني والمنشآت الهامة بعيدة عن أماكن الخطر الزلزالي حتى يمكن الإقلال من احتمالات تعرضها للانهييار إذا حدث زلزال في مكان وجودها.





إن أهمية **السجلات** التاريخية يمكن أن تساعدنا في **تحديد** الأماكن التي يتوقع حدوث **زلازل** فيها، ولكن لا يمكن أن **تحدد** وقت وقوعها، وقد أمكن **لليابان** رصد عدة تغيرات **جيوديسية** للأرض قبل عام 1964م، فقد **تغير** منسوب الأرض **حوالي 20 سم** حدث بعدها **زلزال** في **المنطقة** في 16 يونيو 1964م.

وعموماً فإن التوقع الكامل لحدوث **الزلازل** يتمثل في معرفة **ثلاثة** عناصر أساسية هي: مكان وزمان وقدر الزلزال. فبالنسبة لمكان الزلزال وقدره فقد توصل **العلماء** إلى **تحديد** أكثر الأماكن تعرضاً **للزلازل** على الكرة الأرضية، وقدر هذه **الزلازل** على وجه التقريب، حيث تتم **الاستفادة** من هذه المعلومات في اختيار أنسب الأماكن لإقامة المشروعات العمرانية والصناعية بعيداً عن أماكن **الخطر الزلزالي**.

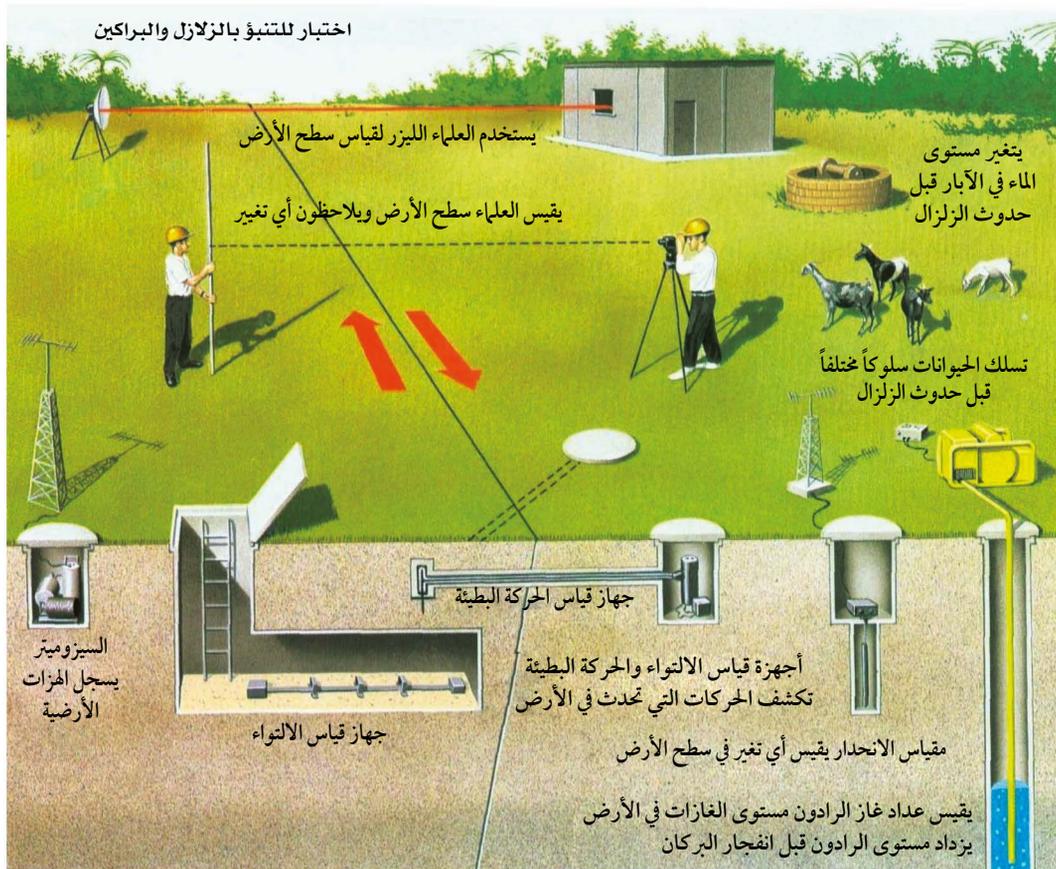
أما بالنسبة لزمن **الزلزال** وهو أهم العناصر، فعلى الرغم من وجود بعض **الظواهر** المختلفة التي قد **تدل** على **قرب** وقوع **الزلزال** في منطقة ما، إلا أنها ليست قاعدة **ثابتة** يعتمد عليها في تحديد وقت **حدوثه**، فقد **يحدث** بعد يوم أو شهر أو أكثر، وقد **لا يحدث** مع وجود هذه **الظواهر**. ومن أهم **الظواهر** التي قد يصاحبها حدوث **هزات** أرضية (**زلازل**) ما يلي:

- **التغيرات في سرعة الموجات الزلزالية.**
- **اختلال مستوى المياه الجوفية في الآبار قبل حدوث الزلازل.**
- **تشوهات في سطح الأرض في المناطق القريبة من البؤرة وتحرك القشرة الأرضية للأعلى وتغير قيم الجاذبية.**
- **انطلاق غاز الرادون Radon من الآبار على امتداد الصدوع وتغير تركيز غاز الهليوم.**
- **تغير في درجة التوصيل الكهربائي للصخور وتغير في المجال المغناطيسي الأرضي.**
- **ازدياد نشاط الهزات الأولية قبل حدوث الزلزال.**
- **السلوك الشاذ لبعض الحيوانات.**



مراحل توقع الزلزال البعيدة والقصيرة المدى

أن بعض الحيوانات ومن بينها **سمك القرش** حساسة جداً للمجال المغناطيسي للأرض مما يجعلها تشعر بالتغيير الذي يطرأ عليه عادة قبل وقوع الزلازل وكذلك أن لبعض الكائنات الحية حاسة سمع مذهلة تنفذ إلى باطن الأرض بحيث تستطيع التقاط الأصوات المنذرة بـقرب الهزات الأرضية وتمييزها قبل وقوع الهزات وبعض الحيوانات تتميز بوجود حاسة فوق العادة تعتمد عليها في معرفة أي تغيير في خصائص الصخور قبل حدوث الزلازل.



اختبار المؤشرات القصيرة والبعيدة لمحاولة التنبؤ بالزلازل أو البركان قبل حدوثه





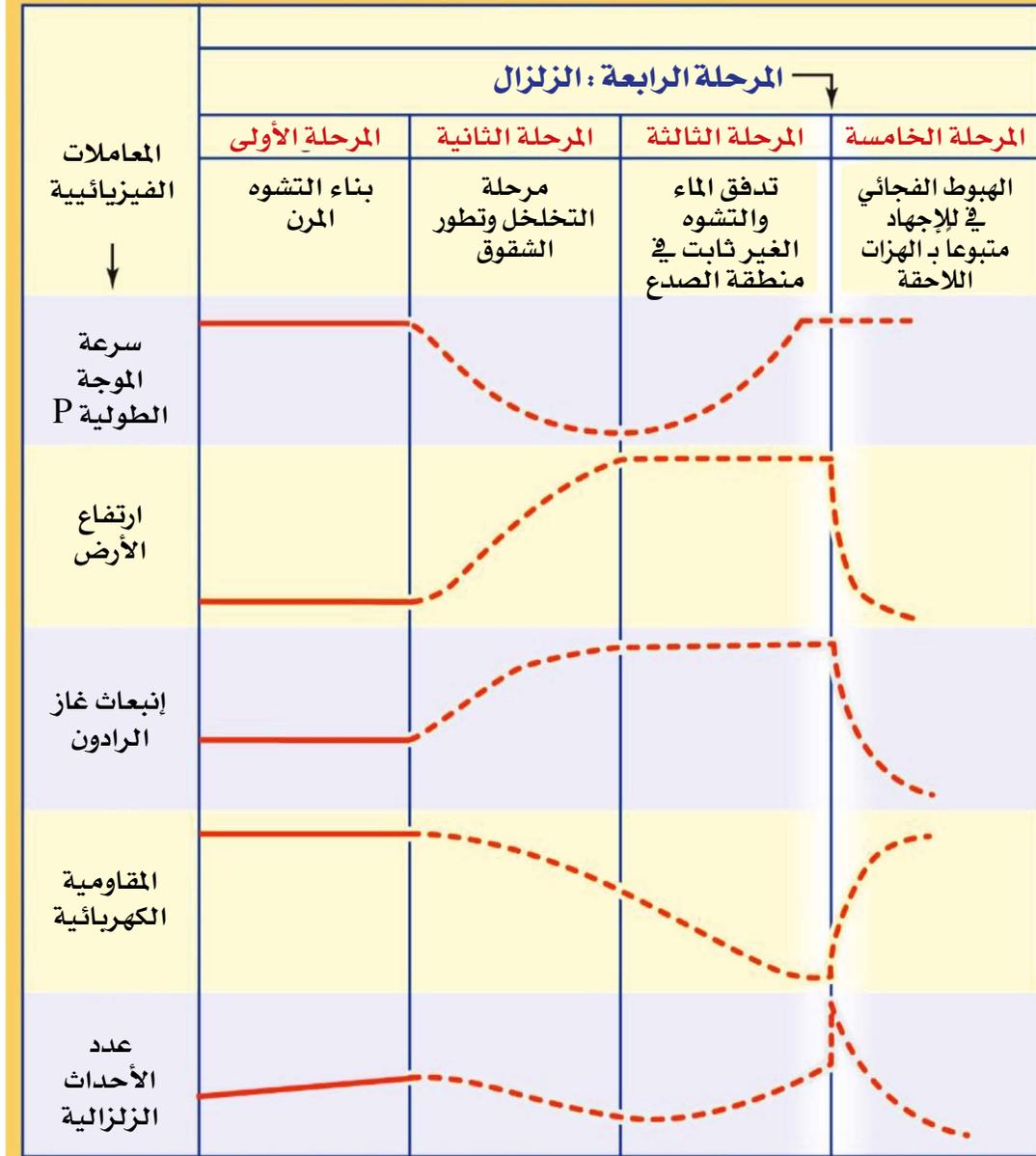
جميع الظواهر الوارد ذكرها تعتبر مؤشرات **تنبؤ** متوسط أو قصير **الأمد**، أما مؤشرات **التنبؤ** طويلة **الأمد** فهي تحدث في الغالب في المناطق التي تعرضت لهزات **مدمرة** في السابق، ويمكن **التنبؤ** بها عن طريق مراجعة السجلات الزلزالية التاريخية، لحساب زمن تكرار هذه الزلازل في المنطقة. إن دراسة الخرائط الزلزالية لمنطقة ما تعرضت لهزات عنيفة في الماضي، ربما يبين استمرار النشاط أو هدوء تام يتبعه انتقال في النشاط إلى مناطق مجاورة للبوثة السابقة. وتوضع هذه الظاهرة على الخرائط الزلزالية على شكل حلقة تتكون من **بؤر الزلازل** للمنطقة المحيطة ببؤرة **الزلازل** السابق، وتعرف بالفجوة الزلزالية **Seismic gap**.

ومع هذا ما زال **توقع الزلازل** عملية في مهدها ولم يستطع علماء **الزلازل** حتى الآن **التنبؤ** بدقة عن مواعيدها، وهذا قد يكون **رحمة من الله بعباده**، ولله **حكمة في ذلك**. والسؤال الذي **يفرض** نفسه: ماذا سوف **يحدث** لو أنذر **الناس** قبل **حدوث الزلازل بساعة**؟ وكيف **سيصرف الناس**؟ وماذا **سيحدث** لحركة **المرور**؟ وأين **سيذهب الناس**...؟!

عموماً اهتمت **معظم** الأبحاث الحالية في **الدول** المتقدمة وكرست جهودها على تقليل المخاطر المرتبطة بالزلازل، من خلال تقييم مزيح الخطر الزلزالي ومدى ضعف منطقة معينة. بشكل عام، تم اعتبار جميع محاولات التنبؤ بالزلازل بشكل عام بمثابة إخفاقات، ومن غير المرجح أن يحدث تنبؤ دقيق في المستقبل القريب. وبدلاً من ذلك، تم توجيه الجهود نحو التخفيف من حدة المخاطر نظراً لأنه **يصعب** أو **يستحيل التنبؤ بالزلازل** بسبب عنصرها **العشوائي** المتأصل وسلوكها **شبه الفوضوي**.



المعايير الفيزيائية للتنبؤ بالزلازل



الأدلة والمعاملات الفيزيائية للتنبؤ بالزلازل



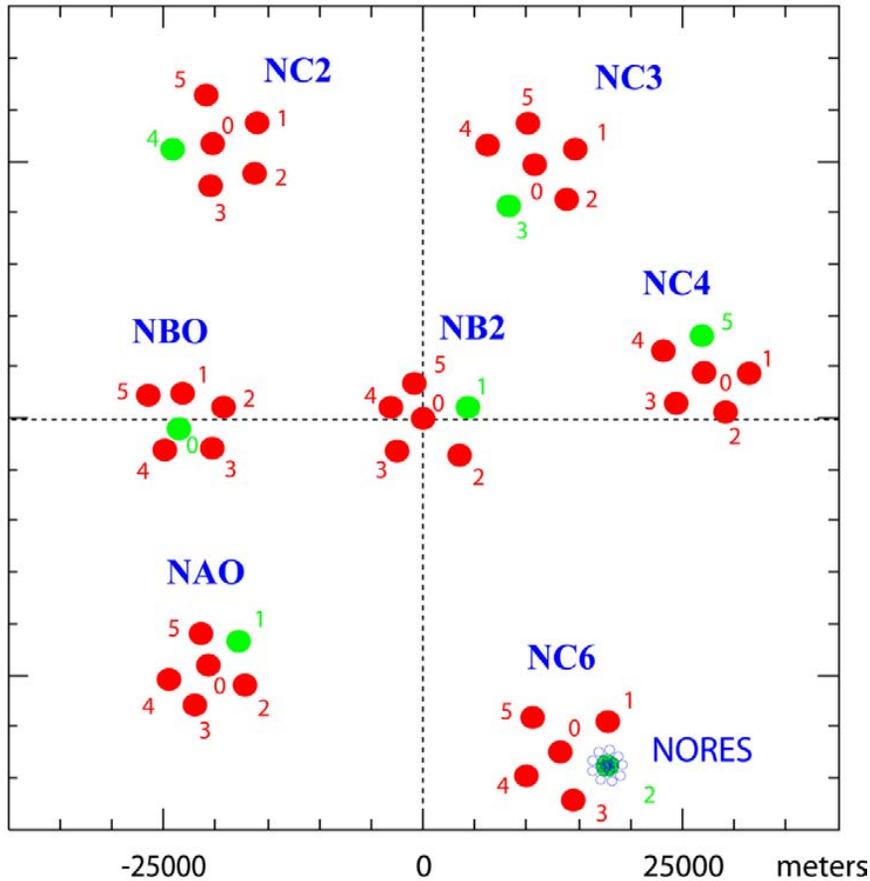
المصفوفة الزلزالية

المصفوفة الزلزالية هي نظام من مقاييس الزلازل المرتبطة مرتبة في نمط هندسي منتظم (متقاطع، دائرة، مستطيل، إلخ) لزيادة الحساسية للكشف عن الزلازل والانفجارات. تختلف المصفوفة الزلزالية عن الشبكة المحلية للمحطات الزلزالية بشكل أساسي عن طريق التقنيات المستخدمة لتحليل البيانات. يتم الحصول على البيانات من المصفوفة الزلزالية باستخدام تقنيات خاصة لمعالجة الإشارات الرقمية مثل تشكيل الحزمة، التي تمنع الضوضاء، وبالتالي تعزز نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) من خلال جمع الجزء المتناسك من الإشارات الزلزالية كما هو ملاحظ في مواقع الصفيح الفردية المختلفة.

تم بناء المصفوفات الزلزالية المبكرة في الخمسينيات من القرن الماضي من أجل تحسين اكتشاف التجارب النووية في جميع أنحاء العالم. تم تصنيف العديد من هذه المصفوفات المنشورة حتى التسعينيات. اليوم أصبحوا جزءاً من IMS كمحطات أولية أو مساعدة. لا تُستخدم المصفوفات الزلزالية لرصد الزلازل والاختبارات النووية فحسب، بل تُستخدم أيضاً كأداة للتحقيق في طبيعة وخواص المصدر الدقيقة وكذلك تحديد وتتبع الهزات البركانية وتحليل خصائص مجال الموجات الزلزالية المعقدة في المناطق البركانية.



NOA and NORES



تكوين مجموعة NORSAR ذات الفتحة الكبيرة الحالية (NOA) ومجموعة الفتحة الصغيرة NORES. توجد مجموعة NORES في موقع مشترك مع NORSAR subarray NC6. كانت فتحة NOA، منذ عام 1976، حوالي 60 كم وفتحة NORES حوالي 3 كم (انظر الرموز الزرقاء الصغيرة). يتم تمييز كل موقع من مواقع مقياس الزلازل بدائرة.



تنتج القدرات الفائقة لاكتشاف الإشارات للمصفوفات الزلزالية من استخدام ما يسمى بتقنيات «تشكيل الحزمة» beamforming حيث يتم تأخير الإشارات في أجهزة الاستشعار المختلفة وتكديسها. تم تحسين SNR لأن الإشارات تتداخل بشكل بناء بينما (عشوائي). يمكن أن توفر المصفوفات أيضاً تقديرات للسمت من محطة إلى حدث (backazimuth، BAZ) والسرعة الظاهرة للإشارات الزلزالية. هذه التقديرات مهمة لكل من أغراض موقع الحدث ولتحديد الإشارة وتصنيفها، على سبيل المثال، مثل P أو S أو المراحل المحلية أو الإقليمية أو Teleseismic.

من حيث المبدأ، فإن الدقة البطيئة للمصفوفة - أي مدى دقة قياس الاتجاه والسرعة الظاهرية لجهة الموجة الواردة - تتحسن مع زيادة فتحة الصفيص. ومع ذلك، فإن تماسك الإشارة يتضاءل مع زيادة فصل المستشعر، وبالتالي يتم تحديد المدى المكاني للصفيص عادةً لتوفير مفاضلة مثالية بين التماسك ودقة البطء النظري.



الزلازل المستحثة والتفجيرات

تشير **الزلازل المستحثة** Induced Seismicity إلى **الزلازل الصغيرة** والهزات الأرضية التي يسببها النشاط **البشري** الذي يغير الضغوط والإجهاد على **قشرة الأرض**. هناك العديد من الطرق المختلفة التي يمكن أن يتسبب بها النشاط البشري في حدوث زلازل مستحثة بما في ذلك العمليات الحرارية الأرضية، واحتجاز الخزانات (المياه خلف السدود)، وحقن مياه الصرف، وعمليات النفط والغاز مثل التكسير الهيدروليكي. معظم الزلازل المستحثة ذات حجم منخفض، ويمكن أن تشكل خطراً كبيراً. قد تحدث الزلازل أيضاً عن طريق حقن أو سحب السوائل من الخزانات الجوفية.

عندما يتم **حقن** كميات كبيرة من **السوائل** في التكوينات الجوفية للتخزين أو التخلص منها، فقد **ينتقل** بعض السوائل إلى الصدوع. يمكن أن تؤثر هذه السوائل على الضغوط التي تعمل على **العيوب**. يسمى ضغط **السوائل** في الكسور ومسام الصخور «ضغط المسام». إذا كانت ضغوط المسام منخفضة مقارنة بالقوى الطبيعية التي تربط الصخور ببعضها البعض، فإن القوى التكتونية الطبيعية فقط هي التي يمكن أن تسبب الزلزال. ومع ذلك، إذا زادت ضغوط المسام، فسيستغرق حدوث زلزال أقل من عدم توازن الضغوط. هناك احتمال أنه عند حقن السوائل في الصخر، قد يؤدي السائل إلى زيادة ضغط المسام على خطأ محتمل نشط. قد يتسبب هذا في حدوث انزلاق مفاجئ يؤدي إلى إطلاق طاقة مخزنة، مما يؤدي إلى **توليد الزلازل** وربما **حدوث زلزال**.

تقوم **شركات التعدين** بعمليات **الحفر** في داخل **القشرة الأرضية** بشكل أعمق من أي وقت مضى، كما يتم إزالة الكثير من الصخور والمواد الأخرى من



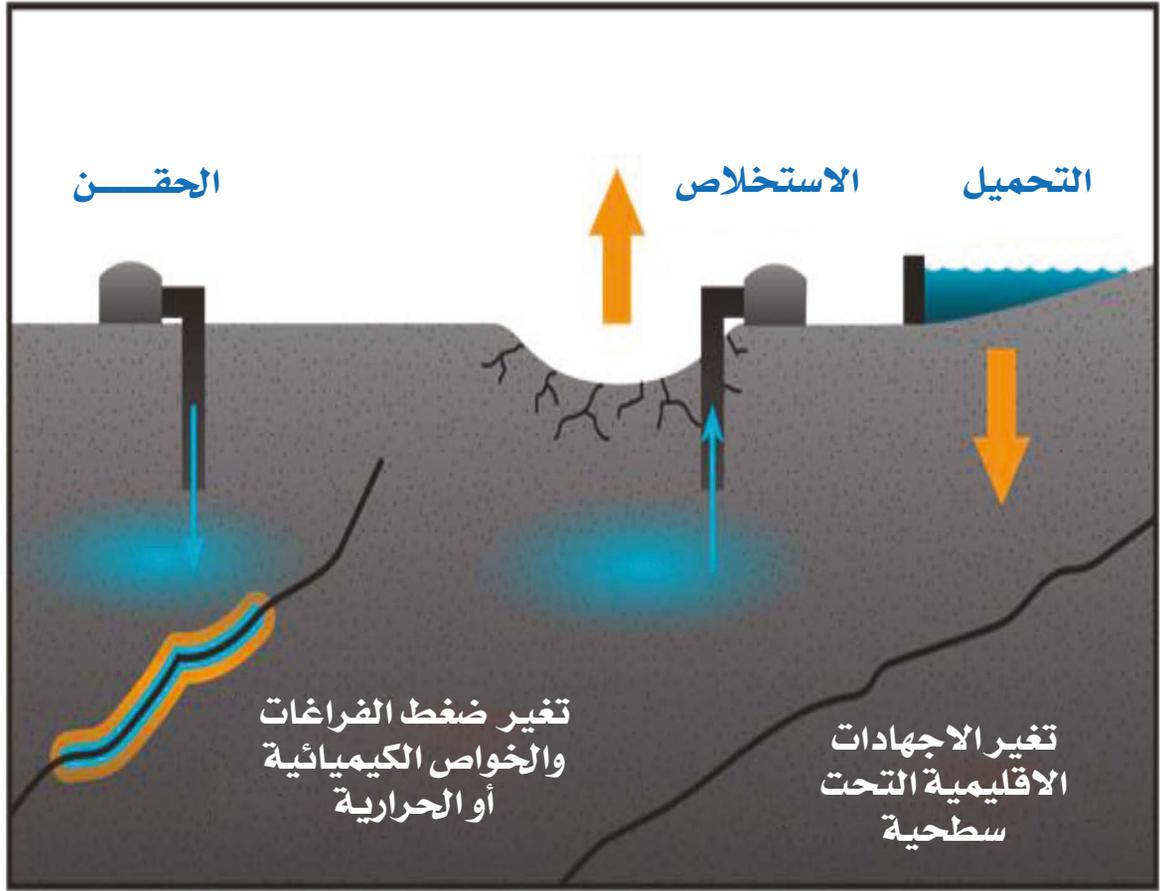
الأرض، بحيث يحدث عدم الاستقرار في الأرض، مما يؤدي إلى حدوث الزلازل. إن بناء السدود هو نشاط بشري آخر يمكن أن يتسبب في حدوث زلزال، حيث تسبب بناء السدود في حدوث بعض أكبر وأخطر الزلازل التي تسبب فيها الإنسان في التاريخ، على سبيل المثال كان زلزال الصين عام 2008 في مقاطعة سيتشوان والذي بلغت قوته 7.9 درجة على مقياس ريختر حدثاً مدمراً، حيث يعتقد العلماء أنه نجم عن إنشاء سد نتج عنه جمع 320 مليون طن من المياه فوق خط صدع معروف.

