

Manara university

Faculty of engineering

Department of civil engineering



جامعة المنارة

كلية الهندسة

قسم الهندسة المدنية

# مقرر جيولوجيا هندسية لطلاب الهندسة المدنية

مدرس المقرر

د.م. مهند سليم مهنا

## ❖ Earthquake Engineering

الهندسة الزلزالية هي فرع حديث من الهندسة يهتم:

- بدراسة كيفية حدوث الزلازل
- أثر الزلازل على الناس والبيئة المحيطة
- تخفيف الأضرار الزلزالية وتأطير عملية تصميم المنشآت المقاومة للزلازل.

لا يقتصر علم الهندسة الزلزالية على معرفة المكان المحتمل لحدوث الزلازل بل يشمل أيضاً:

- تعيين طبيعة الحركات الأرضية المتولدة ونوع التشوه الذي تعانيه الطبقات العليا من القشرة الأرضية
- معرفة وتخمين أقصى درجات الاهتزاز التي ستعرض لها المنشآت عند حصول الزلازل وصولاً بالنتيجة إلى وضع أسس محددة لتصميم ملائم بأقل كلفة ممكنة.

# ❖ لمحة تاريخية عن الزلازل

الزلازل = دمار + موت + نتائج اقتصادية كارثية



## ❖ متى نقول عن زلزال أنه خطير؟؟

- عدد الضحايا كبير
  - النتائج الاقتصادية المترتبة على الزلزال تكون هائلة رغم أن عدد الضحايا البشرية قد يكون منخفض نسبياً.
- على سبيل المثال، لاحقاً للزلزال الذي حدث في سورية وتركيا بتاريخ 6 شباط 2023 والذي قدرت شدته ب  $M_w=7.8$ ، فقد قدرت الخسائر الاقتصادية في سورية بما يزيد عن 5 مليار دولار وتجاوز عدد الضحايا 6000 شخص.
- بلغ إجمالي عدد المباني المهتمة والآيلة للسقوط 4700 مبنى، وتجاوز عدد المباني المتضررة جزئياً 44000 مبنى.

عدد القتلى التقديري	الشدة	تاريخ حدوثه	مكان حدوث الزلزال
230 000	8.5	1138	حلب (سوريا)
30 000- 1000 000	7.6	1202	جنوب غرب سوريا
830 000	8	1556	Shensi (الصين)
70 000	8.6	1755	لشبونة (البرتغال)
160 000	7.5	1908	Messine (إيطاليا)
12 000	5.9	1960	أغادير (المغرب)
5000	9.5	1960	تشيلي
1000	6.1	1963	Skopje (يوغسلافيا)
255 000	7.8	1976	Tangchan (الصين)
3500	7.1	1980	El Asnam (الجزائر)
4500	6.9	1980	Irpina (إيطاليا)
10 000	8	1985	مكسيكو (المكسيك)
17 000	7.4	1999	ازميت (تركيا)
80 000	7.6	2006	باكستان
300	6.2	2016	تورونتو (إيطاليا)
60000	7.8	2023	زلزال غازي عنتاب (تركيا وسورية)