تم بناء العديد من سدود العالم في مناطق معرضة للزلازل؛ وذلك نظراً لأن السدود غالباً ما تُبنى في الوديان، وتوجد نتيجة التعرية، حيث يمكن لخزانات المياه الكبيرة أن تسبب الزلازل، حيث يتراكم الإجهاد في الأرض بسبب وزن الماء فوقها، كما يمكن أن تتسبب الخزانات أيضاً في حدوث زلازل؛ لأن زيادة ضغط مسام المياه الجوفية تجعل الصخور الموجودة تحت الخزان أضعف إلى جانب ذلك فقد تحدث الزلازل أحياناً أيضاً بسبب الانفجارات النووية.

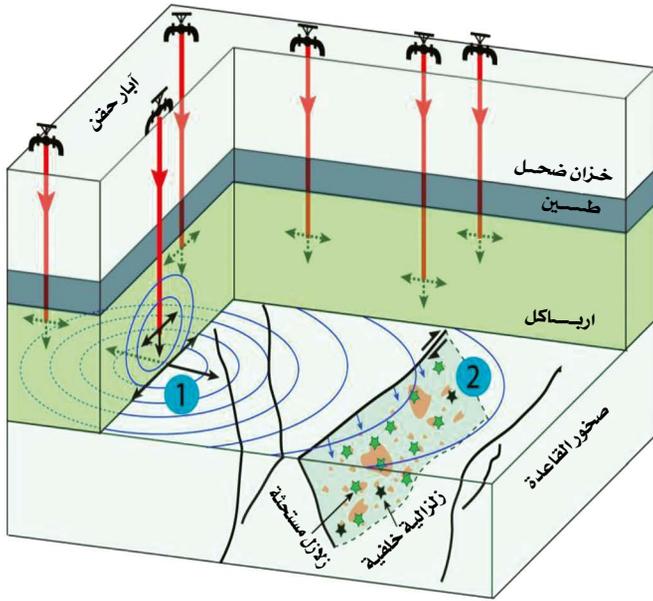
إن اختبار القنبلة النووية لكوريا الشمالية لعام 2017 للميلاد كان قد تسبب في هزات ارتدادية استمرت لنحو ثمانية أشهر بعد الانفجار. كما تم تفجير القنبلة بالقرب من خط صدع لم يتم تعيينه من قبل، حيث أدى الزلزال الأول إلى زلزال بقوة 6.3 درجة، تلاه بعد ذلك زلزال بقوة 4 درجات بعد دقائق فقط.

أن ممارسة الأنشطة كعمليات سحب النفط وحقن السوائل المستخدمة في عمليات إنتاج النفط، والتفجيرات النووية وسحب المياه الجوفية، وإعمال المحاجر، وبناء الجسور الضخمة، بالإضافة إلى ردم مسطحات مائية أو إنشائها من دون التقيد بالأسس العلمية هو السبب الرئيس للزلازل المستحثة، التي تسجل باستمرار من خلال المراصد المحلية من دون أن يشعر بها الأفراد لكنها تؤدي إلى مشكلات بيئية.





تشمل الزلازل المستحثة ضغوط المسام المرتفعة و / أو التغيرات الحرارية والكيميائية بسبب حقن السوائل والهجرة اللاحقة؛ زيادة التحميل أثناء حجز الخزان؛ وتغيير الضغوط تحت السطحية أثناء استخراج السوائل، مثل المياه الجوفية أو الهيدروكربونات بمعدل يسبب هبوطاً و / أو انزلاقاً.



حقن مياة الصرف الصحي

1 انتشار السائل

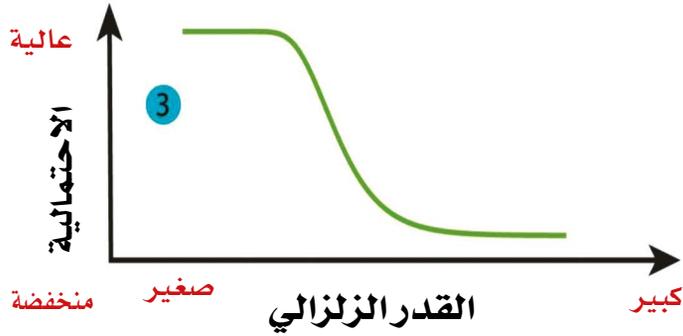
اضطراب الاجهاد

2 فيزيائية الزلزال

معدل الزلزالية

3 التحليل الإحصائي

الاحتمالية الزلزالية



إطار للتنبؤ بالزلازل الناجم عن الحقن مع الأخذ في الاعتبار فيزياء انتشار السوائل وتنوي الزلازل



التفجيرات

يحدث الانفجار النووي نتيجة الإطلاق السريع للطاقة من تفاعل نووي عالي السرعة متعمداً. قد يكون رد الفعل الدافع هو الانشطار النووي أو الاندماج النووي أو مزيج من الاثنين. تنتج جميع التفجيرات النووية إشعاعاً نووياً وحطاماً مشعاً يمكن أن ينتج عنه آثار مدمرة وطويلة العمر في البيئة المحلية. التأثيرات السائدة للانفجار النووي (الانفجار، والإشعاع الحراري) هي نفس الآليات الفيزيائية التي تنتجها المتفجرات التقليدية؛ ومع ذلك، فإن الطاقة الناتجة عن انفجار نووي تزيد بملايين المرات ودرجات الحرارة التي يتم الوصول إليها في حدود عشرات الملايين من درجات مئوية.

حتى عام 1957، أجريت جميع التفجيرات النووية بالقرب من سطح الأرض أو فوقه. لكن في ذلك العام، في 19 سبتمبر في نيفادا، حدث أول انفجار نووي تحت الأرض. كانت الانفجارات تحت الأرض هي النوع الأكثر شيوعاً من التجارب النووية، حيث تمثل حوالي ثلاثة أرباع تلك التي تم إجراؤها خلال الحرب الباردة. بشكل عام، فهي ليست مذهلة مثل الانفجارات الجوية أو فوق الأرض أو تحت الماء ولا تطلق الكثير من التساقط الإشعاعي، لكن لديها علامات خاصة. على وجه الخصوص، ينتج عن انفجار تحت الأرض درجات حرارة وضغوط عالية بما يكفي لتبخير الصخور وإنشاء تجويف تحت الأرض يصل عرضه إلى عدة عشرات أو مئات الأمتار. حول هذا التجويف، يتم سحق الصخور، وتشققها، وتشوهها بشكل غير مرن، ثم تشوهها بشكل مرن في طبقات متتالية. تتشكل





الموجات الزلزالية في هذه **الطبقة** الخارجية الأبعد - حيث **تسترخي** الصخور الموجودة بداخلها **وتعود** إلى حالتها السابقة وتطلق **الضغط** الذي تراكم مؤقتاً.

تختلف **الأسلحة النووية** تماماً عن الأسلحة العادية بسبب الكمية الهائلة من الطاقة المتفجرة والحرارية التي يمكن أن تنتجها. كما أن التأثير المدمر للانفجار لا يتوقف بعد الانفجار الأول، كما هو الحال مع المتفجرات العادية. تنتقل سحابة من الإشعاع النووي من مركز الانفجار، مسببة تأثيرات واسعة النطاق على كل من النباتات والحيوانات حتى بعد مرور الضغط وموجات الحرارة. يمكن أن يتسبب **الإشعاع** في حدوث **طفرة جينية** وتسمم **إشعاعي** وموت.

تاريخياً، تم **تصنيف** اختبارات الانفجار **النووي** إلى فئات **تعكس** وسيط أو موقع **الاختبار**: الغلاف الجوي وتحت الماء وتحت الأرض.

تحدث انفجارات اختبار الغلاف الجوي في الغلاف الجوي أو فوقه. بشكل عام، حدث ذلك على شكل عبوات انفجرت على أبراج أو بالونات أو صنادل أو جزر أو سقطت من الطائرات. كما تم إجراء عدد محدود من التفجيرات النووية على ارتفاعات عالية، التي أطلقت بشكل عام من الصواريخ. يمكن للانفجارات النووية القريبة بدرجة كافية من الأرض لجذب الأوساخ والحطام إلى سحابة الفطر أن تولد كميات كبيرة من التداعيات النووية بسبب تشعيع الحطام. يمكن أن تولد التفجيرات النووية عالية الارتفاع **نبضاً كهرومغناطيسياً** (EMP)، ويمكن **للجسيمات** المشحونة الناتجة عن **الانفجار** أن تعبر **نصفي الكرة الأرضية لإنشاء** عرض شفقي.



عادةً ما يتم إجراء تفجيرات الاختبار تحت الماء لتقييم آثار الأسلحة النووية على السفن البحرية (كما هو الحال في عملية مفترق الطرق، بالقرب من جزيرة بيكينى أتول في جنوب المحيط الهادئ)، أو لتقييم الأسلحة النووية البحرية المحتملة مثل (الطوربيدات النووية أو العمق- شحنة). يمكن أن تؤدي الاختبارات تحت الماء القريبة من السطح إلى تشتيت كميات كبيرة من الماء المشع والبخار، مما يؤدي إلى تلويث السفن أو الهياكل المجاورة.

تفجيرات الاختبار تحت الأرض هي تجارب نووية تجرى على أعماق متفاوتة تحت سطح الأرض. شكلت التجارب النووية تحت الأرض غالبية التجارب النووية التي أجرتها الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي خلال الحرب الباردة. عندما يتم احتواء الانفجار بالكامل، فإن التجارب النووية تحت الأرض تبعث منها كمية ضئيلة من الغبار الإشعاعي. ومع ذلك، يمكن للتجارب النووية تحت الأرض «التنفيس» إلى السطح، مما ينتج عنه كميات كبيرة من الحطام المشع نتيجة لذلك.

تكون الانفجارات في الغالب من صنع الإنسان، ويتم التحكم فيها، ومعرفة موقعها ووقت المصدر. ومع ذلك، قد تحدث أيضاً انفجارات طبيعية قوية بالاقتران مع الانفجارات البركانية أو تأثيرات النيزك. الانفجارات المستخدمة في علم الزلازل الاستكشافية لفحص القشرة لها عائد، Y، من بضعة كيلوغرامات إلى أطنان من مادة TNT (Trinitrotoluol). وهذا يكفي لإنتاج موجات زلزالية يمكن تسجيلها من عدة كيلومترات إلى مئات الكيلو مترات. يمكن تسجيل الانفجارات النووية تحت الأرض التي تصل إلى مليون طن من مادة تي إن تي المكافئة بالزلازل حتى في جميع أنحاء العالم (1 كيلو طن من مادة تي إن تي 4.2×10^{12} جول). ومع ذلك، حتى أقوى التجارب النووية تحت الأرض ذات العائد المكافئ لحوالي 5 مليون طن من مادة تي إن تي أنتجت موجات جسمية بحجم 7 درجات. هذا يتوافق مع ما يقرب من 0.1% من الطاقة الزلزالية التي أطلقها زلزال تشيلي عام 1960.





أنماط الزلازل والتفجيرات

تطلق كل من الانفجارات والزلازل كمية كبيرة من الطاقة بسرعة كبيرة، ويمكن تسجيل كليهما بواسطة أجهزة قياس الزلازل. ومع ذلك، نظراً لأن القوى المشاركة في كل منها مختلفة تماماً، فإن أشكال الموجة التي يخلقها كل منها تبدو مختلفة. الاختبارات النووية قريبة جداً من سطح الأرض؛ يتم إطلاق كل الطاقة من الحجم الصغير المحيط بالجهاز.

الانفجار ينتج حركة أولية انضغاطية موجهة للخارج متجانسة في جميع الاتجاهات بينما ينتج الزلزال التكتوني حركات أولى مختلفة السعة والقطبية في اتجاهات مختلفة. يمكن استخدام هذه الخصائص لتحديد نوع عملية المصدر والتمييز بين الانفجارات والزلازل التكتونية.

مقارنة بالزلازل التكتونية، تكون مدة عملية المصدر للانفجارات ووقت الصعود إلى أقصى مستوى للإزاحة أقصر بكثير (ملي ثانية مقارنة بالثواني حتى بضع دقائق) وأكثر اندفاعاً. وفقاً لذلك، تثير الانفجارات ذات الحجم المماثل لموجة الجسم مزيداً من التذبذبات المتكررة. قد يستمر سقوط الصخور لعدة دقائق ويسبب موجات زلزالية لكن بشكل عام مع ظهور أقل وضوحاً وفصل أقل لمجموعات الموجات.

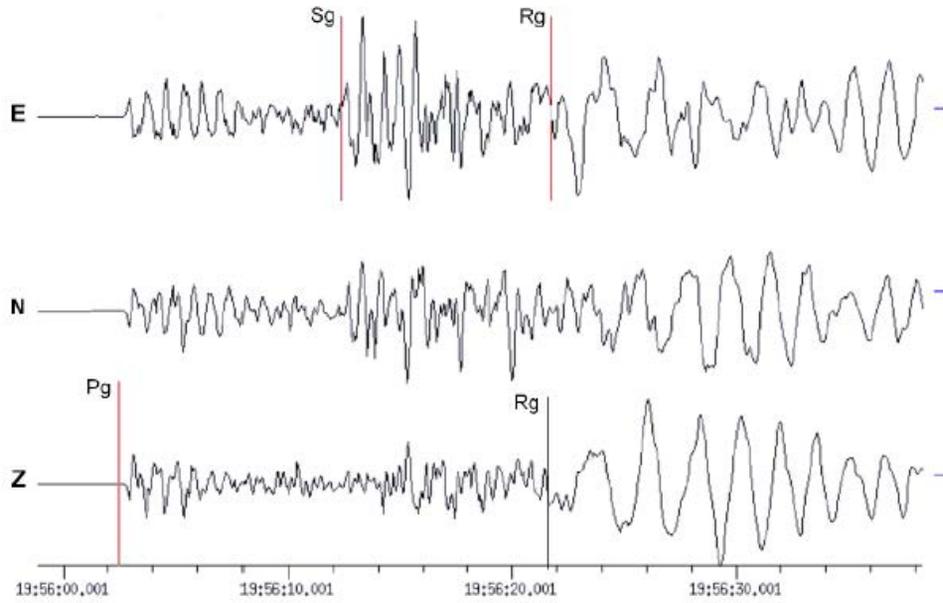
إن انهيار الكهوف الكارستية أو انفجارات الصخور الناتجة عن التعدين هي بشكل عام من نوع الانفجار الداخلي. وفقاً لذلك، يجب أن تظهر أنماط حركتهم الأولى توسعاً في جميع السـمـت إذا لم يتم تشغيل حدث تكتوني ثانوي بسبب الانهيار. قد تصل أقوى الأحداث إلى درجات تصل



إلى حوالي $M = 5.5$ ويتم تسجيلها في جميع أنحاء العالم. لوحظت الزلازل التي يسببها الخزان بشكل متكرر بالتزامن مع حجز المياه أو التغيرات السريعة في منسوب المياه خلف السدود الكبيرة. نظراً لأن هذه الأحداث يتم تشغيلها على طول الصدوع التكتونية الموجودة مسبقاً والمضغوطة مسبقاً، فإنها تُظهر أنماط القطبية النموذجية للزلازل التكتونية. وصلت أقوى الفتحات التي تم الإبلاغ عنها حتى الآن إلى درجات تصل إلى 6.5.

تقع الزلازل عادة على عمق يتراوح من عدة كيلومترات تحت سطح الأرض؛ يتم إطلاق الطاقة من سطح الصدع، اعتماداً على حجم الصدع. تنتج الاختلافات في عمق ومدى مصدر الطاقة اختلافات في أشكال الموجة التي يتم تسجيلها على مخطط الزلازل. إذا تم إنشاء الموجات الزلزالية على عمق كبير داخل الأرض، فيمكن أن تكون ناجمة عن الزلزال فقط. كما أن الانفجارات لا تولد موجات زلزالية قوية للغاية على السطح، وبالتالي فإن الموجات السطحية القوية (تلك التي تسبب أكبر قدر من الضرر للمباني) يجب أن تأتي من الزلزال. أخيراً، تطلق التفجيرات النووية عادةً طاقة تتراوح ما بين 2 و50 كيلو طن من الغلة، مقارنةً، على سبيل المثال، بزلزال $M6.5$ في أفغانستان في مايو من عام 1998 الذي كان ناتجاً مكافئاً قدره 2000 كيلو طن.





انفجار الصخور الناجم عن التعدين جنوب سايبروكن، ألمانيا، تم تسجيله في محطة WLF في
 نوکسمبورغ ($D = 80 \text{ km}$, $h = 1 \text{ km}$, $M_I = 3.7$). لاحظ مرحلة Rg المشتتة القوية

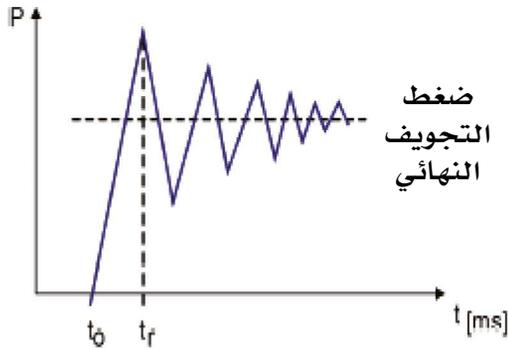


رسومات تخطيطية لانفجار مثالي تحت الأرض وزلزال مضيبي. حركة الصدع هي «يسارية جانبية»، أي عكس اتجاه عقارب الساعة. توضح الأسهم اتجاهات الحركات الانضغاطية (للخارج، القطبية + المظلة باللون الأحمر) والتخلخلية (للبداخل، القطبية - المظلة باللون الأخضر). تشير الأنماط الموضحة على السطح، التي تسمى أنماط الاتساع أو القطبية، إلى التباين السمّي في الساعات المرصودة أو اتجاه الحركات الأولى في السجلات الزلزالية، على التوالي. في حين أن الانفجارات الشبيهة بالنقطة في وسط تماثل يجب ألا تُظهر اتساعات تعتمد على السمّت وحركات الضغط الأولى فقط، فإن الساعات والقطب يختلفان **لزلال تكتوني**.

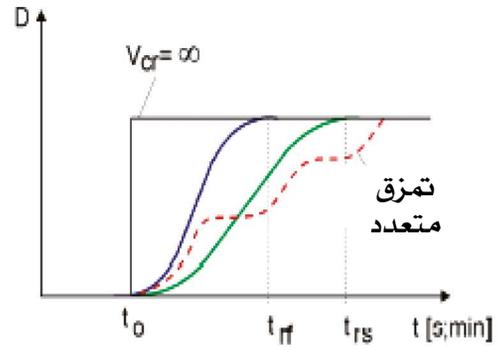




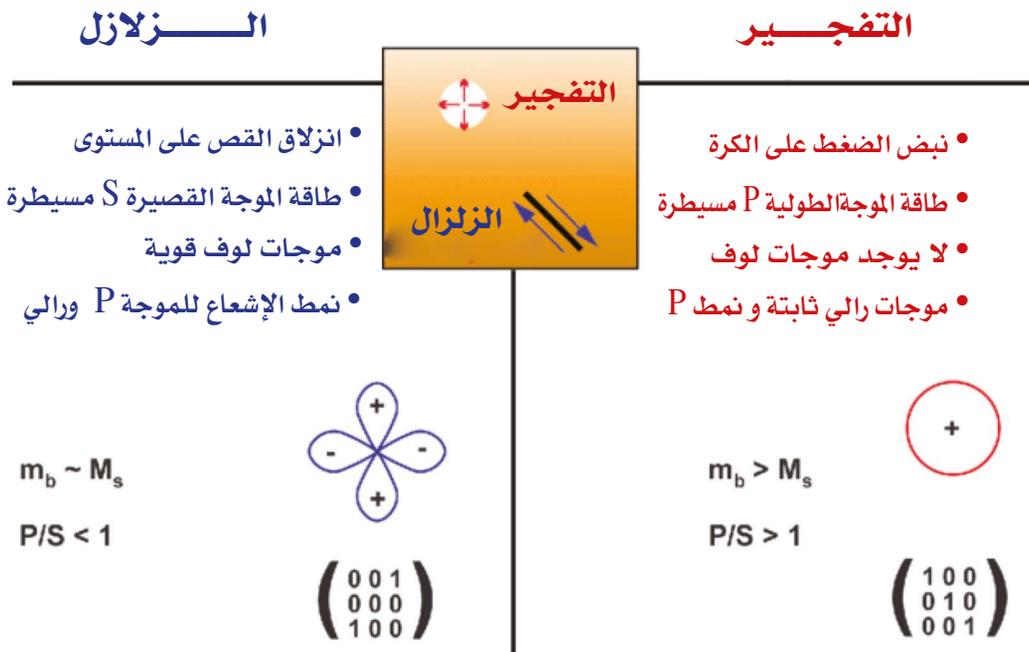
التفجير



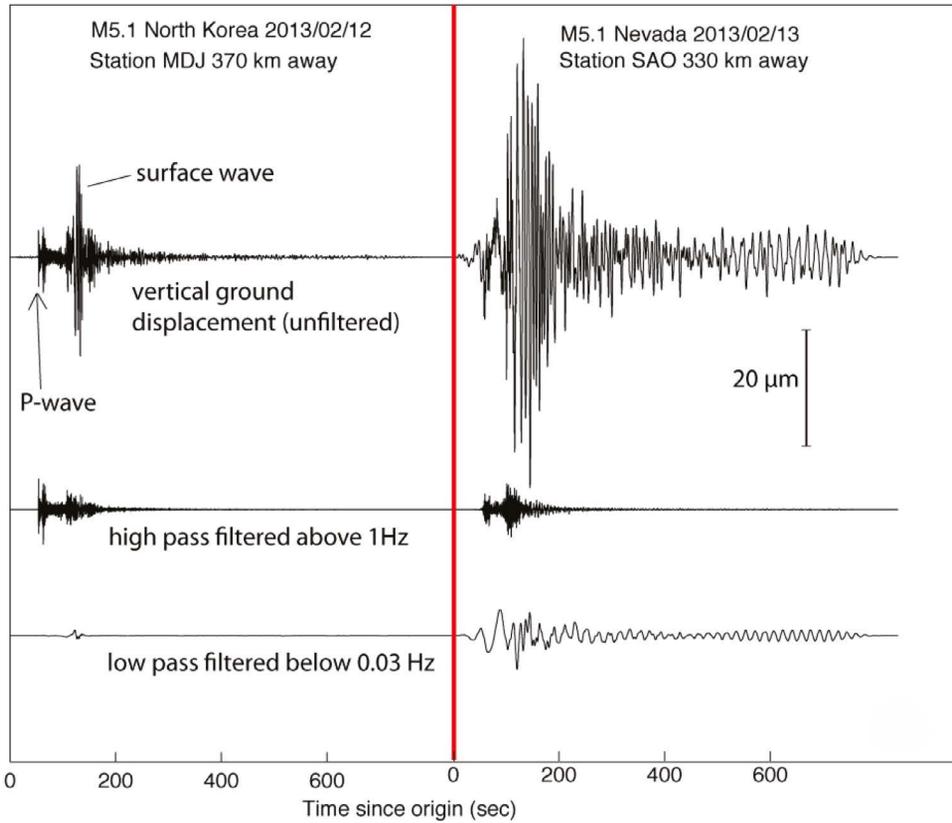
الزلازل



يتم التمييز بين الانفجارات والزلازل بشكل فعال من خلال نسب السعة P/S لأحداث الحجم المعتدلة أكبر من 4 التي لوحظت على مسافات إقليمية إلى مسافات بعيدة المدى (أبعد من 200 كم). من غير الواضح ما إذا كانت نسب P/S هي عوامل تمييز فعالة للانفجار للأحجام المنخفضة التي لوحظت على مسافات أقصر.

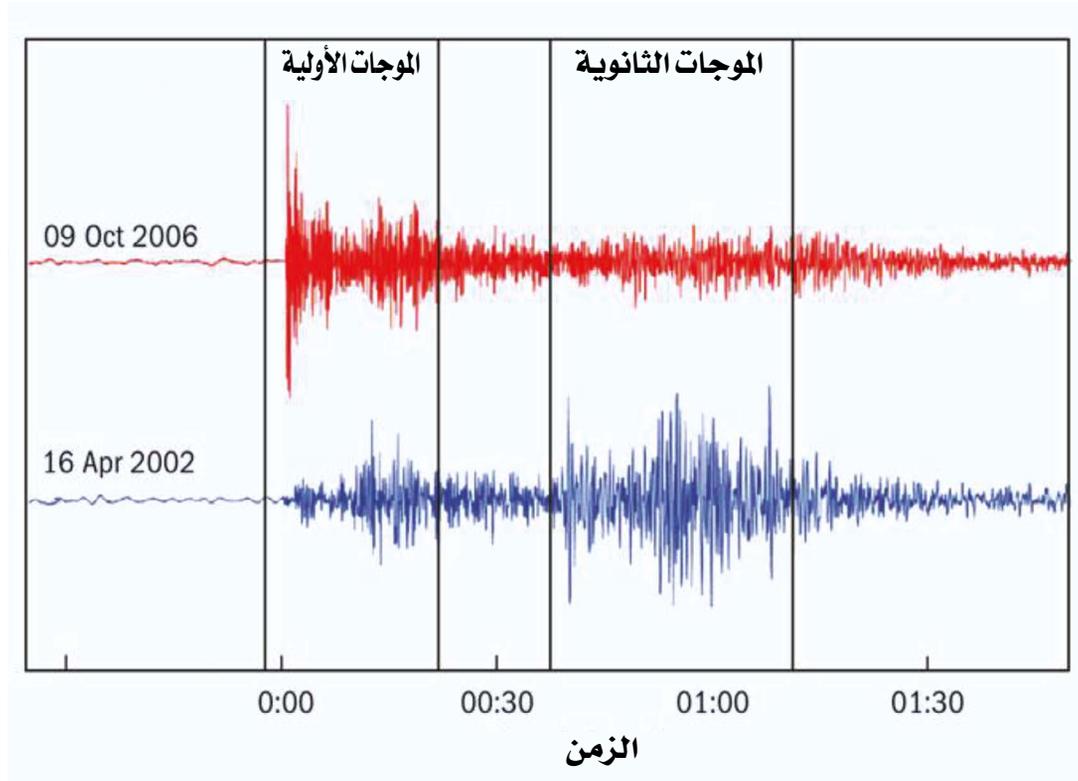


الانفجارات النووية تحت الأرض مقارنة بالزلازل الطبيعية تولد عادة موجات زلزالية عبر جسم الأرض أكبر بكثير من الموجات السطحية.



توفر هذه الموجات، التي يمكن اكتشافها في دقائق بواسطة أجهزة قياس الزلازل حتى آلاف الكيلومترات من موقع الاختبار، معلومات عن قوة الحدث وموقعه وطبيعته. لكن الأمواج لا يمكنها الكشف على وجه اليقين عما إذا كان حدث ما نتيجة تجربة نووية أو شيء أكثر تقليدية مثل انفجار كيميائي في منجم أو زلزال.





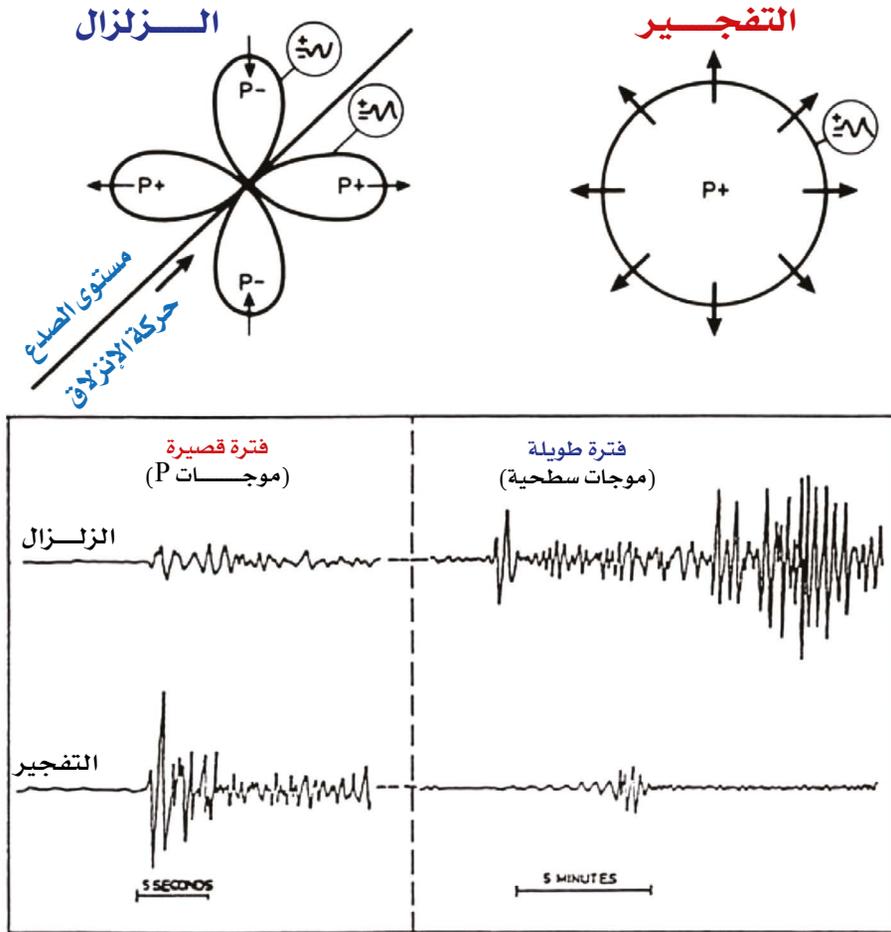
عند حدوث أي زلزال على صدع مَضْرِبِي، فإن ما يحدث دائماً هو انزلاق جزء من القشرة ضد آخر. ينتج عن هذا أنماط إشعاع طاقة زلزالية متميزة للغاية. إن الحركة التي تشعر بها تعتمد على مكانك بالنسبة للصدع، كما أن الطاقة الزلزالية المنبعثة من الصدع تختلف بالمثل في اتجاهات مختلفة بعيداً عن الصدع. هذه هي المعلومات التي تسمح لنا بتحديد نوع الصدع الذي تسبب في حدوث الزلزال.





في حالة الانفجار. ما لم يتم توزيع العامل المتفجر في خط أو نمط آخر، فإننا نتوقع توزيعاً موحداً إلى حد ما للطاقة في جميع الاتجاهات من الانفجار. لا يوجد سبب يجعل أي اتجاه بعيداً عن الانفجار يتلقى طاقة أكثر من أي اتجاه آخر. لا يوجد زلزال ناتج عن صدع يمكن أن ينتج هذا النوع من نمط الإشعاع. أيضاً. نظراً لعدم وجود حركة انزلاق حقيقية مرتبطة بانفجار، يحدث القليل جداً من القص، وبالتالي يوجد القليل جداً من طاقة الموجة S. وبالتالي، فإن نسبة الموجة S إلى طاقة الموجة P من الانفجار منخفضة بشكل غير عادي وتختلف تماماً عن الزلزال الناتج عن صدع.





يوضح الشكل الاختلافات في كيفية إنشاء الإشارات الزلزالية لكل من الزلازل والانفجارات. الموجات P المرتبطة بالزلازل عبارة عن نمط رباعي الفصوص من الانضغاطات والخلخلة بسبب حركة القص عبر الصدع، في حين أن الموجات المرتبطة بالانفجار تشع بشكل موحد في جميع الاتجاهات بسبب الضغط المنتظم نسبياً المطبق على جدران التجويف الناتج عن الانفجار.



التمييز بين الزلازل والتفجيرات

تم تطوير عدة طرق للتمييز بين الزلازل والانفجارات النووية. تستند هذه الأساليب إلى بعض المعايير الأساسية التي يمكن نشرها للتمييز بين الزلازل والانفجارات النووية. تتضمن هذه المعايير موقع المصدر الزلزالي، وعمق المصدر، والاختلافات في محتويات التردد بين المصدر النقطي للانفجار وسطح التمزق الأكبر للزلازل، والاختلافات بين الانفجارات النووية والزلازل، والتعقيد مقابل النسبة الطيفية.

موقع المصدر الزلزالي

إن مخططات الزلازل المرصودة من التجارب النووية متشابهة للغاية. تتميز جميعها بوصول حاد للموجة P، ومراحل Lg ضعيفة، وموجات رايلي ذات فترة قصيرة متطورة. نعزو أوقات السفر التفاضلية للموجة P إلى مواقعها النسبية، ومعلومات المصدر التفصيلية، والهياكل القريبة من المصدر، وعمق الدفن، ووقت الأصل، بالنظر إلى أن استجابة الأداة، واستجابة الموقع، ومسارات الانتشار هي نفسها تقريباً.

بالنظر إلى الطبيعة التفجيرية للأحداث النووية، فإن الموجات الزلزالية المتولدة تدفع الأرض بعيداً مما ينتج عنه ضغوطات على مخطط الزلازل في جميع الاتجاهات. يصعب بشكل عام الاستدلال على ذلك في مخططات الزلازل للمحطات الموجودة في الطمي الكثيف أو في المواقع الصاخبة. ومع ذلك، قد



يؤدي استخدام **المرشحات المناسبة**، في بعض الحالات، إلى تمكين **عالم الزلازل** من استنتاج **الإحساس** بالحركة الأولى للموجات الزلزالية من محطة رقمية عريضة النطاق. إذا كانت آلية مصدر الزلازل في المنطقة معروفة، فمن الممكن تحديد منطقة حرجة لتلك المنطقة حيث يتوقع المرء توسعاً. إذا لوحظ ضغط في تلك المنطقة من أجل انفجار نووي مشتبه به، فإنه سيدعم الحدث ليكون انفجاراً.

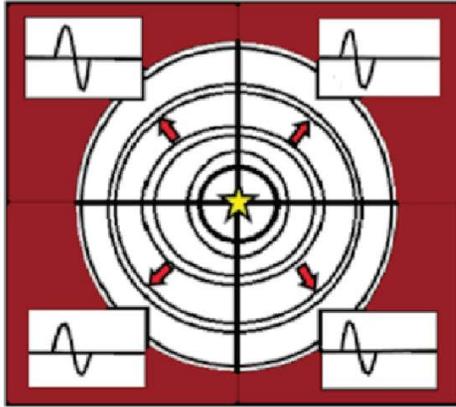




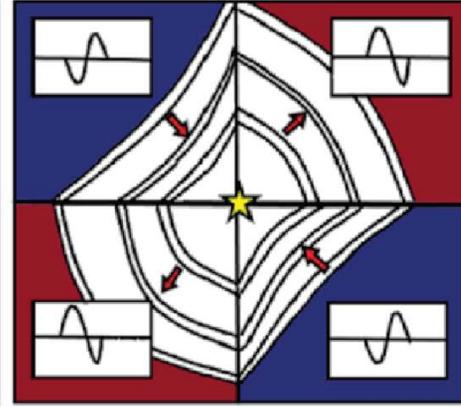
نوع المصدر الزلزالي

عندما يحدث زلزال، ينزلق جانبي الصدع (كسر مستو في كتلة صخرية) ضد الآخر، مما ينتج عنه أربعة فصوص من الموجات الانضغاطية والموسعة الناتجة عن «دفع» و «سحب» الصخور المحيطة، على التوالي (الشكل 3 أ). تتفاعل هذه الفصوص مع السطح لإنشاء نمط مميز للحركة «الخارجية أولاً» و «الداخل أولاً» التي تعتمد على اتجاه الصدع (الشكل 3 ب). في المقابل، عندما يحدث انفجار، تدفع الصدمة الصخور إلى الخارج في كل اتجاه. من حيث المبدأ، لا يولد هذا سوى موجات انضغاطية في جميع الاتجاهات، مع تسجيل إشارة «خارجية أولاً» في كل محطة. (الشكل 3 ج).

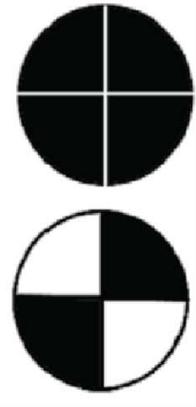
3a.



3b.

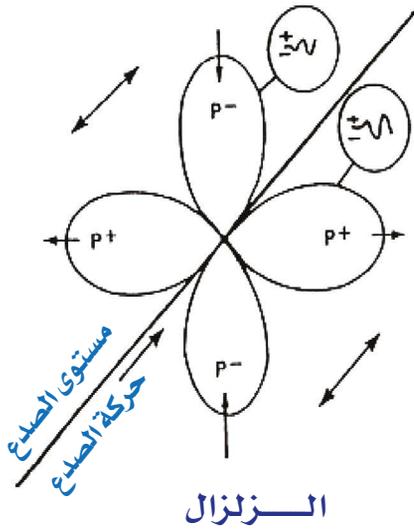


3c.

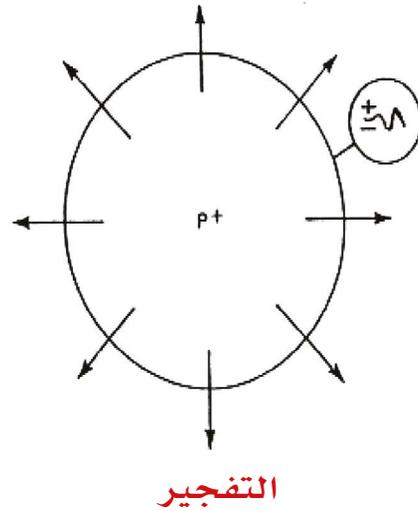




- أ. تمثيل الآلية البؤرية لأنواع مختلفة من الزلازل على اليسار وآلية الانفجار على اليمين. يمثل الأسود موجة انضغاطية، ويمثل الأبيض موجة ممتدة.
- ب. تمثيل تخطيطي للموجات الزلزالية المنبعثة أثناء حدث الانزلاق مع الإشارة الأولى المقابلة التي لوحظت على مخطط الزلازل (التمدد أو الانضغاطي، اعتماداً على الربع).
- ج. رسم تخطيطي يمثل الموجات الزلزالية المنبعثة أثناء الانفجار. الآن، تُظهر تسجيلات مقياس الزلازل في كل من الأرباع الأربعة الحركة الانضغاطية الأولى.



الزلازل



التفجير

يوضح الشكل الاختلافات في كيفية إنشاء الإشارات الزلزالية لكل من الزلازل والانفجارات. الموجات P المرتبطة بالزلازل عبارة عن نمط رباعي الفصوص من الانضغاطات والخلخلة بسبب حركة القص عبر الصدع، في حين أن الموجات المرتبطة بالانفجار تشع بشكل موحد في جميع الاتجاهات بسبب الضغط المنتظم نسبياً المطبق على جدران التجويف الناتج عن الانفجار.



الطريقة الطيفية

يمكن عرض **الاختلافات** الطيفية بين الانفجارات و**الزلازل** في تسجيلات الموجة P. تتمثل **الخطوة الأولى** في معالجة السجلات في إزالة المتوسط من خلال الموجة P من المكونات الرأسية، ثم إزالة الاستجابة الآلية. وبالتالي، يتم استخدام مرشح تمرير النطاق بين 0.1 و 10 هرتز لهذه الأشكال الموجية. يتم تحويل سجل السرعة إلى سجلات الإزاحة. يتم الحصول على أطيف الموجة P باستخدام تحويل فورييه السريع (FFT) للنافذة الزمنية البالغة 20 ثانية من الموجات P. الطيف الذي تم الحصول عليه مزود بالطيف النظري على أساس **نموذج برون** (1970) المصدر من أجل **تقييم** معلمات **المصدر** بما في ذلك اللحظة وتردد **الزاوية**. يتراوح تردد **الزاوية** للانفجار ما بين 2.0 و 3 هرتز بينما يعطي **الزلازل** قيماً ما تتراوح بين 0.9 و 1 هرتز.

بشكل عام، تكون **سعة الموجة** P أكبر من **الموجات** S في حالة الانفجارات بشرط أن تكون **المسافة** المركزية لمحطة التسجيل أكثر من 1000 إلى 1500 كم. بالنسبة إلى مسافات مركزية أقل، يصعب أحياناً تمييزها عن الزلازل نظراً لأن معظم المراحل القريبة من المصدر تم تطويرها. ومع ذلك، نظراً لارتفاع محتوى التردد، فإن **الموجات الزلزالية** تتضاءل بسرعة مع المسافة مقارنة **بالزلازل**.

طريقة التعقيد ونسبة الطيف

تنتج **الانفجارات** إشارات موجات **انضغاطية** بسيطة، تتكون من دورات قليلة بينما تنتج **الزلازل** عادةً **موجات** قص جنباً إلى جنب مع موجات **انضغاطية** تميل إلى أن تكون معقدة، وتتألف من **سلسلة** طويلة **تتبع** الدورات الأولية





القليلة **لموجة P**. للانفجارات جزءاً كبيراً من إجمالي طاقة الإشارة الخاصة بها تتركز في موجات الانضغاط المبكرة للإشارة، حيث تتركز طاقة **الزلازل** نسبياً في الأجزاء اللاحقة. لذلك، يمكن تصنيف الأحداث **الزلزالية** وفقاً لدرجة التعقيد الطيفي وثوراء أنواع مختلفة من الموجات والسعات. يتم **تقدير** التعقيد بمقارنة اتساع **الجزء الأولي** من الإشارة مع **سعات الكودا التالية**. يُعرّف التعقيد بأنه النسبة العكسية بين محتوى **الطاقة** خلال **الثواني الخمس الأولى** (t1) **لموجات P** إلى محتوى الطاقة في **الثلاثين ثانية التالية** (t2) (كيلي، 1968).

طريقة Ms: mb

تنتج **الانفجارات** النووية تحت الأرض **إشارات** تلجأ إلى حجم الموجة السطحية (Ms) **وأقدار** موجة الجسم (MB) التي تختلف عن تلك الخاصة بإشارات **الزلازل**. وذلك لأن الانفجارات تبعث المزيد من الطاقة على شكل موجات جسدية (**إشعاع زلزالي عالي التردد**) بينما تصدر **الزلازل** المزيد من الطاقة على شكل موجات سطحية (**إشعاع زلزالي منخفض التردد**). هذا يعني أن **الزلازل** سيكون لها حجم **موجة** سطحية أكبر من الانفجارات. وبالتالي، فإن العملية لديها إمكانية وصف **زلازل** معينة بأنها **زلازل** وانفجارات محددة على أنها **انفجارات**. لاستخدام طريقة التعريف هذه، يلزم وجود قيم **mb** و **Ms** للحدث.

طريقة Ms: mb أكثر **موثوقية** لتمييزها على نسبة **حجم** موجة الجسم مع **حجم** الموجة السطحية. تنتج **الموجات** السطحية الأقل اتساعاً من الانفجارات **النووية** مقارنة بتلك الناتجة عن **الزلازل**. وهكذا، فإن **علاقة** MB مقابل MS للأحداث **لمنطقة** ما توفر بوضوح التمييز بينهما.





يتم تعريف حجم موجة الجسم على أنه

$$M_b = \log (A/T) + Q$$

حيث، A هو نصف اتساع الحوض إلى الذروة، مخفضاً إلى حركة الأرض بالميكرونيات للموجة على مخطط الزلازل للمكون الرأسي ذي الفترة القصيرة المقاس في غضون 5 ثوانٍ من البداية؛ Q (عامل الجودة) متاح في شكل جدول.