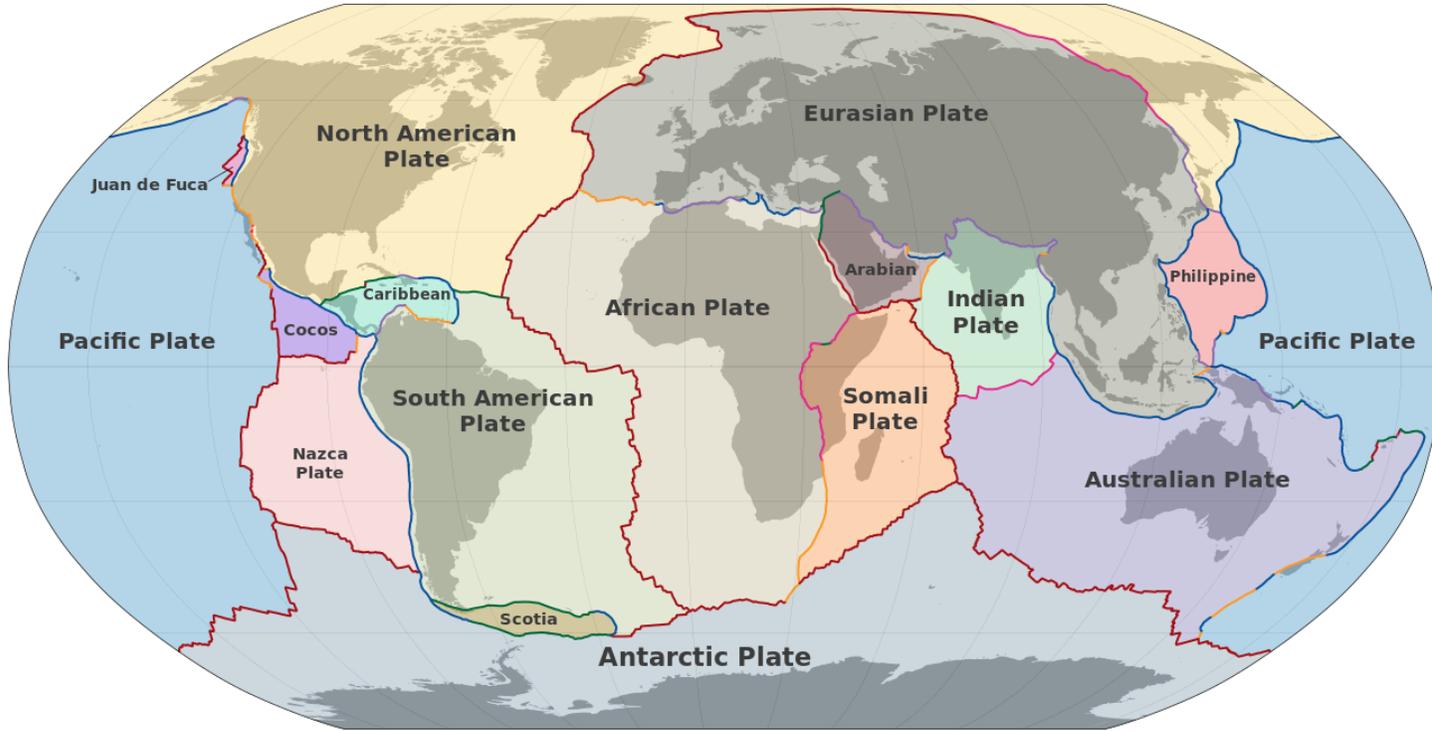


وقع زلزال حلب بالقرب من مدينة حلب شمالي سوريا في 11 تشرين الأول عام 1138م. يعتبر من أكثر الزلازل دموية في التاريخ وغالباً ما يتم سرده كثالث زلزال مميت في التاريخ بعد زلازل شانشي و تانغشان في الصين. بلغ عدد الضحايا الذين سقطوا بسببه 230,000 قتيلاً، **وقُدِّرت** شدة الزلزال بـ 8.5 درجة على مقياس ريختر.

عام 1202 حصل زلزال مدمر آخر في جنوب غرب سورية ممتداً لشمال مصر ووصلت آثاره لتركيا وشمال قبرص. قدر عدد الضحايا بين 30000 إلى ما يزيد عن مليون. تسبب الزلزال بدمار مدن بأكملها لتصبح أطلالا منسية كما أدى لحدوث فيضانات دمرت المحاصيل الزراعية ومخازن الطعام وتسبب بوحدة من أقسى حالات المجاعة والجوع في المنطقة.