يتم إعطاء حجم الموجة السطحية بواسطة

$$M_s = \log (A_u/T) + 1.66 \log \Delta + 3.3$$

حيث Au هي أقصى سعة من الذروة إلى القاع بالميكرونيات لموجات رايلي من فترة 18-22 ثانية (T). هنا Δ هي المسافة المركزية. تم استخدام أجهزة قياس الزلازل في وقت سابق لفترة طويلة، لكن في الوقت الحاضر، تعد أجهزة قياس الزلازل ذات النطاق العريض أسهل في استخراج الإشارات المرغوبة باستخدام المرشحات المناسبة.

كما تم استخدام أطيايف اتساع الموجات السطحية لغرض التمييز. يختلف المحتوى الطيفي من موجات رايلي من الانفجارات النووية بشكل ملحوظ عن الزلازل.

غالباً ما يتم تسجيل موجات Lg بوضوح من التفجيرات النووية. يتم ملاحظة هذه الموجات على مسافات إقليمية أكبر وتسببها تراكم صدى موجات S متعددة وتحويل SV إلى P و / أو P إلى SV داخل القشرة بأكملها. تنتقل الطاقة القصوى بسرعة مجموعة تقارب 3.5 كم / ثانية لموجات Lg.



آثار الانفجارات النووية

يتم إطلاق الطاقة من جهاز نووي في البداية في عدة أشكال من الإشعاع. عندما يتم تفجير انفجار نووي تحت الأرض، على سبيل المثال في الطمي أو الصحراء، يتم إطلاق طاقة الانفجار في أجزاء من الثانية أو الميكروثانية. يؤدي هذا إلى ارتفاع درجة الحرارة عدة ملايين درجة كلفن والضغط إلى عدة كيلو مترات. يتم تبخير الطمي وصهره ويتمدد التجويف الأولي حول الجهاز كروياً إلى نصف قطر اعتماداً على محصوله ومحتوى الماء وما إلى ذلك. تساهم الطاقة الحركية الناتجة عن هذا التمدد في تكوين موجة صدمة في جميع الاتجاهات وتولد موجات زلزالية تسمى P، S والموجات السطحية. تسبب الإشعاعات الحرارية عموماً أضراراً لا رجعة فيها للبشر بينما قد تؤدي الرياح العاصفة إلى إتلاف المباني والهياكل الأخرى.

تشير **حصيلة التفجيرات النووية** إلى قوتها **الدميرية**. لذلك، فإنه يعطي فكرة عن كمية الطاقة **المنبعثة عند تفجير** ذلك الجهاز **النووي**. عادة ما يتم التعبير عنه على أنه مادة **تي إن تي** مما يعني أن الكتلة المكافئة لثلاثي نيترو تولوين ستنتج نفس **الطاقة** إذا انفجرت. يتم التعبير عنه **بالآلاف الأطنان** من TNT (kt) أو **ملايين الأطنان** من TNT (Mt). بعبارة **بسيطة**، يتم تناول **كيلو طن واحد** من مادة **تي إن تي** على أنه 10^{12} **سعة حرارية** أو 4.2×10^{19} **إرج**. يتم تحويل أقل من 1% من طاقة التفجيرات **النووية** تحت الأرض إلى طاقة **زلزالية**. يتم حساب العائد بشكل عام من حجم موجة الجسم بالعلاقة

$$M_b = A + B \log Y$$





هنا Y هو العائد الذي يتراوح ما بين 4 و 1300 كيلو طن من مادة تي إن تي، A و B هي ثوابت تعتمد على الظروف الجيولوجية ومدى اقتران أو فصل طاقة الانفجار إلى موجات زلزالية.

يعتمد مدى تحويل المحصول إلى طاقة زلزالية على حالة الموقع وعمق حفرة التجويف. لقد وجد أن الانفجارات في الجرانيت أو الدولوميت أو العشب الرطب عادةً ما تنتج حوالي 2% من الطاقة المنبعثة بشكل متفجر. ينتج عن انفجار مماثل في الصخور المسامية أو العشب الجاف أو الطمي مصادر زلزالية بدرجة واحدة أضعف من تلك الموجودة في الصخور.



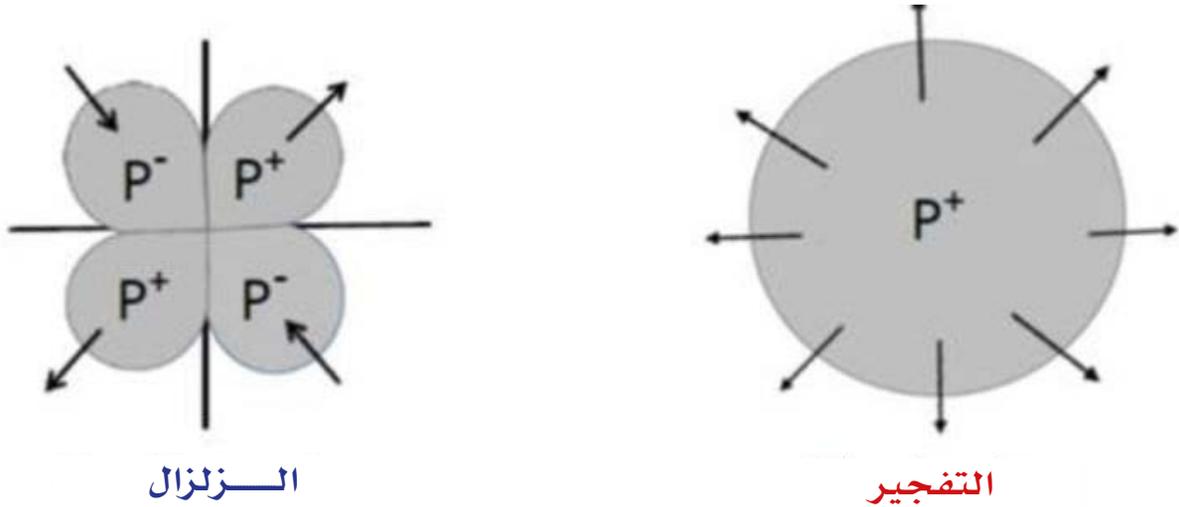
تطبيقات الانفجارات النووية في علم الزلازل

أولاً: بالنسبة لأوقات ومواقع المنشأ المعروفة للانفجارات النووية، فإن وقت وصول الموجات P و S في محطة (محطات) وانقلابها يوفر بنية أكثر دقة للقشرة والوشاح في المنطقة. وذلك لأن وقت منشأ الزلزال ومركزه محددان تقريباً. يمكن استخدام نموذج السرعة من الانفجارات لتحسين مواقع الزلازل التي تحدث في المنطقة. يمكن اعتبار الطريقة مكتملة لتلك القائمة على الانفجارات الكيميائية التي كانت مفيدة للغاية.

ثانياً: نظراً لأن مصدر الانفجار النووي متماثل، فإن الموجات السطحية المنبعثة من المصدر تكون خالية نسبياً من الاضطرابات الأخرى. إنها ليست مفيدة فقط لتحديد حجم الموجة السطحية لتمييزها عن الزلازل، لكن أيضاً لتحديد نماذج السرعة للمناطق. وبالتالي فإن المنهجية توفر تفاصيل إضافية للنماذج مقارنة بتلك الموجودة في الموجتين P و S. يمكن أيضاً استخدام الموجات السطحية لدراسة ظاهرة الامتصاص والتشتت والانعراج، التي يمكن التحقق من صحتها من تلك المستخلصة من الزلازل.

ثالثاً: إذا كانت هناك بعض المناطق التي لا تحدث فيها الزلازل بشكل عام، فيمكن استخدام البيانات من الانفجارات النووية على وجه التحديد لدراسات القشرة الإقليمية ودراسات الوشاح العلوي.





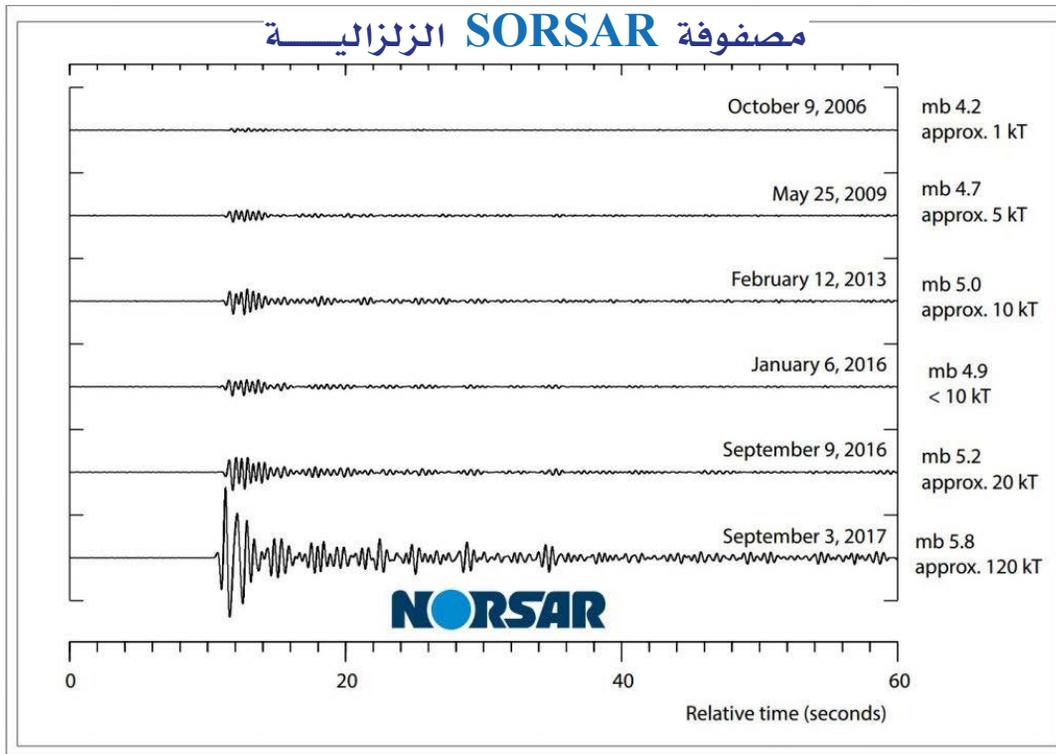
مقارنة نمط الإشعاع المعقد من مصدر زلازل (الجانب الأيسر) وشبه الخواص نمط الإشعاع لمصدر الانفجار (الجانب الأيمن)

في حالة حدوث انفجار، يتم إطلاق معظم الطاقة **الزلزالية** للخارج مع توسع المادة **المتفجرة** بسرعة. هذا يعني أن أكبر إشارة في مخطط **الزلازل** تأتي على شكل موجات P. لذلك، يكون للانفجارات شكل مميز في البيانات الزلزالية عند مقارنتها بالزلازل، حيث نتوقع أن يكون للموجات S والموجات السطحية سعة أكبر.

لذلك يمكن لعلماء **الزلازل** إجراء قياسات للبيانات الزلزالية لتحديد ما إذا كان هناك انفجار. يمكن أيضاً الكشف عن مؤشر إضافي على حدوث تجربة نووية من خلال قياس عمق مصدر الأمواج، حيث لن يكون من الممكن وضع جهاز نووي على عمق يزيد على حوالي 10 كيلو مترات تحت السطح.



ومع ذلك، في حين أن البيانات **الزلزالية** يمكن أن تخبرنا بحدوث انفجار، فلا يوجد **شيء** يمكنه تحديد هذا **الانفجار** بشكل مباشر على أنه **نووي**. وبدلاً من ذلك، يعتمد نظام **الرصد الدولي** على اكتشاف الغازات المشعة التي يمكن أن تتسرب من موقع الاختبار **للتأكيد** النهائي لنوع **القنبلة** التي تم استخدامها.



يوضح الشكل (في الأسفل) التسجيل الزلزالي لآخر اختبار في كوريا الشمالية تم إجراؤه في محطة **NORSAR** في **Hedmark**، **النرويج**. تظهر الآثار الخمسة العليا تسجيلات في نفس المحطة للاختبارات الخمسة السابقة، التي أجرتها كوريا الشمالية في 2006 و 2009 و 2013 و 2016 (انفجاران في 2016). اختبار 2017، كما يتضح من هذا الرقم، هو **الأقوى** بوضوح حتى الآن.





عندما أجرت **كوريا الشمالية** تجربة **نووية** في عام 2013، تم اكتشاف **الزينون** المشع بعد **55 يوماً**، لكن هذا ليس ممكناً دائماً. يعتمد أي **اكتشاف** لمثل هذه الغازات على حدوث تسرب أم لا في المقام الأول، وكيفية انتقال الغازات في الغلاف الجوي.

بالإضافة إلى ذلك، لا يمكن للبيانات الزلزالية أن تشير إلى حجم الجهاز النووي أو ما إذا كان يمكن ربطه بصاروخ باليستي، ما يمكن أن يعطينا علم الزلازل هو فكرة عن حجم الانفجار من خلال قياس الحجم الزلزالي. هذا ليس واضحاً، ويعتمد على معرفة بالضبط عمق دفن القنبلة وطبيعة الصخرة الموجودة فوق موقع الاختبار. ومع ذلك، بمقارنة حجم هذا الاختبار الأخير مع حجم الاختبارات الخمسة السابقة التي أجريت في كوريا الشمالية، يمكننا أن نرى أن هذا انفجار أكبر بكثير.

قدّر **مرصد الزلازل النرويجي** NORSAR **انفجاراً** يعادل **120 كيلو طنناً** من مادة **تي إن تي**، أي **ست مرات** أكبر من **القنبلة الذرية** التي أسقطت على **ناغازاكي** في عام 1945، **ويتوافق** مع نطاق العائد المتوقع **لقنبلة هيدروجينية**.





تفسير الزلازل عبر التاريخ

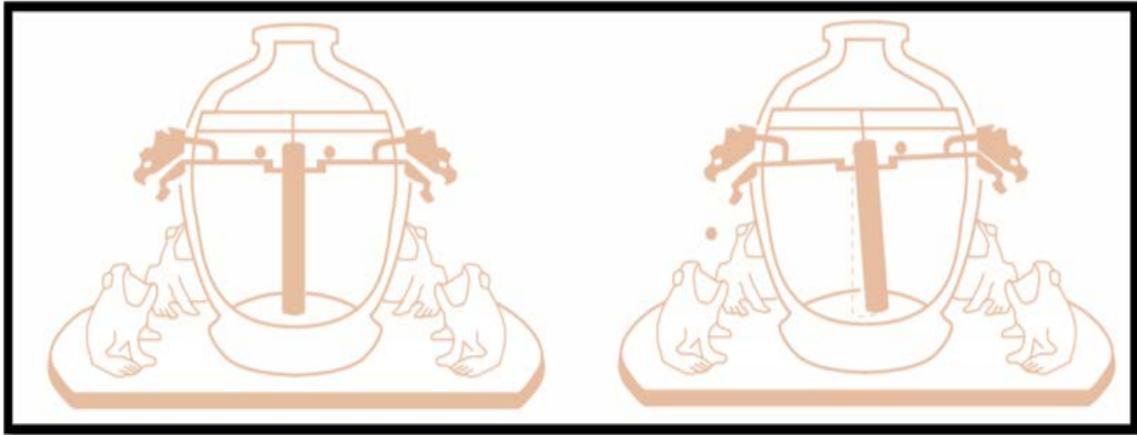
لقد فسّرت الشعوب القديمة ظاهرة الزلازل بأشكال مختلفة، فبعضهم ينسبون حدوثها إلى أمور عجيبة وغريبة، مرتبطة في معظم الأحيان، بالأوهام والخرافات والأساطير السائدة في المجتمع، كالغول والأشباح والقوى غير المرئية التي تجعل الإنسان عاجزاً عن مقاومتها وتصورها، وبالتالي لا يقوى إلا للخضوع لها. وهو ما نجده عند بعض الشعوب التي قالت بأن الأرض يحملها ثور كبير على أحد قرنيه وعندما يتعب ينقل الأرض إلى القرن الآخر وهكذا تتحرك الأرض وتحدث الزلازل (مطر، 1999م)، أو أن هناك ضفدعاً كبيراً يحركها (في منغوليا)، أو السلحفاة (عند الهنود الأمريكيون) (Howell Jr، 1990).





الصينيون

يدعى الجهاز الذي يسجل مدة الزلزال وشدته واتجاهه (المرجفة) أو (مرسمة الزلازل) Seismograph. ويعتقد أن الصينيين كانوا أول من اخترع (المرجفة) وذلك في النصف الأول من القرن الثاني للميلاد، أما (المرجفة) الحديثة فقد اخترعها الجيولوجي البريطاني جون ملن J. Milne عام 1880م. ويمثل صنع المرجفة من قِبَل الصينيين دليلاً مهماً على بداية عقلنتهم للظواهر الطبيعية ورمي كل التفاسير الخرافية المتعلقة بالزلازل وراء ظهورهم.





(الصورة في الأعلى) شكل تخطيطي يبين البنية الداخلية لجهاز هينغ لقياس الزلازل المصنوع من البرونز (الصورة اليمنى في الأسفل). ونلاحظ توضع الرقاص في الوسط ككتلة كبيرة ترتبط بثمانية أذرع. يتحرك الرقاص إلى اليمين أو اليسار عند حدوث الهزة فيترك أحد التنانين الكرة من فمه ليتلقفها أحد الضفادع بضمه المفتوح دوماً وبذلك يتحدد اتجاه الاهتزاز، (الصورة اليسرى في الأسفل) هينغ أمام مقياسه بشكله الكامل حيث استقى تصميمه من الثقافة الصينية. (Volcanoes and earthquakes، Britannica Illustrated Science Library، p.79. & en.wikipedia.org)





اليابانيون

اليابانيون كانوا يعتقدون أنّ سمكة قط ضخمة جداً واسمها (نامازي) تتحرك تحت الأرض فتؤدي إلى اهتزازها، وبالتالي تسبب حدوث الزلزال، كما كانوا يعتقدون بوجود إله اسمه (ديميوجين) وهو مسلح بمطرقة حجرية كبيرة وقوية، يقوم هذا الإله بحراسة (نامازي) ويمنعها من الحركة، وبالتالي فهو يمنع حدوث الزلازل، ولكن إذا غفل أو سها (ديميوجين) فإن (نامازي) تتحرك وعندها يحدث الزلزال (مطر، 1999م).



طباعة يابانية على كتل خشبية تظهر سمكة قط ضخمة هي التي تُسبب الزلازل
(Kozák, Čermák, 2010)





اليونانيون

حاول **اليونانيون** الوصول **للتفسير المنطقي** والعقلاني لظاهرة **الزلازل**، وسبب الأصوات الناجمة عنها، وقد كانوا يراقبون الزلازل حول البحر الأبيض المتوسط، وحاولوا أن يحددوا أماكن انتشار هذه الزلازل واقترحوا تفسيرات فيزيائية وميكانيكية لهذه الظاهرة، وقالوا إنَّ الزلازل في الغالب تحدث على طول الشواطئ كما في الداخل.

برمانيدس (القرن 6 ق.م)

ربما كان **برمانيدس الإيلي** Parmenides of Elea (نحو 540 ق.م) وديموقريطس من أوائل الذي ناقشوا موضوع حدوث **الزلازل** حيث إنَّ (برمانيدس وديموقريطس **يريان** أن الأرض لما كان **بُعدها** (للأرض) من الجهات كلها مستويًا ولم تكن لها علة تدعوها إلى أن تميل إلى جهة من الجهات، لذلك صارت تتموج فقط، ولا تتحرك. ومنهم من قال إن الأرض تتحرك على الماء كما يتحرك على **الألواح والخشب في الأنهار**). (فلوطرخس، 1980م)

وهما كما نلاحظ **يقرآن** بنظرية الأرض **المسطحة** وليس **الكروية**، لذلك فإنها **تتموج** عندما يحدث الزلزال كما يتموج لوح الخشب الطايف على سطح النهر الجاري.





الرواقيون (القرن 5 ق.م)

أما «الرواقيون» فإنهم يرون أنّ الزلزلة تكون إذا استحالَت الرطوبة التي في الأرض إلى الهواء وطلبت الخروج» (فلوطرخس، 1980م). وهو على ما يبدو بداية البحث عن تفسير أكثر منطقية، اعتماداً على نظرية الأبخرة.

أناكسمانس (القرن 5 ق.م)

يعرض لنا المفيدروس في المقالة التي يشرح فيها كتاب أرسطو (في الآثار العلوية) وتناول الحديث عن الأصوات الأرضية، أو الناجمة عن الهزات الأرضية والزلازل. وبحسب «رأي أناكسمانس: وهو القائل إنّ رؤوس الجبال إذا تساقطت من على الأرض حدثت لها زلزلة عظيمة...» (بدوي، 1971م). ويبدو أن لأنكسمانس رأي آخر يورده لنا فلوطرخوس بقوله إنّ: «أنكسمانس يرى أنّ علة الزلازل هي سير الأرض وتخلخلها، وأحد هذين المعنيين يتولد عن التيبس، والمعنى الآخر يتولد عن الأمطار» (فلوطرخس، 1980م). وهو يبتعد كما نلاحظ في تفسيره عن نظرية الأبخرة التي طرحها الرواقيون، ويقدم فكرة حركة الأرض وانخفاض كثافتها إما بسبب جفاف عناصرها، إما بسبب رطوبة مياه الأمطار.

أنكساغورس (القرن 5 ق.م)

أما رأي أنكساغورس تلميذ أناكسمانس فهو أنّ «الهواء يحمل الأرض بالطبع بسبب عرضها، بمنزلة حمل الماء للورق وصفائح الذهب، وزعم أنّ الجزء الداخل





من الأرض سخيف متخلخل، والجزء الخارج متكاثف متلبّد، ولهذه العلة إذا دخل الهواء إلى المواضع السخيفة المتخلخلة منها ولم يمكنه الخروج بسبب التكاثف والتلبّد العارضين لظاهر الأرض من الأمطار التي تسقط عليها، حرك الأرض وزلزلها إذا تحرك طلباً للخروج...» (بدوي، 1971م).

يؤكد **فلوطرخوس** رأي **أنكساغورس** لكن مع تحديده أنّ الصوت المرافق للزلزلة ناتجٌ عن الضغط الكبير للهواء المحتبس: «الزلازل تكون إذا غار الهواء ولم يقدر (أن) ينفذ من بسيط الأرض لكثافته وتلبده، فيتراجع ويتلاقى، فيحدث عن ذلك فيه مثل الرعد» (فلوطرخس، 1980م).

ديموقريطس (القرن 4 ق.م)

عبّر **ديموقريطس** عن رأيه في تشكل الزلازل بقوله: «إنّ في الأرض غابات مملوءة؛ ولهذه العلة إذا دخل الغابات من العيون في أوقات الأمطار مياه أخرى كثيرة بأكثر مما ينبغي كرت تلك المياه وتضاغطت تضاغطاً يزلزل الأرض... وأما في أوقات عدم المطر فتحدث الزلازل لأن الأرض إذا جفت جذبت إليها الرطوبة بالتشوق الغريزي الذي فيها، كذلك فإذا سقط ما تجتذبه من القنابات التي فيها حركتها لقربها منها وأحدثت الزلازل». (بدوي، 1971م). وكما نلاحظ أنّه رأي متفق مع رأي **بارمنيدس** لكن **فلوطرخوس** يورد أنه يتفق مع رأي **تاليس** أيضاً: «تاليس وديموقريطس فإنهما يريان وينسبان علة الزلازل إلى الماء» (فلوطرخس، 1980م).





أفلاطون (القرن 4 ق.م)

يرى أنّ « كل حركة لها ستة أبعاد: فوق، تحت، يمين، شمال، قُدّام، خلف. وغير ممكن أن تتحرك الأرض في بُعد من هذه الأبعاد إذا كان وضعها **يوجب** أنّ ليس لها أن **تميل** وتخص بالميل جهة من الجهات، إلا أنّ مواضع منها تتحرك بسبب **التخلخل** (فلوطرخس، 1980م). فهو ينسب **الزلزلة** إلى حدوث **خلل** في حركة الأرض في **إحدى الجهات**.

أرسطو (القرن 4 ق.م)

أكثر **النصوص اليونانية** التي وصلتنا فلسفةً لظاهرة الزلازل تلك التي عثرنا عليها عند **أرسطو**، وهو لا شك متأثرٌ بنظرية البخارات المتولدة داخل الأرض، لكنه يعتقد أنّ توجه البخار المضغوط نحو **أعماق** الأرض هو الذي يحدث **الزلازل** وليس الخارج نحو الأعلى: «إنّ الأرض قائمة بذاتها **يابسة**، فإذا ترطبت من **الأمطار** ينبع منها ما يحدث بخاراً كثيراً، ويشبه هذا **البخار** في ميله إلى الناحية التي يميل إليها، **بخار** السراج الذي يطفأ وهنا فإنه كما أنّ ذلك البخار إلى جانب يميل منذ أول الأمر يصير **جميعه**، كذلك أيضاً هذا البخار. والأعراض التي يحدثها تكون بحسب **ميلانه**، لأنّه إن مال إلى فوق حدثت منه الأعراض التي تكون على **وجه الأرض**؛ وإن كان **ميلانه** إلى عمق الأرض فإنه إذا اجتمع هناك تضاعف حدثت عنه **الزلازل**» (بدوي، 1971م).

وقد ذكر **فلوطرخوس** أنّ **أرسطو** قال إنّ سبب ذلك هو «**لشمول** البرودة على الأرض من كل الجهات من فوق ومن أسفل، وعند ذلك **يبادر الحار** إلى





فوق الأرض إذا كان خفيفاً، ولذلك إذا تكاثف البخار اليابس **تلجلج** وتتجى (أي التمس البخار اليابس الخلاص والنجاة والفرار) فتحدث عنه الزلزلة في الأرض» (فلو طرخس، 1980م).

وقد كان يعتقد بحدوث **الزلازل** في الليل أكثر منه في النهار بسبب احتباس البخار في باطن الأرض أكثر: «إنَّ الأوقات الجزئية التي تعرض فيها **زلزلة** الأرض هي التي تعدم فيها **الريح** خاصة، وذلك أنَّ **الزلازل** بالليل أكثر منها بالنهار، وبالغدوات في أنصاف النهار أكثر منها في سائر الأوقات؛ والسبب في ذلك أن **بخار** الأرض الذي في ظاهرها **يفسد** بالليل ويحبس **الريح** في باطنها. وأما بالغدوات فإن الشمس تحل البخار وتحركه ولا تقدر على أن **تفشه**» (بدوي، 1971م).

وتحدث الزلازل حسب **أرسطو** «في أكثر الأمر إذا انكشف الغيم، وذلك أنَّ الهواء إذا عدم ضوء **القمر** برد، وكثفت **تجاويف** الأرض وحصر في باطنها **البخار الدخاني**» (بدوي، 1971م).

«إنَّ **الزلزلة** تكون في الموضع الذي هي متخلخلة رابية ومياه البحر تجري على ظاهرها ووسطها فتتكاثف، وذلك أنَّ الأرض إذا كانت بهذه الحال فيسبب تخلخلها تجتمع فيها **الريح** وتجرفها بكثرتها وسرعتها، وبسبب غلبة التراب عليها تجد **الريح** موضعاً واسعاً عظيماً يمكنها أن تجتمع فيه، وبسبب المياه الجارية على ظهرها تحتفر **البحار** في عمق الأرض **وتزلزلها**؛ وذلك أن هذه المياه **غليظة** جارية. ولهذه العلة لا يمكن **البخار** - بسبب غلظتها وثقلها - إلا أن يخرقها ويصعد، ولأنها مياه جارية تعدم جريتها انحرافها، وبسبب **كثافة** سطح الأرض لا يمكن **البخار الدخاني** أن يخرج. فلجميع هذه الأسباب أحدث **الزلزلة**» (بدوي، 1971م).





أما عن ارتباط الزلازل بالفصول فإن «الزلزلة من الأزمان كلها تكون في الخريف والربيع أكثر منها في الصيف والشتاء؛ والسبب في ذلك أن الشتاء -لشدة برده- يجمد البخار، والصيف يحله ويفشّه» (بدوي، 1971م).

ثم يبين لنا **أرسطو** الأسباب الكامنة وراء حدوث الأصوات المرافقة للزلازل: فهي إما أن تتزامن مع الزلزلة بأشكالٍ مختلفة، إما أن تسبق الزلزلة:

- **في السبب الذي له يختلف الصوت المسموع من الزلزلة:** حدوث الأصوات التي تكون مع زلزلة الأرض السبب فيها نفوذ الريح في التجويفات التي تنفذ فيها. وأما اختلافها، حتى تسمع مرة بمنزلة البروق، وبمنزلة عجيج البقرة، ومرة بحالٍ أخرى، من الأشياء أو قرعه شيءٌ سمع له صوتٌ، إلا أنه متى قرع سمع له، إذا كان قرعه بسوط خلاف الصوت الذي يسمع له إذا كان قارعه الريح، أي الأنبوب.

في السبب الذي له يتقدم الصوت الزلزلة: زلزلة الأرض والصوت المسموع معها حدوثهما جميعاً معاً، إلا أننا نحن نحسُّ أولاً بالصوت، لأنَّ حاسته ألطف من حاسة المجسَّة، من ذلك أن البرق والرعد أيضاً حدوثهما معاً وإحساسنا بالبرق أولاً، لأنَّ **حاسة البصر ألطف من حاسة السمع.**

وأما إحساسنا بالزلزلة بعد الصوت فلأن حاسة الحسِّ، وهي التي يخصها هذا الإحساس، أغلظ وذلك أنه إن كانت **الزلزلة قد تحس** بالبصر، فإن كل واحد من **الحواس** إحساسه بالمحسوسات التي تخصه أسرع وأسهل، وأما المحسوسات التي تعمّه وسائر الحيوان فإنَّ إحساسه إياها يكون أبطأً" (بدوي، 1971م).



ثم يناقش **أرسطو** الأسباب التي تجعل مدة الزلزال طويلة أو قصيرة، اعتماداً على نظرية الأبخرة:

«كثرة زلزلة الأرض وقلتها يكون إما بسبب مقدار **الرياح** الفاعلة لها، وإما بسبب التجويفات التي **تتقدمها**، وذلك أنّ الرياح **الفاعلة للزلزلة** إذا كانت يسيرة حدث ذلك في أكثر الأمر، وتكون الزلزلة قليلة **المدة سريعة**. وإن كانت كثيرة وجب فيها أن تلبث، وحدث ذلك في الفرط، وتكون **الزلزلة متصلة** دائمة مدة طويلة، وكذلك أيضاً **تجويفات الأرض** التي تنفذ فيها، فإنها إن كانت مستقيمة كان لبثُ الزلزلة مدة يسيرة؛ وإن كانت معوجة كان لبثها زماناً طويلاً» (بدوي، 1971م).

ولا يعتقد **أرسطو** على ما يبدو أنّ السبب المباشر لحدوث فوران الينابيع هو الزلزال ذاته وإنما **الرياح المحتبسة** داخل الأرض: «المياه التي تتبع مع زلزلة الأرض لا يمكن فيها أن تكون بسبب **الزلزلة**، لأنّ من شأن الماء بالطبع أن **يرسب** إلى أسفل، والأرض إذا **تزلزلت** تشال إلى فوق، وأما **تصاعد** المياه في وقت **الزلزلة** إلى فوق فتكون إذا **دفعتها** الرياح قسراً؛ ولذلك لا يمكن فيها أن تكون بسبب **الزلزلة**. وأما أن تتحرك قسراً وأن تندفع إلى فوق فيمكن ذلك فيها» (بدوي، 1971م). ويوجد حسب رأيه **ثلاثة أنواع للزلازل**:

- **عرضي**: وتسمى «المرتعشية»، وهي كثيرة الحدوث.
- **عميقة**: وتسمى «الإنثاخية»، وهي التي تتجاوز الحدود.
- **عرضية - عميقة**: وتسمى سلمية، وهي مزيج من النوعين السابقين.





((بعض زلازل الأرض يكون عرضاً، و(بعضها) يكون في العمق، وبعضها في العرض والعمق جميعاً. والتي تكون منها في العرض تسمى **الإختلافية والمرتعشية**، وتحدث كثيراً. وأما التي تكون في العمق فتسمى باسم مشتق من اسم **القرعة** والانتفاخ؛ وحدثها يكون في الفرط، إلا أنها إذا حدثت ارتفع مع **الريح** التي تخرج - حجارة. وأما التي تكون في **العرض** (والعمق معاً) فتسمى باسم **مشتق** من اسم **السلم**، بسبب **انتصابه**، ولأن حركتها عليه تكون في **العمق**. ولا **انتصابه** ليس هو **استقامة**، لكنه منحني قليلاً، والحركة تكون عليه في العرض)) (بدوي، 1971م).

مترودرس (القرن 3 ق.م)

«**كان يقول**: كيف يمكن أن يتحرك جسم في مكانه إن لم **يدفعه دافع** ويجذبه جاذب؟ ولذلك يرى أن الأرض لما كان ليس لها في طبيعتها أن تتحرك لكن تثبت في مكانها، فإنها لا تتحرك لكن مواضع منها توهم ذلك» (فلوطرخس، 1980م). فهو لم يقتنع **بفكرة** إمكانية حركة الأرض أو تحريكها، **اللهم** إلا **ببعض** أجزائها.

أبيقور (القرن 3 ق.م)

يشرح لنا **أبيقور** الكيفية التي يدخل فيها **الهواء** إلى باطن الأرض وينحبس حيث «يمكن أن **يصفقها** (أي يضربها للأرض ضرباً يسمع له صوت) هواءً **غليظاً** وما تحت الهواء؛ **فبذلك** الصفق والصدم يمكن أن تتحرك، وقد يمكن أن **تتحرك** بما في **أجزائها** السفلية من الطبيعة السياسية (المحكمة) **فيكون** ذلك بالهواء **المحبس**





(المنتشر المنحصر في داخلها) فيها، ولا سيَّما في المواضع المقعرة التي تقوم مقام الكهوف والمغاور) (فلوطرخس، 1980م). أي أنه يعتقد أن الهواء الكثيف يضربها للأرض ضرباً يسمع له **صوت**، ويسبب ذلك حركة أجزائها **السفلية** مع أنها **محكمة** الترابط والتماسك فيما بينها، وهكذا ينحصر الهواء في داخلها **خصوصاً** في المغاور والكهوف.

سترابون الأماصي (القرن 1 ق.م)

لم يكن **سترابون الأماصي** (القرن 1 ق.م) Strabon عالماً طبيعياً، حيث إن **جغرافيته** تصف كثيراً من **الحقائق** الطبيعية المهمة التي يتناولها **بروح** ناقدة. مثال ذلك: **تفسيره** لتكوين الجبال بفعل حركات الضغط الداخلية، وأن وادي تمبي في إقليم **تساليا ببلاد اليونان** نتج عن **زلزال**، وقد أرجع **سترابون** ظهور **جزر البحر** الأبيض المتوسط إلى انفصال عن جسم الأرض بوساطة **الزلازل** أو بفعل **البراكين**، وقصد بذلك جزر الليباري، شمال شرق صقلية (**سارتون**، 1976م).





العرب والمسلمون

أخذ العرب والمسلمون بالنظرية اليونانية التي تعدّ الأبخرة والرياح **المسبب** الرئيس لحدوث **الزلازل** والأصوات المرافقة لها، ولم نلاحظ أنهم قد أضافوا أو غيروا فيها الكثير. من الذين **درسوا** وبحثوا في هذا الموضوع من **العلماء العرب والمسلمين**: جابر بن حيان وحنين بن اسحق والكرخي وابن سينا وابن ملكا البغدادي وابن رشد والقزويني وشيخ الربوة.

وقد أحصى **الباحث عبد الله الغنيم** بين سنتي (20هـ / 640م) و (1000هـ / 1591م) وقوع **255 زلزال ببلاد المسلمين** وسجله **المؤرخون العرب**. (الغنيم، 1984م).

ولعل أحد أشهر **الزلازل** التي ضربت **البلاد الإسلامية** هو زلزال **إسطنبول** الذي وقع في 10 مايو/ أيار 1556م. قُتد أصيب السكان **بالذعر** وهربوا بعيداً وحاولوا الفرار والخروج من **ميناء المدينة**. كما هو **مذكور** في النص، فقد سبق **الكارثة** ظهور **مذنب** في 5 مارس/ آذار، والذي استمر في الظهور لمدة 12 يوماً متتالياً. من وجهة نظر **الأوروبيين** في **العصور الوسطى**، كان ظهور **مذنب** نذيراً **لكارثة** قادمة محتملة مثل الحرب أو **الفضوى** أو الكوارث الطبيعية. ومع ذلك، فإن **زلزال 1556م** (Io = VIII) لم يكن أقوى حدث **زلزالي** ضرب **القسطنطينية** في تاريخها. قبل نحو 50 عاماً، تأثرت المدينة بكارثة أخرى أسوأ. في 10 أكتوبر/ تشرين الثاني 1509م، وقع **زلزال** قوي تلاه **العديد** من الهزات الارتدادية، ودمر 109 مساجد **بالكامل**، وأكثر من 1000 منزل، وجزءاً كبيراً من تحصينات المدينة؛ توفي نحو 13000 شخص. كما تعرضت **المستوطنات** المجاورة لخسائر كبيرة نتجت جزئياً عن موجات **تسونامي** التي سببها **الزلزال**. جرى **الشعور**





بأثار الزلزال في اليونان ورومانيا ودلتا النيل (Ambraseys 2001). الزلازل القوية في تركيا ليست نادرة. يمر نظام الصدع الرئيس لتحول صدع الأناضول عبر شمال تركيا ويعبر بحر مرمرة، حيث تبلغ الأنشطة الزلزالية ذروتها. إن البنية التكتونية للمنطقة، التي تخلق رابطاً يربط بين أحزمة جبال الألب وجبال الهيمالايا معقدة؛ إذ تنقسم المنطقة الحدودية للصفحة الأوروبية إلى عدة ألواح ميكروية تتحرك بشكل فردي. يمكن لعلماء الجيولوجيا تقييم الموقع المحتمل والحجم التقريبي للزلازل المستقبلية، لكنهم لا يستطيعون التنبؤ بالوقت الدقيق الذي قد يحدث فيه ذلك؛ التنبؤات لها طابع إحصائي فقط. جرى تقييم أن إسطنبول ستعرض لتهديد زلزالي قوي مماثل في غضون الثلاثين سنة القادمة مع احتمال قدره 60%. (Kozák, Čermák, 2010)





رسم توضيحي لتقرير عن صحيفة ألمانية معاصرة عن الزلزال الذي وقع في إسطنبول في 10 مايو/ أيار 1556. أي بعد 103 سنوات من فتحها على يد المسلمين. تُظهر الصورة مسجد آيا صوفيا الذي تعرض لأضرار بالغة، وهو مسجد مشهور في المدينة. انهارت أعمدة أركانه الثلاثة الرفيعة، وتحولت المباني الأخرى والقصور والكنائس وجزء كبير من أسوار المدينة وبواباتها إلى أطلال، لكن سرعان ما أعيد ترميمها وإصلاحها (Kozák, Čermák, 2010)



جابر بن حيان (القرن 3هـ / 9م)

يرى **جابر بن حيان** (توفي 200هـ / 815م) أن «الزلازل إنما تحدث من **استبطن** رياح في **بطون** الأرض إما لكونها من باطن الأرض وانحصارها وقلة وجود المنافذ لخروجها، فإذا ترادفت وكثرت **طلبت** المخرج فزحم بعضها بعضاً **فانزعج** لها ذلك المكان، وبكثرة حركتها وبكثرة مآدتها وتواصلها تكون زيادتها وعظم حركتها ودوامها... وربما كانت من خارج، واختفاؤها و**امتناع رجوعها** لكثرة **ترادفها** في المدخل فيكون ذلك عنها، وهو قليل جداً» (**جابر بن حيان**، 1935م).

حنين بن إسحق (القرن 3هـ / 9م)

يعرض لنا **حنين بن إسحق** (توفي 260هـ / 873م) في كتابه (**جوامع حنين بن اسحاق في الآثار العلوية لأرسطو**) بعض **المعلومات** التي استقاها من مصنفات سابقه، **حرفياً** أحياناً و**بتصرف** أحياناً أخرى، وقد رتبها **ككتاب** منطقي التسلسل، **حسن** العبارة جزيل الفائدة، لكنها **تعبر** في النهاية عن **خلاصة** أفكار **أرسطو** ليس أكثر: «وأكثر ما يكون **الزلزلة** في أيام **الربيع والخريف**، في الأوقات الكثيرة **الأمطار المفرطة** وفي الأوقات **اليابسة**؛ لأن هبوب **الرياح** في هذه الأوقات أكثر، فهي في **الزمان اليابس** أكثر منها في **الزمان الرطب**؛ لأن **البخار اليابس** الذي هو مادة **الرياح اليابس** أكثر منها في **الزمان الرطب**، لأن **البخار اليابس** الذي هو مادة **الرياح اليابس** أكثر. فأمّا في **الصيف والشتاء** فقل ما يكون **الزلزلة** لقلّة **هيج الرياح** فيها، فأما **الزلزلة** التي في **زمان الرطوبة**، فإن ذلك





لأن الرطوبات توثق ثقوب الأرض وشقوقها، فتحتصر البخارات هناك فتضرب، وربما تتصدع الأرض من الزلزلة، فيخرج منها ريح لها صوتٌ شديدٌ يسمعه الناس، وربما سُمِعَ للريح وجوف الأرض بعد، وذلك لشدة اضطرابها...». (ابن إسحق، 1976م).

إخوان الصفا (القرن 4هـ / 10م)

حاول إخوان الصفا في رسائلهم تفسير سبب الزلازل وفق نظرية الأبخرة المحتبسة فقالوا: (وأما الكهوف والمغارات والأهوية التي في جوف الأرض والجبال، إذا لم يكن لها منافذ تخرج منها المياه، بقيت تلك المياه هناك محبوسة زماناً، وإذا حمي باطن الأرض وجوف تلك الجبال، سخنت تلك المياه ولطفت وتحللت وصارت بخاراً، وارتفعت وطلبت مكاناً أوسع، فإن كانت الأرض كثيرة التخلخل، تحللت وخرجت تلك البخارات من تلك المنافذ، وإن كان ظاهر الأرض شديد التكاثف حصيفاً منعها من الخروج، وبقيت محتبسة تتموج في تلك الأهوية لطلب الخروج، وربما انشقت الأرض في موضع منها، وخرجت تلك الرياح مفاجأة، وانخسف مكانها، ويسمع لها دويٌّ وهدة وزلزلة. وإن لم تجد لها مخرجاً، بقيت هناك محتبسة، وتدوم تلك الزلزلة إلى أن يبرد جو تلك المغارات والأهوية، ويفلظ. ومتى تكاثفت تلك البخارات واجتمعت أجزاءها وصارت ماء، خرت راجعةً إلى قرار تلك الكهوف والمغارات والأهوية، ومكثت زماناً، وكلما طال وقوفها ازدادت صفاءً وغلظاً، حتى تصير زئبقاً رجراجاً، وتختلط بتربة تلك المعادن، وتتحد بحرارة المعدن دائماً في إنضاجها وطبخها، فتكون منها ضروب



من الجواهر **المعدنية** المختلفة الطبائع كما سنبيّن. وأما علّة اختلاف مياه العيون والينابيع التي في جوف الأرض وكهوف **الجبال**، من **العدوية** والملوحة والحموضة والعضوضة الكبريتية منها، والنّفطيّة، والدهنيّة، وعلّة **حارّتها** في الشتاء، و**بردها** في الصيف، وما كان على حالة واحدة في جميع الأوقات، فهي بحسب اختلاف **ترب** بقاعها، وتغييرات **أهويّة** مكانها والعوارض التي تعرض لها). (رسائل إخوان الصفاء وخلان الوفاء، ج 2، إخوان الصفاء).

الكرجي (القرن 5هـ / 11م)

ذكر **أبو بكر محمد بن الحسن الكرجي** (توفي نحو 410 هـ / 1020م) في كتابه (إنباط المياه الخفية) حدوث فوران **للعيون المائية** عند حدوث **الزلازل**: «عند الزلزلة تفور **عيون**، وتظهر **عيون** في بعض أوقاته، وتنتقل **عيون** من مكان إلى مكان؛ والسبب في ذلك أنه يكون في **بطن الأرض عروق تجري** فيها الماء إلى عيون ظاهرة **فوق الأرض** وما يكون حول العرق من **تربة الأرض** يكون صلباً، وإذا كانت الزلزلة التي سببها **خروج البخار** المجتمع في بطن الأرض، فإذا أصاب مجرى الماء خلل تربته فوجد الماء **منافذ** أحر أقرب إلى المركز **فخرج** في واحد منها وانقطع عن **المجرى** الأول وربما كان ماءً محتبساً في بطنها؛ فيخرق **البخار** محبسه ويجعل له طريقاً إلى وجه الأرض **فينبع** منه. أمّا في الأرض التي رخاوتها أو صلابتها على **صفة واحدة**، فإنه يقل **غور مياه** عيونها وقتئها وقد يزيد ماء القناة وينقص عند **الزلزلة**، كذلك أنّ في **بطن الأرض** ماءً جارياً ومتحيراً، كذلك يكون فيه هواء **ساكن** وهواء **مخترق**، ومتى كثف هذا الهواء خرق الأرض وخرج منها فذلك سبب الرجفة والزلزلة» (الكرخي، 1892م).