## ❖ أسباب المحتملة لحدوث الزلازل

### نظرية تبعثر القارات والصفائح التكتونية

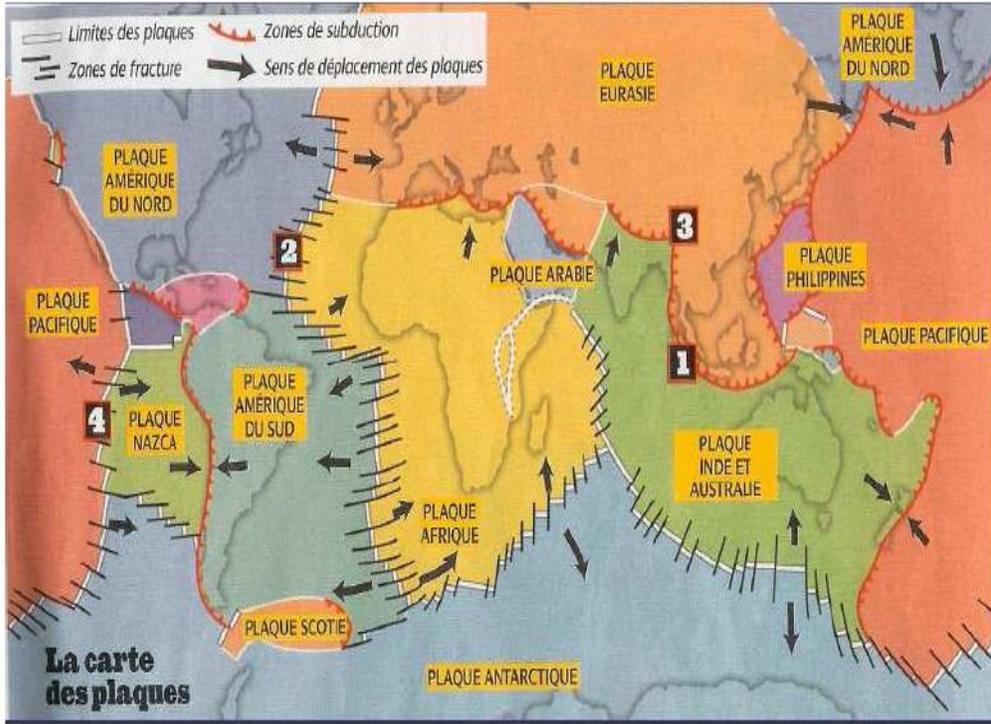


ينقسم السطح العلوي من الأرض (قشرة ومانتل علوي) ويتجزأ إلى من عدد من الكتل الصخرية العملاقة تسمى بالصفائح التكتونية تتحرك بالنسبة إلى بعضها، وهي:

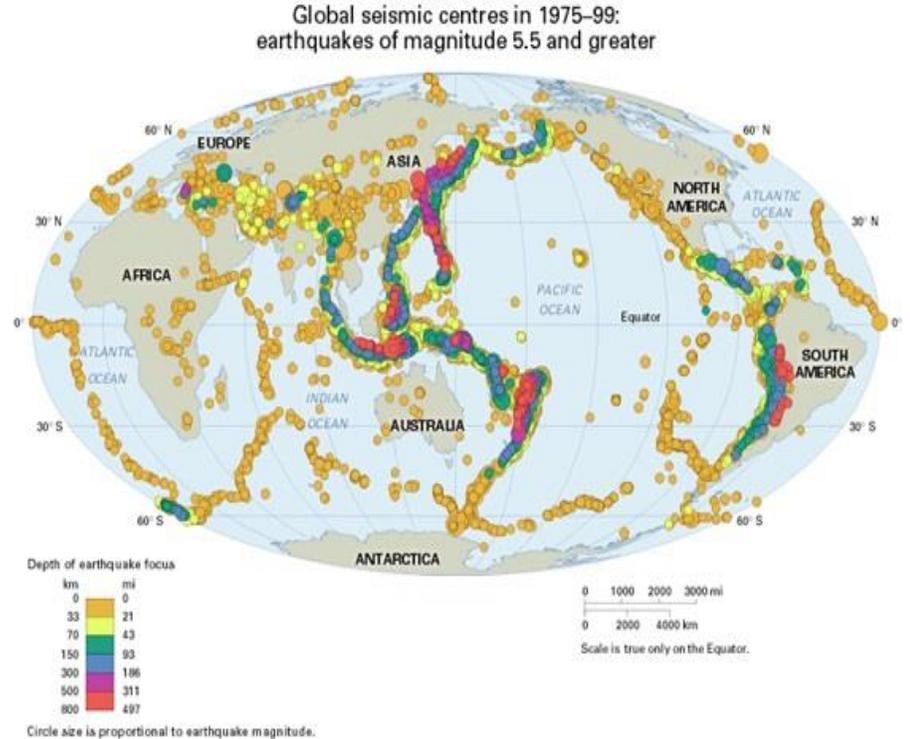
- **7 صفائح أساسية قارية** (الإفريقية، الأوراسية، الأمريكيتين، الأسترالية-الهندية، القطبية الجنوبية و صفيحة المحيط الهادي)
- **14 صفيحة فرعية** (منها الصفيحة العربية والصومالية والفلبينية والكاريبية...)، بالإضافة إلى عدد من الصفائح الصغيرة المتشكلة نتيجة انفصال أجزاء من الصفائح الأكبر حجماً عند حدود العديد من الصفائح الأساسية مثل صفيحة الاناضول.

القشرة الأرضية غير متجانسة وإنما تتألف من كتل صخرية بسماكة وسطية (100km) مفصولة عن بعضها البعض بواسطة شقوق. تؤدي الانزياحات النسبية البطيئة لهذه الكتل إلى تجمع التشوهات (طاقة كامنة كبيرة). تتراكم هذه التشوهات مع الزمن وتصل قيمتها النهائية أحياناً إلى وضع حرج مشكلة ما يسمى ببؤر الزلازل الأرضية، حيث تأخذ التشوهات بالتحول إلى شكل أمواج مرنة تنتشر عبر الأرض وتظهر على السطح بشكل زبذبات شديدة وسريعة.....الهزة الأرضية