ابن سينا (القرن 5هـ / 11م)

تكلم **ابن سينا** (توفي 428هـ / 1036م) عن أسباب **حدوث الزلازل**، فأوضح أن **الزلزلة** هي «حركة تعرض لجزء من **أجزاء الأرض** بسبب ما تحته ولا محالة أن ذلك السبب يعرض له أن يتحرك ثم يحرك ما فوقه، والجسم الذي يمكن أن يتحرك **تحت الأرض** ويحرك الأرض، إما جسم **بخاري دخاني** قوي الاندفاع كالريح، وإما جسم **مائي سيال**، وإما **جسم هوائي**، وإما **جسم ناري**، وإما جسم أرضي. والجسم الناري لا يحدث **تحت الأرض**، وهو نار صرفة، بل يكون لا محالة في حكم **الدخان القوي**، وفي حكم **الريح المشتعلة**، والجسم الأرضي لا تعرض له الحركة أيضاً إلا لسبب مثل السبب الذي عرض لهذا الجسم الأرضي، فيكون **السبب الأول** الفاعل **للزلزلة ذلك**، فأما الجسم الريحي، نارياً كان أو غير **ناري**، فإنه يجب أن يكون هو **المنبعث** تحت الأرض، الموجب لتمويج الأرض في أكثر الأمر» (**ابن سينا، 1980م**).

ثم يبين لنا ابن سينا ما يرافق **الزلازل القوية** مثل «خسف الأرض باندفاعه وخروجه، وربما خلص **ناراً** محرقة، وربما حدثت أصوات هائلة ودوي يدل على شدة **الريح**، فإن وجدت هذه الريح المصونة منفذاً واسعاً بعد **المنفذ** الذي تصوت فيه، حدث عن **اندفاعها** صوت ولم **تزلزل**» (**ابن سينا، 1980م**). يعد بعض الباحثين أن ابن سينا أول من كشف أن **الزلازل** تفتح **عيون الماء** (**أبو خليل والآخرين، 2003م**). وهي أولوية غير دقيقة **فالمفيدوروس اليوناني وأرسطو والكرخي** قد تناولوا هذا الموضوع قبله، كما وجدنا ذلك سابقاً.





ابن ملكا البغدادي (القرن 6هـ / 12م)

يعرّف لنا **ابن ملكا البغدادي** (توفي 560هـ / 1165م) **الزلزلة** بأنها «اختلاج الأرض عن حركة هواء محتبس في غور عظيم من **أغوارها**. إما لسخونة عرضت له إما لقوّة ريحية حركته. وإذا كانت الأرض **مستحصفة** الظاهر صخرية كالجبال أو ما **يقاربها** كثرت وقويت حركة الهواء فيما يوجد من **أغوارها**، وقد يكون لانهدام **جبال في أغوار** من الأرض **فتزلزلها** ويكون ذلك في زلزلة على إثر زلزلة على الأكثر، وقد يسمع دوي **الريح** في خروجها من الأرض بانشقاقها، ويكون له صوتٌ شديدٌ جداً، فإن لم يكن في **البلاد الجبلية** أغوارٌ عظيمةٌ لم توجد فيها الزلازل، وإن **وُجِدَت الأغوار** في غير الجبلية ربما كانت فيها **الزلازل** أقل على الأقل، وإذا كانت **الأغوار العظيمة** في الأراضي المستحصفة كانت فيها **الزلازل** أعظم فأكثر على الأكثر، فقد **تتزلزل** أراضٍ فتتخسف فيها خسفات وتظهر فيها مياه في **أغوار الخسوف**» (ابن ملكا البغدادي، 1939م).

ابن رشد (القرن 6هـ / 12م)

ذكر **ابن رشد** (توفي 595هـ / 1198م) أن سبب **الزلازل** هي **الأبخرة** المحتبسة «... فقد تبين أن **البخار** المتولد في الأرض **صنفان**: أحدهما الرطب، والآخر **اليابس الدخاني**. أم **الرطب** فيكون منه إذا **علا** فوق الأرض الأمطار وسائر ما عددنا، وأما **الدخاني** فإنه أيضاً إذا **علا** فوق الأرض كانت **الرياح** وسائر الآثار التي عددنا. وأما إذا **بطن** مثل هذا البخار الذي يكون عند الرياح في جوف الأرض وتحرك هناك فباضطرار ألا يكون سبب **الزلزلة** شيء سواه، كما أنه





ليس سبب **اختلاج** أبدان **الحيوان** شيء غير **البخار** المتحرك فيها، ويشبه أن يكون من **المعلومات** الأول ضرورة نسبة هذا السبب إلى هذا الوجود في هذا وفي كثير من هذه الآثار. وقد يمكن أن يوقف على ذلك بدائل: منها أن مثل هذه الحركة الشديدة **المزعزعة** إنما توجد للريح، إذا كانت هي التي **يصير** بكل واحد من **الأسطقسات** إلى الحركة **السريعة** كالغليان والالتهاب في **النار** والتموج في الماء وفي **قياس** هذه الأرض. ومنها أنها توجد على الأكثر في **الأوقات** التي تتولد منها الرياح، وذلك في **زمان** الخريف والربيع وتعدم في **الأوقات** التي تعدم فيها الرياح، وذلك في **زمان** الحر الشديد والبرد الشديد. وهذا كله يدل على أن السبب **الفاعل** لها وللرياح واحد، ومنها أيضاً أن **الدوي** يسمع كثيراً ما يتقدم **الزلزلة**» (ابن رشد، 1994م).

كما ذكر **ابن رشد** أن «الأراضي تختلف في كثرة **الزلازل** فيها وقلتها بحسب استعدادها لأن يتولد فيها مثل هذا البخار وبحسب **انسداد** مسامها أيضاً، ولذلك أي أرض اجتمع لها الأمران جميعاً كانت في **تزلزل** دائم كالجزائر التي يتفق لها مع استعدادها لتولد هذا **البخار الريحي** أن يكون بقرّب البحر حتى يمنع ماء البحر تلك الرياح من **الخروج**، كما يقال إنه يعرض في الموضع الذي **بالأندلس** المعروف بكنيسة الغراب، فإنه يسمع فيها دائماً شبه الدوي الذي يتقدم الزلزلة على ما ذكر» (ابن رشد، 1994م).





الأبهري (القرن 7هـ / 13م)

حتى عصر **المفضل بن عمر بن المفضل الأبهري** (توفي 633هـ / 1235م) كانت لا تزال نظرية الأبخرة في تفسير حدوث **الزلازل** هي **السائدة**: «وأما الزلزلة وانفجار العيون، **فاعلم** أن البخار إذا احتبس في الأرض يميل إلى جهة ويتبرّد بها، فينقلب مياها مختلطة بأجزاء **بخارية** إذا قل، فإذا كثر بحيث لا يسعه الأرض أوجب **انشقاق** الأرض وانفجر منها **العيون**، وإذا غلظ **البخار** بحيث لا ينفذ في مجاري الأرض اجتمع ولم يمكنه **النفوذ فزلزلت الأرض**» (الأبهري، هداية الحكمة، 2019م).

القزويني (القرن 7هـ / 13م)

ذكر **زكريا القزويني** (توفي 681هـ / 1283م) أن بعض الناس «زعموا أن الأبخرة والأدخنة الكثيرة إذا اجتمعت **تحت الأرض** لا تقاومها برودة حتى تصير ماء وتكون مادتها كثيرة لا تقبل التحليل **بأدنى حرارة** ويكون وجه الأرض صلباً لا يكون فيه منفذ ومسام، فالبخارات إذا قصدت **الصعود** لتجد المسام والمنافذ؛ فتهتز منها بقاع الأرض وتضطرب كما **يرتعد** بدن المحموم عند **شدة الحمى** بسبب رطوبات عفنة **احتبست** في خلل أجزاء **البدن**؛ فتشتعل فيها الحرارة **الغريزية** فتذيبها وتحللها **وتصيّرُها** بخاراً ودخاناً فيخرج من مسام جلد البدن فيهتز من ذلك **البدن** ويرتعد ولا يزال كذلك إلى أن تخرج تلك المواد فإذا خرجت **تسكن** وهكذا **حركات** بقاع الأرض بالزلازل...» (القزويني، عجائب المخلوقات، 1848م).





شيخ الربوة (القرن 8هـ / 14م)

يرى شيخ الربوة (توفي 727هـ / 1349م) أن «أصحاب الكلام في الطبائع والمولدات يجعلون الماء أصل الزبيق والكبريت كما تقدم القول به ويزعمون في علة تكوين هذين المعدنين أن الأرض بجملتها كثيرة التخلخل والأهوية والمغارات والكهوف فكل هذه مملوءة من البخارات الكائنة عن تأثير الشمس في أعماق الأرض كتأثير القمر على مد البحر وجزره وتحليلها لأجزاء رطوبتها، فإن كان البخار متغلغلاً في أعماقها، وكان كثير التموج يزعزعها به لتحاملها عليه وضغطها إياه فربما سمع له دويٌّ وصوتٌ هائلٌ وعن هذا التموج يكون الرجف والزلزلة». (شيخ الربوة، 1865م).





الأوربيون

بحلول القرن السابع عشر، جرى نشر العديد من الأوصاف المتعلقة بتأثيرات الزلازل، ربما مع المبالغة والتشوهات الأخرى. جرى التعرف على انزياح سطح الأرض كتأثير للزلازل ولكن لم تُربط بعد بمصدر الاهتزازات. أشار روبرت هوك في كتابه (خطاب عن الزلازل)، الذي نُشر عام 1668م، وفي أوراق لاحقة، إلى ارتفاع الأرض وانخفاضها باعتبارها تأثيرات ملحوظة. كما علق بنيامين فرانكلين B. Franklin (توفي 1790م) في عام 1737م على إنتاج الشقوق والصدوع الطويلة في الأرض.

كانت الرياح والانفجارات الجوفية السبب المفضل لتفسير الزلازل في أواخر عام 1755م. وصف جون وينثروب J. Winthrop (توفي 1779م)، في مناقشة زلزال نيو إنجلاند في ذلك العام، الدور المحتمل الذي يقوم به توسع البخار - الناتج عن اصطدام المياه بالصخور الساخنة أو الأبخرة من الحرائق الجوفية - في التسبب في الزلازل. كان جون ميشيل J. Michell (توفي 1793م)، الذي نُقل عنه مراراً وتكراراً لمدة قرن ونصف القرن، الرأي نفسه. لقد تصور الموجات الزلزالية على أنها ناتجة عن انتشار البخار على طول طائرات الفراش ورفع الصخور التي تعلوها أثناء مرورها (Howell Jr، 1990).

قبل زلزال لشبونة بالبرتغال عام 1755م، كان يُنظر إلى الزلازل بشكل كبير عند الأوربيين على أنها (أفعال من الله) مفروضة على البشرية انتقاماً لسوء السلوك. بعد ذلك، جرت دراستها على أنها ظواهر طبيعية، ونمت المعرفة بها تدريجياً ولكن بثبات نتيجة للملاحظات الدقيقة. لم يكن هذا التغيير في طريقة النظر إلى الظواهر الطبيعية فريداً في علم الزلازل ولكنه تطور في جميع جوانب





العلم على الأقل منذ زمن رجال مثل رينيه ديكارت R. Descartes (توفي 1650م) في فرنسا وغوتفريد فيلهلم ليبنيتز G. W. Leibniz (توفي 1716م) في ألمانيا .



رسم توضيحي ملون يدوياً لزلازل لشبونة الكارثي الذي حدث عام 1755م. (Kozák, Čermák, 2010)





بعدها يقرب من قرن ونصف من سنة 1755م، اقتصر فهم الزلازل على ما يمكن تعلمه من خلال الملاحظة البصرية. كان هذا بسبب عدم وجود وسيلة كافية لقياس حركة الأرض. إذ لم يكن هناك حتى تطوير أجهزة قياس الزلازل الحساسة في نهاية القرن التاسع عشر عندما أصبحت أجهزة قياس الزلازل جيدة بما يكفي للتعرف على الأنواع المختلفة من النبضات التي ينشرها.

كان ريتشارد أولدهام R. Oldham (توفي في 1936م)، أثناء دراسة مخططات الزلازل للزلزال الهندي عام 1897م، أول من ميّز بشكل صحيح بين الموجات الانضغاطية (P) والقص (S) والموجات السطحية. كان هذا التحديد إيذاناً ببدء عصر ذهبي لعلم الزلازل استمر لأكثر من نصف قرن، حيث كان علم الزلازل الأداة الرئيسية لاستكشاف باطن الأرض.

مع أن تفسير مخططات الزلازل هو الذي بشر ببدء هذا العصر الجديد من علم الزلازل، إلا أن تطوير أجهزة قياس الزلازل المحسنة هو الذي جعل ذلك ممكناً. وقد وصلت الأوصاف النوعية لآثار الزلازل إلى ذروتها مع تقرير أندرو لوسون A. Lawson (توفي في 1952م) عن آثار زلزال سان فرانسيسكو عام 1906م.

ومع ذلك، حتى في هذا التقرير، يتضح التركيز الجديد على النهج الكمي من خلال تضمين مخططات الزلازل من 68 مرصداً ومعالجة قام بها هاري فيلدينغ ريد H.F Reid (توفي في 1944م) لآلية الزلزال. لكن الذي قارن التركيز النسبي هنا مع علاج زلزال ألاسكا عام 1964م هو ك. ب. كراوسكوف K. B. Krauskopf ومساعدوه، والذي قام بتفصيل كل جانب من جوانب الزلزال في ثمانية مجلدات.





نحو عام 1960م، اجتمعت ثلاثة تطورات لإحداث ثورة في علم الزلازل: كان أولها تطوير الحاسوب الرقمي عالي السرعة، الذي أتاح معالجة مجموعة متنوعة من المشكلات مثل حساب منحنيات التشتت، والتي كانت في السابق صعبة الحل. ونشأ التطور الثاني من الحاجة إلى وسيلة لرصد الحظر المقترح على التجارب تحت الأرض للتفجيرات النووية سيكون مختلفاً عن الزلازل الطبيعية. لإثبات ذلك، جرى توفير مبالغ كبيرة من المال للبحوث الزلزالية، وانجذب العديد من العلماء الشباب إلى علم الزلازل كمهنة.

أصبحت وكالة مشاريع الأبحاث المتقدمة (ARPA) التابعة لسلاح الجو الأمريكي لفترة من الوقت الوكالة الأمريكية الرئيسية المشاركة في دعم علم الزلازل. دعمت (ARPA) بحكمة مجموعة متنوعة من الأبحاث الزلزالية، بما في ذلك العديد من التحقيقات الأساسية بالإضافة إلى المشاريع التي اقتصر على تحديد الانفجار النووي. كانت إحدى أهم مساهماتها هي توفير أكثر من 100 مجموعة من أجهزة قياس الزلازل الحديثة والموحدة للمرصد المتعاونة الموزعة في معظم أنحاء العالم.

جرى إرسال مخططات الزلازل الناتجة إلى مركز بيانات عالمي (حالياً في بولدر، كولورادو) حيث يمكن لأي عالم مهتم الحصول على نسخ منه. كان لهذا تأثيران:

- **الأول:** يمكن الحصول على مخططات الزلازل على الفور لأي زلزال مهم عن طريق الاتصال بوكالة واحدة. في السابق، كان على المرء أن يكتب إلى كل مرصد على حدة والانتظار، أحياناً لأشهر، ليرى مقدار البيانات التي سيجري توفيرها.





• **الثاني:** والأهم من ذلك، كانت أدوات التسجيل متشابهة في خصائصها، مما يسهل مقارنة الحركات الأرضية في مواقع مختلفة. أدى الجمع بين البيانات الجيدة التي جرى الحصول عليها بسهولة، والأموال اللازمة لإجراء البحوث، وجيش من الباحثين النشطين الشباب إلى تطورات سريعة في المعرفة الزلزالية.

كان التطور الثالث هو القبول السريع لنظرية الصفائح التكتونية بعد نشر أوراق روبرت س. ديتز R. S. Dietz (توفي 1995م) وهاري ه. هيس H. H. Hess (توفي 1969م) مع أنها لم تكن أفكار جديدة، لكن الدليل المؤيد للنظرية أصبح فجأة مقنعاً.

كانت النتيجة أن نموذجاً شاملاً للأرض بصفتها محرك حراري أصبح متاحاً لشرح سبب حدوث الزلازل في مكان وزمان حدوثها. تعد ثورة الصفائح التكتونية مثلاً جيداً على كيف يمكن لفكرة جيدة التقديم أن تؤدي سريعاً إلى التخلي عن الأفكار المسبقة القديمة. لقد أدى إلى تقدم سريع ليس فقط في علم الزلازل ولكن في جميع أنحاء العلوم الجيولوجية.

يمكن اعتبار زلزال تشيلي عام 1960 بمثابة علامة لبداية العصر الحديث لعلم الزلازل. كان أول من جرى تحليل أطياف التذبذب فيه بدقة باستخدام أجهزة الحاسوب الجديدة، مما أدى إلى معلومات جديدة حول باطن الأرض.

في العقود التي أعقبت هذه التطورات، تغيرت طبيعة البحث الزلزالي. أصبحت كميات أكبر بكثير من البيانات متاحة أكثر من أي وقت مضى، وتمت معالجة هذه البيانات بوساطة أجهزة الحاسوب. يجري حالياً تغذية البيانات





مباشرة من جهاز قياس **الزلازل** إلى الحاسوب. تطوّر **الأثار الزلزالية** لنماذج متعددة من **بنية** أو سلوك الأرض **بوساطة** الحاسوب ومقارنتها مع الملاحظات الفعلية لتحديد النموذج الأكثر احتمالية. أدى الفهم الجديد لعمليات الأرض على أساس نظرية الصفائح التكتونية إلى تقييمات معقولة لخطر الزلازل وحتى إلى عدد قليل من التنبؤات الناجحة للزلازل. كان التقدم كافياً **للتنبؤ بالزلازل** ليصبح هدفاً وطنياً للبحث في العديد من **البلدان** بما في ذلك **الولايات المتحدة واليابان**. (Howell Jr., 1990)

ظهرت **أهمية** تصدّع الصخور في **الزلازل** تدريجياً خلال القرن التاسع عشر. في البداية، كان يُنظر إلى الصدع على أنه نتيجة للزلازل وليس سبباً لها. يذكر **تشارلز ليل** Ch. Lyell (توفي 1875م) أن (الصدع المفاجئ... للأرض الصلبة قد ينتج عنه جرة اهتزازية)؛ لكنه يذكر أيضاً أن "الهبوط المفاجئ للأرض قد يكون ناتجاً عن انهيار الكهوف الجوفية". مع أن لايل يشير إلى "قوة الارتفاع للزلازل" كتفسير لارتفاع الكتل الأرضية، فإنه يكرر أفكار ميشيل عن نبضات الغاز التي تتشر الطبقات باعتبارها السبب المقبول عموماً لموجات الزلازل.

اقترح **هنري د. روجرز** H. D. Rogers (توفي 1866م) و**وليم ب. روجرز** W. B. Rogers (توفي 1882م) من **الأفكار** الحديثة عندما اقترحا أن النبضات المرصودة كانت (ناتجة عن تمزق خطي للقشرة... والهروب المفاجئ أو المتفجر للبخار المضغوط بشدة أو مادة غازية أخرى) من خلال الشق الناتج. مع أنهما تصورا الصدع بشكل صحيح باعتباره أمراً ضرورياً لعملية الزلازل، باستخدام طول الصدع لشرح التفلطح في المنطقة المحسوسة، إلا أنهما لم يتمكنوا من التخلي عن القبول السائد لدور تمدد الغاز كعامل مسبب أساسي.



أُجبر **علماء الجيولوجيا** على التفكير في أسباب بديلة للبراكين عندما لاحظوا أن الزلازل حدثت في مناطق بعيدة عن **النشاط البركاني** الحالي. فقد لاحظ **أوزموند فيشر**، في مناقشته **لزلال** وقع في **سويسرا**، أن (وادي فيسب Visp يقع على **محور** نطاقين لهما شكل وادٍ مرتفع. وربما نشأت **الصدمة** من إن إزاحة قواعد هذا الاضطراب القديم، وربما الزاوية المستطيلة إلى حد ما بين الوديان في فيسب عانت من الإزاحة الرئيسية. ربما تنشأ الزلازل في المناطق غير البركانية بسبب فشل الدعم. في فترة ارتفاع جبال الألب، يجب أن تكون الأجزاء السفلية الأكثر تسخيناً من قشرة الأرض أقرب إلى السطح من الوضع الطبيعي، ويجب أن تحدث تقلصات وفشل الدعم أثناء التبريد، وقد يكون الارتفاع الحديث نسبياً لجبال الألب اعطاء سبب للاعتقاد بأن هذا لا يزال جارياً).

هل (فشل الدعم) و(تغيير القواعد) مثل التصدع؟

يبدو أن روبرت ماليت R. Mallet (توفي 1881م) ، الذي يعتبره تشارلز دافيسون Ch. Davison **المؤسس الرئيس** لعلم **الزلازل العلمي**، كان قريباً من الاعتراف بدور التصدع، لكنه لم يقبل أبداً بأهميته الكاملة.

قال **ماليت**: (يُفهم عموماً أن مركز النبضة أو أصل **الزلازل** يكون عند أو بسبب انفجار **بركاني** مفاجئ أو اضطراب مفاجئ أو انخفاض في منطقة محدودة، أو كسر **مفاجئ** للطبقات **المنحنية** والمتوترة، أو ربما بسبب **التكوين المفاجئ لبخار الماء المتصاعد** من الماء في حالة تنافر من أسطح **شديدة الحرارة**... أو ربما لتطور **البخار** من خلال **الشقوق** وتكثيفه غير المنتظم وبكل **سبخة** [بشكل مفاجئ]).





وذكر **ماليت** أن (أي إنتاج **مباشر** للصدوع **الزلزالية** أو الشقوق من خلال تحركات **جسيمات** الموجة أو عن طريق عبور الموجة كان مستحيلاً مادياً). لقد افترض أن سبب **الزلازل** إما **بركاني** أو **الضغط** المماسي للتبريد. سيطرت نظرية الانكماش في هذا الوقت على **التفكير** في أصل **السلاسل** الجبلية.

رأى **ماليت** أن **الزلازل** يمكن أن تكون **ناجمة** عن (تكسر وطحن الطبقات الصخرية على بعضها بعضاً على عمق كبير، من خلال **الضغط** العرضي الناتج في **قشرة** الأرض عن طريق **التبريد** العلماني). من هذه **الفكرة** إلى تحديد الخطأ كمصدر **للاهتزازات** ليست سوى **خطوة** قصيرة جداً.

يوشيا دوايت ويتني J. D. Whitney (توفي 1896م) في مناقشة **زلزال وادي أوينز بكاليفورنيا** في ذلك العام قال الشيء نفسه تقريباً: (التوتر أو الانضغاط يتراكم، حتى يصبح **تماسك** المادة **غير قادر** على مقاومة **الضغط** والصخور تفسح المجال، **ويتكون** الشق، وينتقل **نبضة** قوية إلى **الصخور الفائقة**).

مثل **ماليت**، أرجع **ويتني** **الإجهاد** إلى **الانكماش**، لكنه أكد لسبب ما على التوتر على **الضغط** أو **القصر** كسبب **للإنزياح** وفشل في التعرف على أهمية هيكل **صدع** رئيس واحد. لم يُتعرّف بوضوح على **العلاقة** الحقيقية بين الصدع والزلزال إلا بعد دراسة **المنطقة** مرة أخرى بعد **عدة سنوات** من قبل **غروف ك. غيلبرت** G. K. Gilbert (توفي 1918م) و **ووليم ه. هوبز** W. H. Hobbs (توفي 1952م).

يُنسب إلى **إدوارد سوس** E. Suess (توفي 1914م) من قبل **كارل ألفريد ريتز** فون **زيتل** K. A. von Zittel (توفي 1904م) **إثبات** الدور المهم للأعطال في **الزلازل**:



(في ورقتين موحيتين عن الزلازل في النمسا السفلى وجنوب إيطاليا، أظهر البروفيسور سوس بشكل قاطع أن الزلازل تحدث على طول خطوط الحركة التكتونية في نظام جبلي، وبغض النظر تماماً عن أي ظواهر بركانية).

في غضون سنوات قليلة، أصبحت فكرة الصدع مقبولةً كسبب للزلازل. تضمن رودولف هورنس R. Hoernes (توفي 1912م) الصدمات التكتونية كأهم فئات الزلازل الثلاثة، والنوعان الآخران هما انهيار التجايف والاهتزازات التي تنشأ أثناء حركة البراكين.

تراكمت أرصاد الصدع السطحي طوال القرن التاسع عشر. ركز تكوين سد الله Dam of Allah، وهو جرف مرتفع يبلغ ارتفاعه 3 إلى 6 أمتار نتج عام 1819م عن زلزال في ران أوف كوتش Rann of Cutch في الهند، الانتباه على هذه الظاهرة. ونتج عن زلزال فورت تيجون Fort Tejon بولاية كاليفورنيا عام 1857م إزاحة أفقية بطول 110 كيلو مترات، وزلزال أوينز فالي Owens Valley بكاليفورنيا، وهو منحدر رأسي بطول 7 أمتار.

أصبحت هذه الظواهر معروفة من خلال التقارير غير الفنية المنشورة محلياً ومن خلال المراسلات. استغرقت الحقائق وقتاً طويلاً لتصبح معروفة على نطاق واسع؛ والكثير من معرفتنا الحالية عنهم مستمدة من الدراسات العلمية التي أجريت بعد سنوات عديدة من وقوع الأحداث.

جرى تضمين بيان واضح لنظرية الصدع الخاص بأصل الزلازل في مقال قصير بقلم غروف كارل غيلبرت G. K. Gilbert (توفي 1918م) نُشر لأول مرة في





20 سبتمبر 1883م في **سولت ليك سيتي تريبيون** Salt Lake City Tribune **كتحذير** لتلك المدينة من خطر حدوث زلزال في المستقبل. في ذلك يقول غيلبرت، مشيراً إلى تكوين كتلة جبلية في الحوض العظيم Great Basin: (ينتج الطفو إجهاداً محلياً في القشرة، يتضمن قدراً معيناً من الانضغاط والتشويه، وتزداد هذه السلالة حتى تكفي للتغلب على احتكاك البداية على طول السطح المكسور. فجأة، وبشكل فوري تقريباً، هناك قدر من الحركة يكفي لتخفيف الضغط، وتلي ذلك فترة طويلة من الهدوء، يجري خلالها إعادة فرض الإجهاد تدريجياً).

أدرك **غيلبرت** الطبيعة المتقطعة لتكرار حدوث الزلازل في أي موقع واحد: (البقعة التي هي **بؤرة الزلزال**... وبالتالي، فهي **مستثناة** [من التكرار] لفترة طويلة، وعلى العكس من ذلك، أي موقع على خط الصدع في سلسلة الجبال الكبيرة التي جرى إعفاؤها من الزلازل لفترة طويلة، هي أقرب بكثير من تاريخ تكرارها).

لقد أثبت **زلزال مينو- أوري** Mino-Owari في **اليابان** عام 1891م **بقوة الأصل** الصدعي **للزلازل**. جرت دراستها والإبلاغ عنها **بالتفصيل** من قبل **بونجيرو كوتو** (توفي 1935م) B. Koto **وآخرون** عام 1893م على **الفور** بعد حدوثه، بما في ذلك **وصف** صدع **طوله 110 كم** مع إزاحة رأسية **قدرها 6 أمتار**. تناقض مناقشة **كوتو** الآراء **النموذجية لأسلافه** مع اقتناعه بأن **التصدع** هو السبب الأساسي لهذا الحدث المحدد على الأقل. قال: (إنّ الجيولوجيين صامتون تماماً بشأن ما إذا كان ينبغي اعتبار تكوين الصدوع والصدوع هو السبب المباشر، أو نتيجة التشنجات الجوفية فقط)؛ وأنّ (الارتفاعات أو المنخفضات أو التحولات الجانبية المفاجئة لمساحات شاسعة من الدولة التي تحدث في أوقات الزلازل المدمرة تعتبر عادةً **آثاراً** وليس **سبباً** للاضطرابات **الجوفية**؛ ولكن في رأيي يمكن



التأكيد بثقة على أن التشكيل المفاجئ لصدع نيو Neo العظيم هو السبب الفعلي للزلزال العظيم الذي حدث في 28 أكتوبر/ تشرين الأول 1891م).



ضرب زلزال نوبي (Nōbi Jishin) مقاطعتي مينو وأواري اليابانيتين السابقتين (محافظة جيفو الحالية) في سهل نوبي في الصباح الباكر من يوم 28 أكتوبر/ تشرين الأول وبلغت قوته السطحية 8.0 درجة وقوة 7.5 درجة على مقياس ريختر. هذا الحدث، الذي يُشار إليه أيضاً باسم زلزال مينو-أواري عام 1891 (مينو-أواري جيشين)، أو زلزال جيفو العظيم (جيفو دايجيشين)، أو زلزال نوبي العظيم (نوبي دايجيشين)، هو أكبر زلزال داخلي معروف حدث في الأرخبيل الياباني.





أدرك كوتو أن الزلازل حدثت مراراً وتكراراً على الصدوع نفسها: "يبدو أن حدث أكتوبر/ تشرين الأول 1891م كان بمثابة حركة متجددة على أحد هذه الشقوق الموجودة مسبقاً". يعد زلزال مينو أواري علامة بارزة في تاريخ علم الزلازل لأن دراسة ميزاته أدت إلى القبول العام للصدع باعتباره السبب وليس مجرد تأثير الزلازل.

يمكن رؤية ظهور مفهوم الصدع كسبب للزلازل بوضوح في الطبقات المتعاقبة من دليل الجيولوجيا لجيمس دويت دانا J. D. Dana. (توفي 1895م) في طبعة عام 1863م الذي يسرد ثلاثة أسباب للزلازل:

1. (التوتر والضغط اللذين تولدت بوساطتهما التذبذبات والتقلبات العظيمة للقشرة الأرضية)؛ موضحاً كذلك أن (أي انزلاق أولي... على طول كسر قديم أو بين قواعد مائلة، سيصاحبها صدمة زلزال).
2. (أي سبب للكسر أو الحركة الواسعة،... مثل تقويض الطبقات، التطور المفاجئ للأبخرة، إلخ).
3. (موجات المد والجزر في المادة الداخلية للكرة الأرضية). في طبعة عام 1875م، قال: (السبب الرئيس هو الضغط الجانبي لقشرة الأرض... الصخور قد تركت في كل مكان في حالة إجهاد، نتيجة للارتفاعات والطيات التي تعرضت لها).

بقي يسرد الأسباب (2) و (3) من طبعة 1863م لكنه جادل بشدة ضد السبب (3). في عام 1880م، أشار بشكل مبدئي (ص 804) إلى (الكسر المفاجئ أو الإزاحة) كسبب رئيس؛ وفي طبعة عام 1894م، صرح بحزم (ص 372) أن (الزلازل



الحقيقية تأتي، في معظمها على الأقل، من أحد مصادر الاضطراب التالية أو الأخرى: (1) أبخرة تنتج فجأة مما تسبب في حدوث تمزق واحتكاك أو بشكل عام (2) حركات مفاجئة أو انزلاق على طول الكسور القديمة أو الجديدة). يشير دافيسون إلى الزلازل على أنها (مجرد حوادث في نمو الصدوع). وقد استخدم استطلاعة الخطوط المتساوية كحجة في تحديد اتجاه الصدع غير المكتشف الذي وقع فيه زلزال هيرفورد عام 1896م.

جرى قبول الصدع باعتباره السبب الرئيس للزلازل تدريجياً، واكتسبت الفكرة القبول كدليل متراكم. من الذي اقترحه لأول مرة غير معروف بالتأكيد. يقول دافيسون: (أنا غير قادر على تحديد من نحن مدينون للاقتراح الأول)، مع أنه في عام 1927م نسب الفضل إلى أوزموند فيشر.

جرى تأكيد نظرية غيلبرت (1884م) المتعمقة لطبيعة الصدوع في الزلازل من خلال زلزال سان فرانسيسكو بكاليفورنيا عام 1906م (Howell Jr., 1990).





Reynolds, Edmund Blakey, ill. "1906, San Francisco"

144

UNE VILLE DÉTRUITE. — UN TREMBLEMENT DE TERRE ET DES INCENDIES ANÉANTISSENT SAN-FRANCISCO

طباعة ملونة، رسم توضيحي للصحيفة للمجلة الفرنسية Le Petit Parisien بتاريخ 6 مايو/ أيار 1906 (رقم 900، ص 144) - بعنوان (مدينة مدمرة - زلزال وحرائق مدمرة في سان فرانسيسكو). تهدف رؤية الفنان من أعلى المبنى المتضرر في الطرف الجنوبي الغربي من شارع السوق الرئيسي في المدينة إلى الشمال الشرقي فوق جزيرة الماعز والجزء الشرقي من خليج سان فرانسيسكو، في مكان ما إلى التلال فوق بيركلي. اشتعلت النيران في القطاع الشمالي من البلدة وتغطيه دخان كثيف، وكذلك الجانب الأيمن من شارع السوق. جرى إدخال المدينة نفسها على أنها تضررت بشدة من الزلزال، ومعظم المباني في حالة خراب. بغض النظر عن أنه من الصعب اليوم الحكم على درجة موضوعية الرسم التوضيحي وصحته، فإن الصورة نفسها تبدو واقعية جداً، وأيضاً لتوجهها الطبوغرافي الصحيح (يمكن طرح سؤال عما إذا كان الرسم قد رُسم عن صورة). (Kozák, Čermák, 2010)





عين حاكم كاليفورنيا **جورج سي باردي** لجنة لدراسة الزلازل، لكن الولاية للأسف لم تقدم أي أموال للعمل. **جري** التغلب على هذا النقص من خلال إعانة من مؤسسة **كارنيجي بواشنطن**، التي نشرت نتائج التحقيق في مجلدين وأطلس للخرائط ومخططات الزلازل (لوسون، 1908).

يحتوي هذا التقرير على **أوصاف** مفصلة لحالات الانزياح الناتجة عن الصدوع، والأهم من ذلك، أنه **يحتوي** على ملخص وقائعي **للقياسات الجيوديسية** التي أجريت بوساطة **سلسلة** من المسوحات **الفيدرالية** من 1851م إلى 1899م وبعد **الزلازل** مباشرة، لخصها **جون إف هايفورد وأل بالدوين** (1908). **كشفت** هذه القياسات أن تشوه الأرض حدث بشكل **مستمر** طوال فترة المسوحات العديدة، حيث **تتحرك** المنطقة الواقعة جنوب غرب **صدع سان أندرياس** باتجاه الشمال الغربي أو المنطقة الشمالية **الشرقية** تتحرك باتجاه الجنوب **الشرقي** أو **كليهما**.

كانت عمليات **الإزحات المفاجئة** على طول الصدع في عام 1906م مجرد جزء من **الانجراف التدريجي** للجزء الأكبر من **قارة** أمريكا الشمالية بالنسبة لشريحة من الساحل **وقاع** المحيط الهادئ المجاور. **أندرو سي لوسون**، ولدى مناقشة هذه القياسات، أدرك أن **الحركات** التي ذكرها **هايفورد وبالدوين** Hayford & Baldwin تتضمن **الانحناء** التدريجي للصخور قبل **الزلازل** يليه **الانزلاق المفاجئ** على طول الصدع أثناءه.

ناقش **لوسون** (ص 150) (الزحف البطيء) **للمكتلين** شمال شرق وجنوب غرب الصدع السابق **للزلازل**. اليوم لا يُطلق على هذا **الإزاحة** الزاحفة ولكن يمكن وصفها بأنها **تشوه تدريجي مرن** للمنطقة التي تتراكم الضغط في الصخور.





يُنسب إلى **توماس دبليو كوخ** Th. W. Koch عادةً أول دليل على أن الإزاحة المستمرة والبطيئة يمكن أن تحدث عند حدوث **صدع**. وقد لاحظ ذلك في حقل نفط **بوينا فيستا هيلز** Buena Vista Hills، حيث أدى **صدع** في الدفع إلى قطع العديد من الآبار تدريجياً.

جرى توثيق الإزاحة المستمرة على طول صدع سان أندرياس بعناية لمنطقة **هولистер** Hollister بواسطة **كارل ف. شتاينبروغ** K. V. Steinbrugge ومساعديه عام 1960م.

كان **عضو لجنة الحاكم باردي** الذي أوضح أهمية قياسات **هايفورد** وبالذوين **هو هاري إف ريد** (1910). اقترح أن تتحني **قشرة** الأرض بأكملها بشكل مرن تحت الضغوط المطبقة بطريقة غير معروفة حتى يجري الوصول إلى قوة **كسر** الصخور، وعند هذه النقطة **تتكسر** على طول الخط القديم **الضعيف** لصدع **سان أندرياس**، وترتد إلى **موقع جديد** (Howell Jr، 1990)

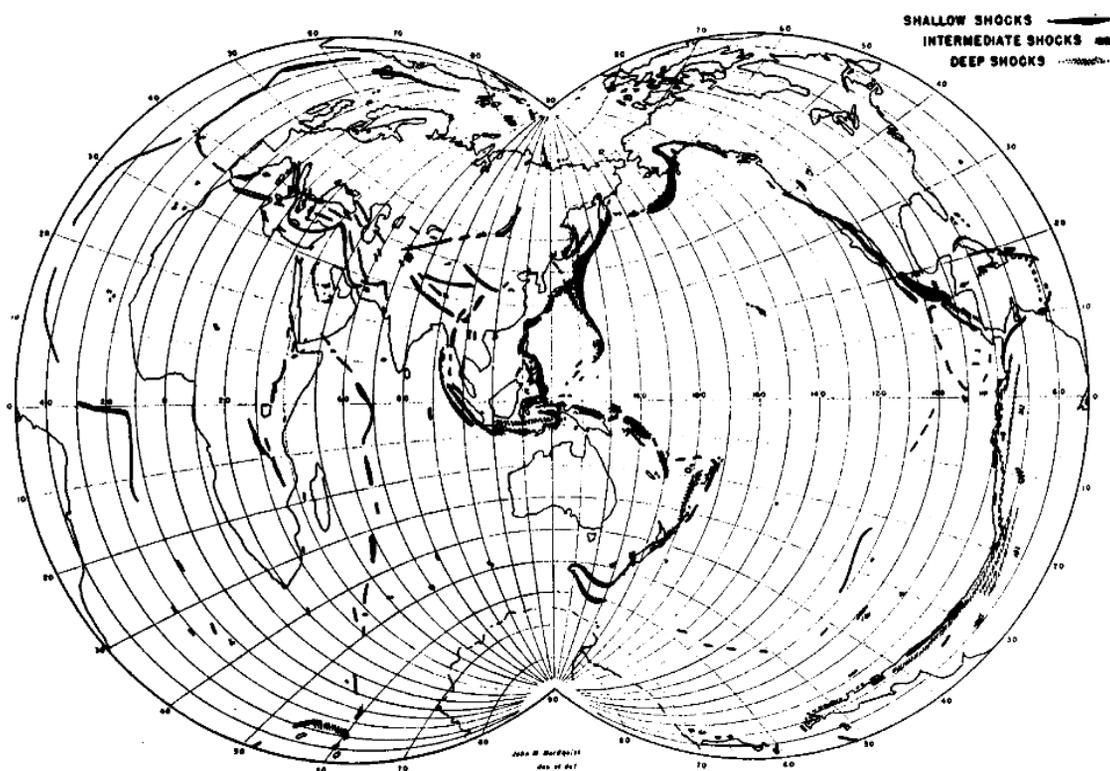


كان الإزاحة المفاجئة الناتجة هي مصدر اهتزازات الزلازل. هذه الفكرة هي نفسها فكرة **غيلبرت** (1884م)، لكن ريد **شرحها** بشكل أكثر كميًا وبمزيد من التفصيل. إنها لا تزال أساساً النظرية **المقبولة** عموماً حول أصل الموجات **الزلزالية**.

كان مفهوم **الارتداد** المرن لريد مهماً بشكل خاص لأنه وفر إطاراً يمكن من خلاله النظر إلى الزلازل كجزء من عمليات أكبر لتشوه الأرض. يمكن حالياً استخدام الزلازل لتوفير مقياس لمعدل حركة كتل القشرة فيما يتعلق ببعضها بعضاً، مقاسة بمقدار إزاحة الصدع.

ركز عمل **بينو غوتتبرغ** B. Gutenberg (توفي 1960م) و**تشارلز فرانسيس ريختر** Ch. F. Richter (توفي 1985م) الانتباه على ضيق **أحزمة الزلازل**. أظهروا أن الحزام المحيط الهادئ يتبع الحدود بين القارات والمحيط (Howell Jr., 1990)





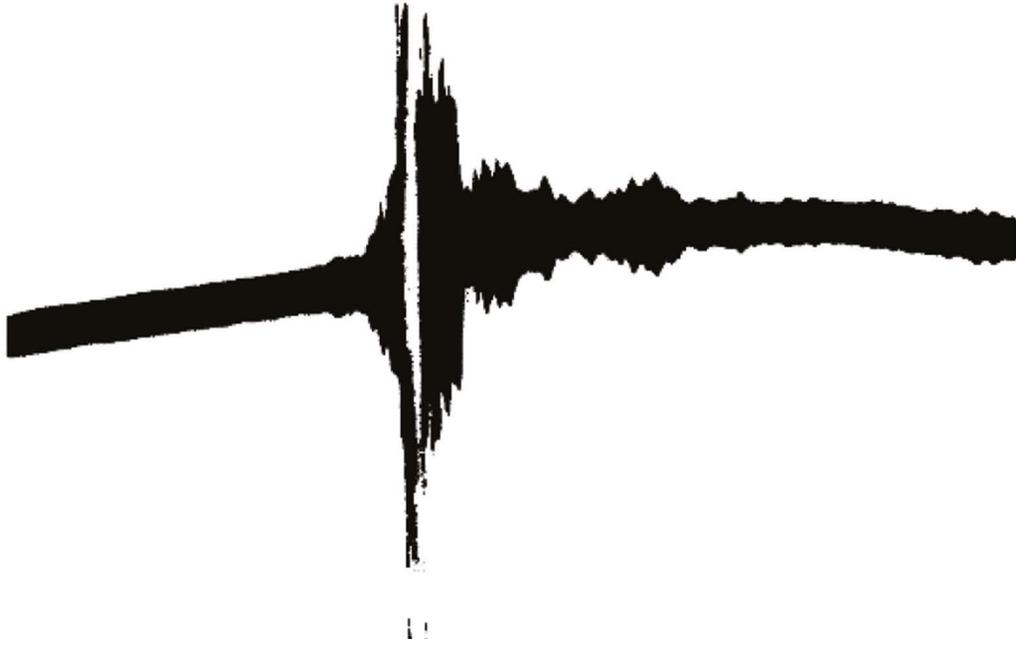
وضع كل من بينو غوتنبرغ وتشارلز فرانسيس ريختر أول خريطة عالمية للأحزمة الزلزالية (محافظة في الجمعية الجيولوجية الأمريكية) (Howell Jr.، 1990).





يمكن إرجاع البدايات النظرية لعلم الزلازل إلى دراسات القرنين الثامن عشر والتاسع عشر لمرونة وانتشار الموجات المرنة في المواد الصلبة. قدم اللورد كلفن أول تقدير رقمي لفترة الوضع الاهتزازي الأساسي (OS2) في عام 1863م، ولكن تطوير النظرية المناسبة للككرة المتجانسة كان يجب أن ينتظر ما يقرب من 50 عاماً. حل اللورد رايلي مشكلة انتشار الموجات السطحية في نصف مساحة مرنة في عام 1877م.

كان هذا قبل أول أجهزة قياس الزلازل الميكانيكية، التي جرى تطويرها في ثمانينات القرن التاسع عشر. في الأصل، كانت أجهزة قياس الزلازل ذات حساسية منخفضة جداً وكانت تستخدم لتسجيل الزلازل المحلية. يبدأ تاريخ علم الزلازل العالمي بتسجيل زلزال اليابان في 19 أبريل/ نيسان 1889م بواسطة فون ريبور- باشويتز. وقد ربط الاضطراب المسجل على مقياس الميل، المستخدم لدراسة المد والجزر على الأرض، بتقارير حدوث زلزال كبير في اليابان. يوضح الشكل أدناه نسخة من هذا التسجيل المنشور في (Nature (1889) (von Rebeur-Paschwitz), 1895).