تتركز أماكن الزلازل بالقرب من حدود الصفائح، وهذا يدعم نظرية الصفائح التكتونية

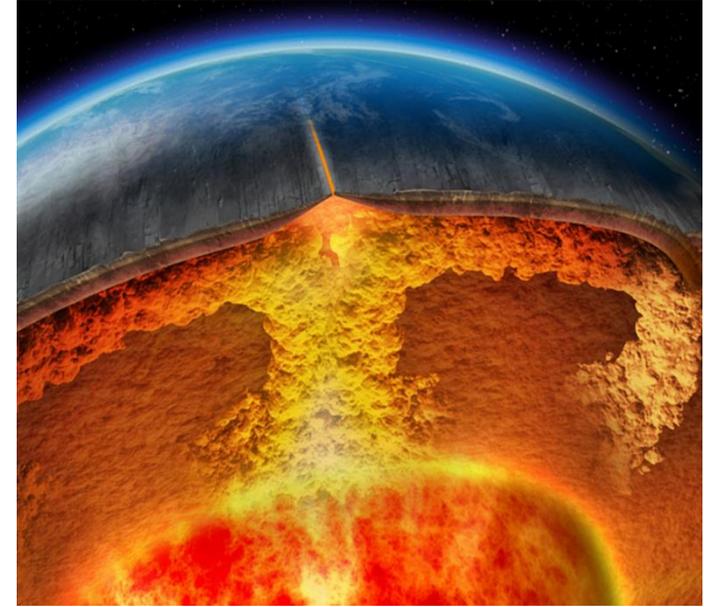
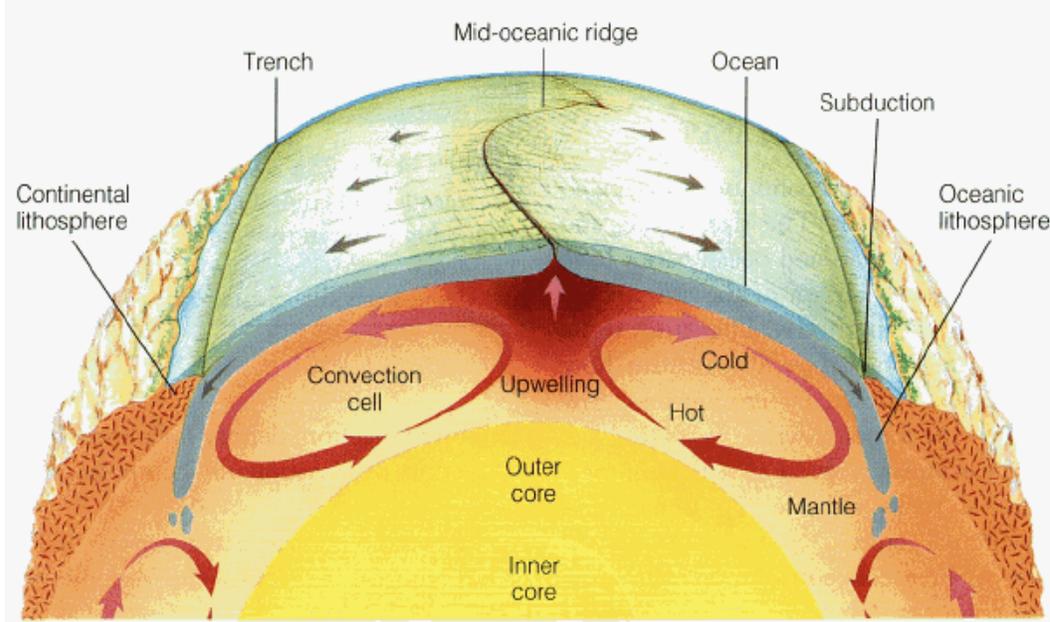


بمقارنة الشكلين نجد تركز الزلازل ذات الشدة أكبر من 5.5 عند حدود الصفائح التكتونية بين عامي (1975-2000)