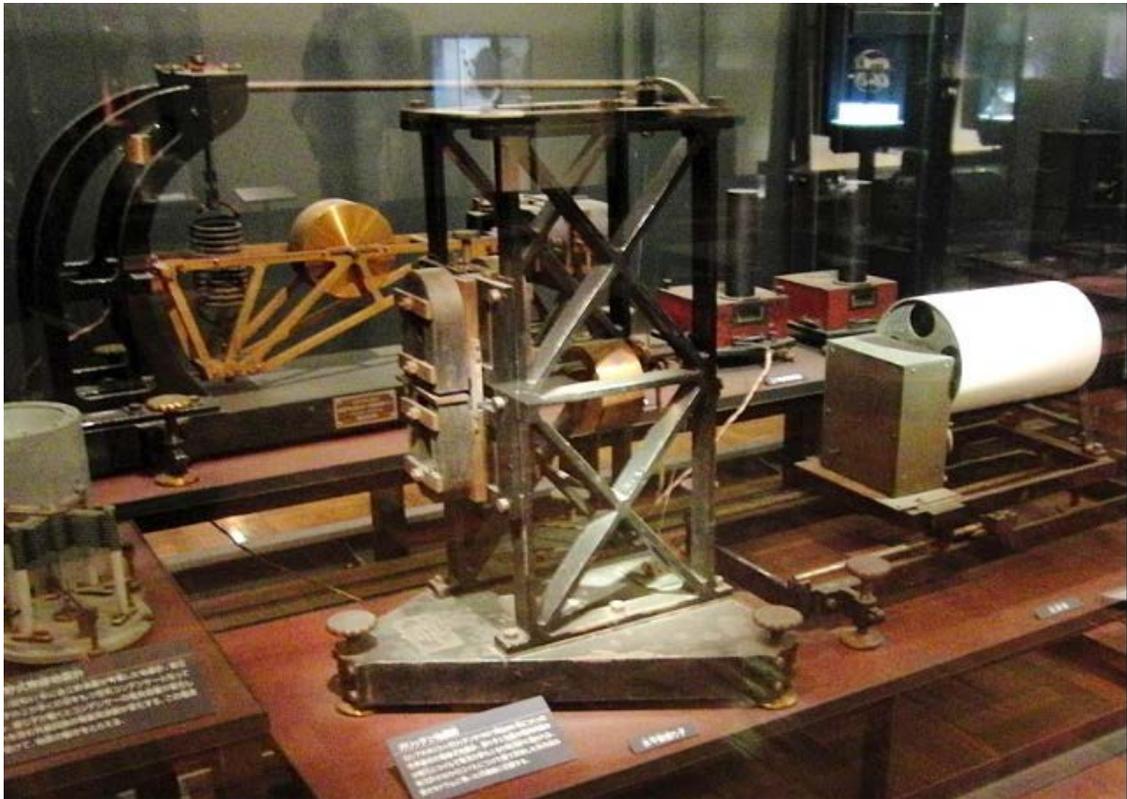
صورة لأول إشارة يجري تسجيلها في بوتسدام في ألمانيا لدى انتشار زلزال قد وقع - في الغالب - في طوكيو عام 1889م، وذلك باستخدام البندولات الأفقية الحساسة ذاتية التسجيل **Sensitive Horizontal Pendulums**، وقد قام بذلك الجيوفيزيائي الألماني إرنست فون ريبور-باشفيتز (توفي 1859م) (E. von Rebeur-Paschwitz, Agnew, 2002).





كانت أجهزة قياس الزلازل المبكرة عبارة عن نواسات ميكانيكية بدون تخميد، بخلاف الاحتكاك. كانت معدلات تضخيمها (نسبة السعة على مخطط الزلازل إلى الحركة الأرضية الفعلية) منخفضة جداً، وبسبب نقص التخميد، كانت السجلات متذبذبة للغاية وكان من الصعب تمييز الوافدين من المراحل المختلفة. قام الألماني إيميل فيشرت E. Wiechert (توفي 1928م) في عام 1904م ببناء جهاز قياس الزلازل الميكانيكي المحسن مع تخميد متحكم فيه.

بعد ذلك بوقت قصير، عام 1906م، طور الروسي بوريس غوليتزن B. Golitsyn (توفي 1916م) نظام قياس الزلازل الكهرومغناطيسي، حيث تولد حركة بندول مقياس الزلازل تياراً كهربائياً بحركة ملف في المجال المغناطيسي. جرى نقل هذا التيار بدوره إلى الجلفانومتر. وجرى تسجيل دوران ملف الجلفانومتر في مجال مغناطيسي على ورق فوتوغرافي بواسطة شعاع من الضوء ينعكس من مرآة متصلة بالملف. حيث تعتمد استجابة النظام على الحساسية وفترة الفراغ لمقياس الزلازل والجلفانومتر والتخميد. بينما كان النظام أكثر تعقيداً، فقد سمح بمزيد من المرونة في اختيار الاستجابة المرغوبة. (Romanowicz، & Adam، 2007)



اختراع بوريس غوليتزن أول جهاز قياس الزلازل الكهرومغناطيسي في عام 1906م.

(https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Boris_Borisovich_Galitzine)







المراجع العربية

الأبهري، أثير الدين، هداية الحكمة، ط1، مكتبة المدينة للطباعة والنشر والتوزيع، كراتشي، 2019م.

إخوان الصفا، رسائل إخوان الصفا، مجلد2، دار صادر، بيروت، (د.ت).

ابن إسحق، حنين، جوامع حنين بن اسحق في الآثار العلوية لأرسطو، تقديم وتحقيق: يوسف حبي وحكمت نجيب، بغداد مجمع اللغة السريانية ببغداد. 1976م.

أفلاطون، الطيماوس واكريتيس، تحقيق وتقديم: ألبير ريفو، ترجمة: فؤاد جرجي بربارة، الهيئة العامة للكتاب، دمشق، 2014م.

بَحْشَل، أسلم بن سهل بن أسلم بن حبيب الرزاز الواسطي، أبو الحسن، تاريخ واسط، تحقيق: كوركيس عواد، ط1، عالم الكتب، بيروت، 1986م.

باربر، نيكولا (2002م). الزلازل والبراكين. سلسلة علوم ألفا. مكتبة العبيكان.

بدوي، عبد الرحمن، شروح على أرسطو مفقودة في اليونانية (ورسائل أخرى)، دار المشرق، بيروت، 1971م.

جابر بن حيان، مختار رسائل جابر بن حيان، عني بتصحيحها ونشرها: بول كراوس، مطبعة الخانجي، القاهرة، 1935م.





الجبرتي، عبد الرحمن بن حسن، تاريخ عجائب الآثار في التراجم والأخبار، ط2، ج3، دار الجيل، بيروت، 1978م.

ابن الجوزي، سبط، مرآة الزمان في تواريخ الأعيان، ط1، ج19، تحقيق وتعليق: محمد بركات، كامل محمد الخراط، عمار ربحاوي، محمد رضوان عرقسوسي، أنور طالب، فادي المغربي، رضوان مامو، محمد معتز كريم الدين، زاهر إسحاق، محمد أنس الخن، إبراهيم الزبيق، دار الرسالة العالمية، دمشق، 2013م.

ابن الجوزي، عبد الرحمن بن علي بن محمد، المنتظم في تاريخ الملوك والأمم، ط1، دار الكتب العلمية، بيروت، 1992م.

الحنبلي، ابن العماد، شذرات الذهب في أخبار من ذهب، حققه: محمود الأرنؤوط، ط1، ج6، دار ابن كثير، دمشق - بيروت، 1986م.

ابن حوقل، محمد، صورة الأرض، ج2، دار صادر، أفست ليدن، بيروت، 1983م.

أبو خليل، شوقي ورفاقه، موسوعة الأوائل والمبدعين في الحضارة العربية الإسلامية، ط1، دار المنبر، دمشق، 2003م.

ابن دُقماق، إبراهيم بن محمد بن أيدير العلائبي، نزهة الأنام في تاريخ الإسلام، ط1، دراسة وتحقيق: سمير طيارة، المكتبة العصرية للطباعة والنشر، بيروت، 1999م.





ابن الدَّوَادري، أبو بكر بن عبد الله بن أبيك، كنز الدرر وجامع الغرر، ج1، حققه مجموعة من المحققين، نشره عيسى البابي الحلبي، نشر بين عامي 1960-1994م.

ابن رشد، تلخيص الآثار العلوية، تحقيق: جمال الدين العلوي، ط1، دار الغرب الإسلامي، بيروت، 1994م.

الرشيد، محمد بن أحمد، الحرّات في السعودية، مجلة الفيصل العلمية، العددان 439-440، تصدر عن مركز الملك فيصل للدراسات والبحوث الإسلامية، الرياض، ديسمبر 2012م - يناير 2013م.

الزيدي، علي بن الحسن، العقود اللؤلؤية في تاريخ الدولة الرسولية، ط1، ج1: عُني بتصحيحه وتنقيحه: محمد بسيوني عسل، ج2: تحقيق: محمد بن علي الأكوع الحوالي، مركز الدراسات والبحوث اليمني، صنعاء، دار الآداب، بيروت، 1983م.

سارتون، جورج، تاريخ العلم، ترجمة: لفييف من العلماء، ج3، ط1، المركز القومي للترجمة، العدد 1638، القاهرة، 2010م.

السمهودي، نور الدين، وفاء الوفاء بأخبار دار المصطفى، ط1، ج1، دار الكتب العلمية، بيروت، 1998م.

ابن سينا، أبو علي، الشفاء (الطبيعيات)، تحقيق: محمد رضا مدور، إمام إبراهيم أحمد، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة، 1980م.





شيخ الربوة، شمس الدين محمد الدمشقي، نخبة الدهر في عجائب البر والبحر، نشره م. فرين، ثم أغسطس مهرن، إعادة طبعة بطرسبورغ. منشورات معهد تاريخ العلوم العربية والإسلامية، جامعة فرانكفورت، 1865م.

ابن العبري، غريغوريوس، مختصر تاريخ الدول، تحقيق: أنطون صالحاني اليسوعي، ج1، دار المشرق، بيروت، 1992م.

العمري، عبد الله بن محمد، سلسلة العمري العلمية: 6، جامعة الملك سعود، الرياض، 2013م.

العمري، ياسين بن خير الله، زبدة الآثار الجلية في الحوادث الأرضية، النجف، 1974م.

العيني، بدر الدين، عقد الجمان في تاريخ أهل الزمان، حققه ووضع حواشيه: محمد محمد أمين، ج2، الهيئة المصرية العامة للكتاب - مركز تحقيق التراث، القاهرة، 1987م.

الغنيم، عبد الله يوسف، أسباب الزلازل وأحداثها في التراث العربي، مجلة المجمع العلمي العراقي، ج4، مجلد 35، تشرين الأول، بغداد، 1984م.

الغنيم، عبد الله يوسف، البراكين والحرثات في التراث العربي، الجمعية الجغرافية الكويتية، جامعة الكويت، رسائل جغرافية 117-، سبتمبر، الكويت، 1988م.





فلوطرخس، في الآراء الطبيعية التي ترصّى بها الفلاسفة، ترجمة: قسطا بن لوقا، راجعها وحققها: عبد الرحمن بدوي، دار القلم، بيروت. 1980م.

الفيروز آبادي، مجد الدين، المغانم المطابة في معالم طابة، ط1، ج1، مركز بحوث ودراسات المدينة المنورة، المدينة المنورة، 2009م.

القزويني، زكريا بن محمد، آثار البلاد وأخبار العباد، إعادة طبعة جوتنجن، نشر فردناند فستفيلد، منشورات معهد تاريخ العلوم العربية والإسلامية، جامعة فرانكفورت، 1848م.

القزويني، زكريا بن محمد، عجائب المخلوقات وغرائب الموجودات، تحقيق ومراجعة: سعد كريم الفقي، وكرم السيد الأزهرى، دار ابن خلدون، الإسكندرية، (د.ت).

ابن كثير، أبو الفداء، البداية والنهاية، تحقيق: عبد الله بن عبد المحسن التركي، ط1، ج1، دار هجر للطباعة والنشر والتوزيع والإعلان، القاهرة، 1997م.

الكرخي، أبو بكر، أنباط المياه الخفية، ط1، مطبعة دار المعارف، حيدر آباد الدكن، 1892م.

المسعودي، أبو الحسن، أخبار الزمان، ط2، المكتبة الحيدرية، النجف الأشرف، 1966م.

المسعودي، أبو الحسن، مروج الذهب ومعادن الجوهر، ج1، ط1، اعتنى به وراجعته: كما حسن مرعي، المكتبة العصرية، صيدا-بيروت، 2005م.





مطر، أنيس، الزلازل عند ابن سينا، أبحاث الندوة العالمية السادسة لتاريخ العلوم عند العرب، رأس الخيمة، منشورات معهد التراث العلمي العربي، جامعة حلب، 1999م.

ابن ملكا البغدادي، هبة الله، المعتبر في الحكمة الإلهية، ط1، ج2، تحت إدارة جمعية دائرة المعارف العثمانية، حيدر آباد الدكن، 1939م.

المنبجي، محبوب بن قسطنطين، كتاب العنوان (تاريخ محبوب)، كتبه لنفسه سعيد بن أبي البدر يوحنا بن عبد المسيح، ج1، باريس، 1909م.

مؤلف مجهول، قول في الرعد والبرق من كتاب المحصل، ضمن مجموع بعنوان (Fuṣūl Abuqrāt. Faṣl fī qaḍāyā Buqrāt fī al-‘alāmāt al-dāllah ‘alā al-mawt ... etc) في مكتبة جامعة برنستون.

مؤلف مجهول، كتاب يشتمل على الآثار العلوية، كتاب ضمن مجموع، [Ahlwardt no. 5734; We1813]، في مكتبة الدولة ببرلين.

الوزير، عبد الله بن علي، تاريخ طبخ الحلوى وصحاف المن والسلوى المعروف بتاريخ اليمن، تحقيق: محمد عبد الرحيم جازم، ط2، ج1، دار المسيرة، بيروت، 1985م.





المراجع الأجنبية

- Agnew, Duncan, (2002), History of Seismology, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, La Jolla.
- Aki, K. and Richards, P., 1980. Methods of Quantitative Seismology, Freeman, California.
- Bache, T. C. (1982). Estimating the yield of underground nuclear explosion. Bull. Seism. Soc. Am., 72: S131–S168.
- Bolt, B.(1993), ‘ Earthquakes ‘, . Freeman and Company, New York, 331P.
- Bormann, P. (2002). New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), IASPEI. Geo Forschungs Zentrum, Potsdam.
- Bormann Peter, E. Robert Engdahl, and Rainer Kind (2012). Seismic Wave Propagation and Earth models. Version December 2012; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch2)
- Bormann Peter, Klaus Klinge and Siegfried Wendt (2012). Data Analysis and Seismogram Interpretation.
- Bullard, Fred. M, (1962) Volcanoes in History, University Of Texas Press, Texas.





Bullen, K.E. and Bolt, B.A., 1985. An introduction to the theory of seismology, 4th ed., Cambridge Univ. Press, U.K.

Day, S. M., N. Rimer, and J. T. Cherry (1983). Surface waves from underground explosions with spall: Analysis of elastic and nonlinear source models. Bull. Seism. Soc. Am., 73: 247–264.

De Boer, Jelle Zeilinga, & Sanders, Donald Theodore, (2002) Volcanoes in Human History, Princeton University Press, Princeton.

Flynn, E. C., and B. W. Stump (1987). Effects of source depth on near source seismograms. J. Geophys. Res. (to appear).

Harrigan, Peter, (2006), Volcanic Arabia, March/April, Vol. 57 No.2, Saudi Aramco World, Houston.

Howell Jr., Benjamin F., (1990), An Introduction to Seismological Research, Cambridge University Press, Cambridge.

Kayal, J.R., 1986. Analysis of strong phases other than P and S from a micro-earthquake survey in the Wellington region, New Zealand. Bull. Seism. Soc. Am., 76: 1347-1354.

Kayal, J.R. Zhao, D., Mishra, O.P., De, Reena and Singh, O.P. 2002. The 2001 Bhuj Earthquake: Tomography evidence for fluids at hypocenter and its implications for rupture nucleation, Geophys. Res. Lett., 29 (24): 5.1-5.4.





- Kennett, B.N.L. and Engdahl, E.R., 1991. Travel times for global earthquake location and phase identification, *Geophys. J. Int.*, 106, 429-465.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R. and Buland R., 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times. *Geophys. J. Int.*, 122, 108-124.
- Kozák, J. & Čermák, V., (2010), *The Illustrated History of Natural Disasters*, Springer Science+Business Media B.V.
- Lay, Thorne and Wallace, Terry, C. 1995. *Modern Global Seismology*, Academic Press, New York, USA, 521 p.
- Massé, R. P. (1981). Review of seismic source models for underground nuclear explosions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71: 1249–1268.
- McEvelly, T. V., and W. A. Peppin (1972). Source characteristics of earthquakes, explosions, and afterevents. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 31: 67–82.
- Minster, B. J. (1985). Twenty-five years of source theory. In Ann U. Kerr, ed., *The Vela Program—A Twenty-five Year Review of Basic Research*. Executive Graphic Services, Defense Advanced Research Projects Agency, Rosslyn, Virginia, 67–116.
- Roessler, D., Krueger, F., Ohrnberger, M., and Ehlert, L. (2010). Rapid characteristics of large earthquakes by multiple seismic broadband arrays. *Nat. Hazards Earth. Syst. Sci.*, 10, 923-932, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/923/2010/.





- Romanowicz, Barbara, & Dziewonski, Adam, (2007), Seismology and the Structure of the Earth, Elsevier, Amsterdam.
- Rost, S., and Thomas, C. (2002). Array Seismology: Methods and applications. Rev. Geophys., 40, (3), 1008, doi: 10.1029/2000RG000100.
- Rost, S., and Thomas, C. (2009). Improving seismic resolution through seismic arrays. Surv. Geophys., 30, 271-299, doi: 10.1007/s10712-009-9070-6.
- Schweitzer, J. (2003). NORSAR's event warning system (NEWS). NORSAR Sci. Rep., 1-2003, 27-31.
- Schweitzer, J. (2003). NORSAR's event warning system (NEWS). NORSAR Sci. Rep., 1-2003, 27-31.79.
- Schweitzer, J., and Krüger, F. (2011). Foreword (special issue "Array seismology in Europe: recent developments and applications"). J. Seismology, 15, (3), 429-430, doi: 10.1007/s10950-011-9241-z.
- Schweitzer, J., and Kväerna, T. (2002). Design study for the refurbishment of the SPITS array (AS72). NORSAR Sci. Rep., 2-2002, 65-77.
- Sigurdsson, Haraldur, (2000), Encyclopedia of Volcanoes, Academic Press, San Diego.
- Taub, Liba, (2003), Ancient Meteorology, Routledge, London.
- Wadati, K. 1933. On the travel time of earthquake waves, Part II, Geophys. Mag., 7: 101-111.





مراجع على الشبكة

[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Boris_Borisovich_Galitzine\)](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Boris_Borisovich_Galitzine)

<https://en.wikipedia.org/wiki/Titus>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Giant%27s_Causeway\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Giant%27s_Causeway)

<https://theo.kuleuven.be/apps/press/theologyresearchnews/2020/12/04/manuscripts-the-mundus-subterraneus-of-athanasius-kircher>





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 الأرضية 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 والأمريكية ومعهد ماكس بلانك الألماني.

الاستشارات والعضويات

- مستشار مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية.
- مستشار هيئة المساحة الجيولوجية وهيئة المساحة العسكرية والدفاع المدني.
- مستشار مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة.
- مستشار هيئة الرقابة النووية والإشعاعية.
- باحث رئيس في عدة مشاريع بحثية مدعمة من مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية وشركة أرامكو.
- باحث رئيس في مشاريع مدعمة من وزارة الطاقة الأمريكية وجامعة كاليفورنيا ومعهد 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 الأمريكية.
- ضمن قائمة (المنجزون البارزون العرب) من قبل 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 علمياً 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 وورشنة 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 عبد العزيز للعلوم والتقنية عام 2006 م.
- ❖ حصل على جائزة أبها التقديرية للإسهامات العلمية عام 2007 م.
- ❖ حصل على جائزة جامعة الملك سعود للتميز العلمي عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة الاتحاد الأمريكي 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 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.

درع التكريم

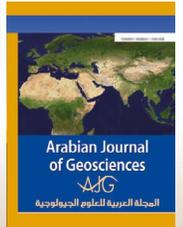
- ❖ حصل على 85 درعاً تكريمياً وشهادات تقدير من المملكة وعمان والكويت والإمارات والأردن ومصر وتونس والجزائر وألمانيا وأمريكا.

المنجزون البارزون العرب

Dr. Abdullah M.S. Al-Amri

Geophysicist & Seismologist

SAUDI ARABIA 117





موسوعة أمري في علوم الأرض

Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences



6
المد
والجزر



5
المعادن
والتعدين



4
التركيب
الداخلي للأرض



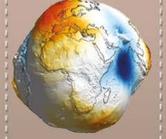
3
الاجاذبية
الأرضية وتطبيقاتها



2
شكل
الأرض وحركتها



1
تقدير
عمر الأرض



12
الأغلفة
المحيطة بالأرض



11
جيولوجية
القمر



10
البراكين
وسبل مجابقتها



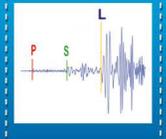
9
تقييم
مخاطر الزلازل



8
الزلازل
والتفجيرات



7
موجات
التسونامي



18
التصحّر
والجفاف



17
السيول
والسدود المائية



16
الانزلاقات
والانهيارات والفيضانات



15
التشجير
التحديات والحلول



14
التغيرات المناخية
والاحتباس الحراري



13
المشاكل
البيئية وحلولها



24
كتابة الرسائل
والمشاريع الجيولوجية



23
الجيولوجيا
الطبيعية



22
الجيوفيزياء
النووية



21
الجيولوجيا
السياسية



20
الطاقة
الحرارية الأرضية



19
هل انتهى
عصر النفط؟



300 سؤال وجواب
في الجيوفيزياء
التطبيقية



303 سؤال وجواب
في علم الزلازل
والزلزالية الهندسية



380 سؤال وجواب
في المخاطر
الجيولوجية



358 سؤال وجواب
في الثروات
الطبيعية



325 سؤال وجواب
في علم الصخور
والجيوكيمياة



321 سؤال وجواب
في تطور
الأرض