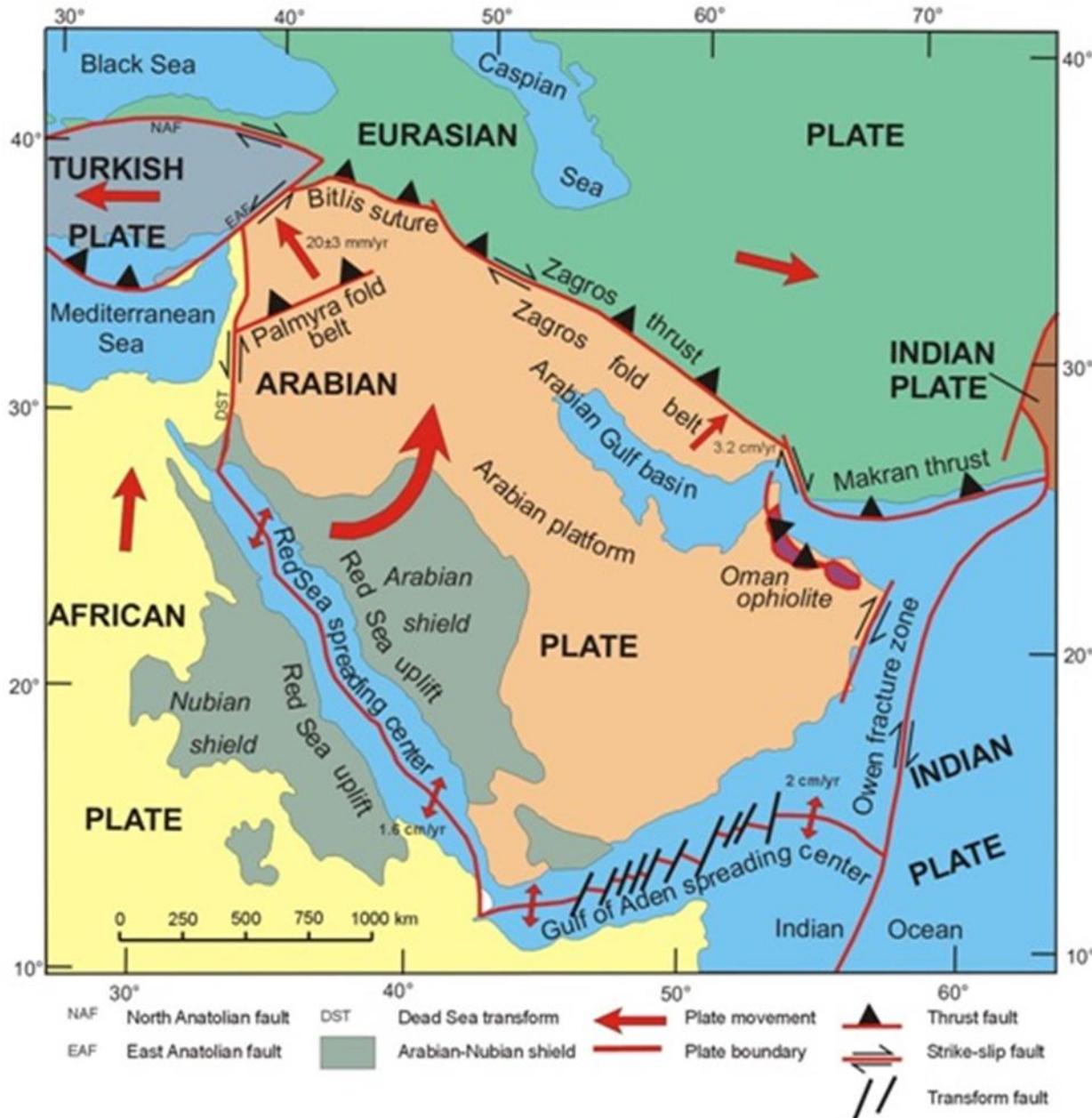


## مصدر الحركة للصفائح القارية...؟؟؟

يرتبط بمتطلبات التوازن الترموديناميكي لمواد الأرض و **ظاهرة الحمل الحراري** المانتل العلوي على تماس مع القشرة الأرضية الباردة نسبياً بينما المانتل السفلي على تماس مع النواة الخارجية الحارة. أي أن هناك بوضوح فرق في الحرارة (gradient) داخل المانتل.

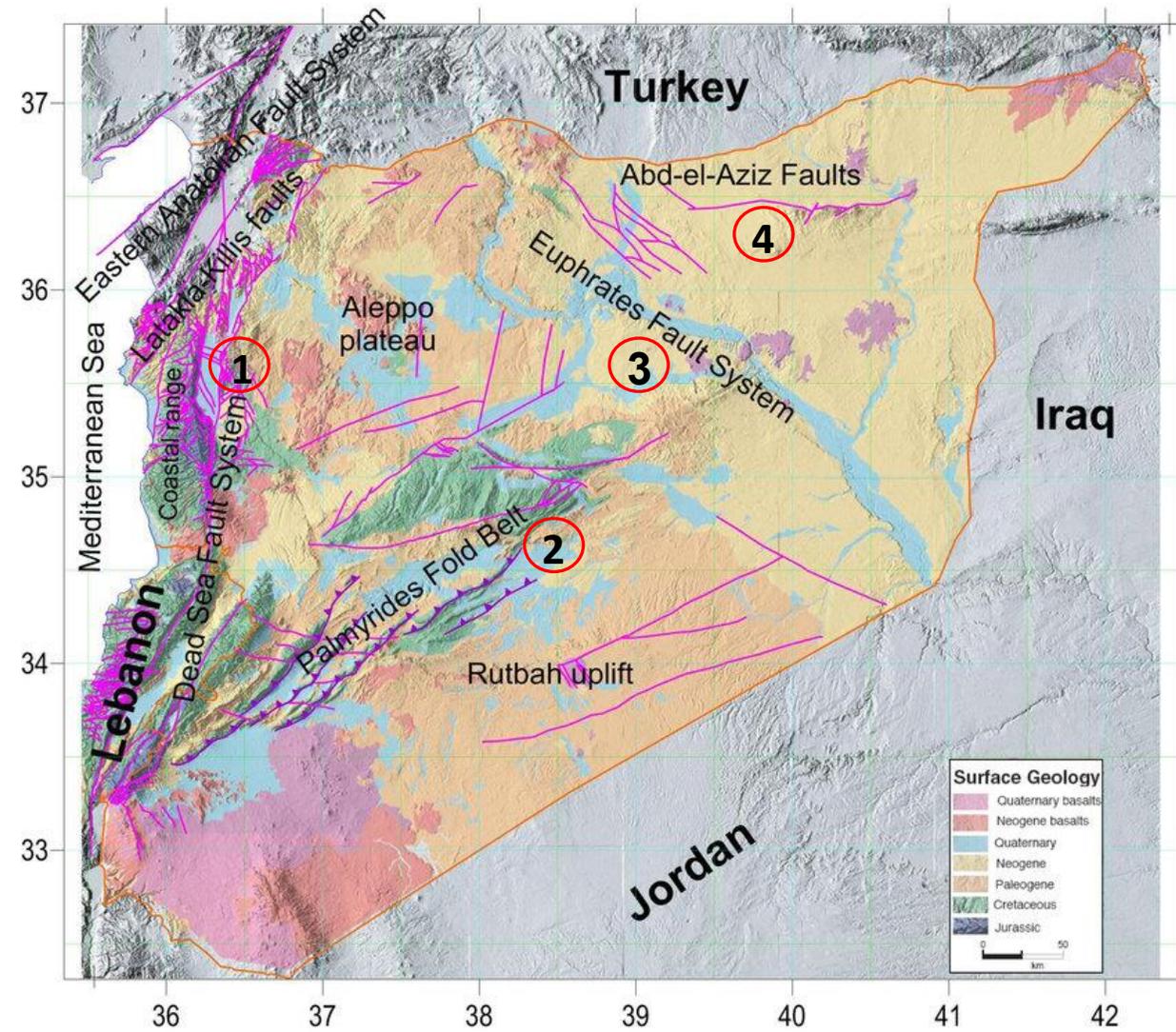


يؤدي تغير كثافة المانتل مع الحرارة إلى خلق حالة عدم استقرار لمادة أكبر كثافة (أبرد) تستند على مادة أقل كثافة (أسخن). من المحتمل أن تبدأ المادة الأكثر كثافة (الأبرد) بالنزول بينما تبدأ المادة الأقل كثافة (الأسخن) بالصعود، بعد ذلك تسخن المادة النازلة تدريجياً فتصبح أقل كثافة ومن المحتمل أن تتحرك جانبياً ثم تبدأ بالصعود. وبالنتيجة تبدأ المادة الأقل سخونة بالنزول ثانية، وتتكرر هذه العملية باستمرار. تدعى هذه الظاهرة **بالحمل الحراري (Convection)**



تقع سورية في الجزء الشمالي من الصفيحة العربية، يحدها من الغرب القسم الشمالي من صدع البحر الميت، و في الشمال تتقاطع مع نظام فالق شرق الأناضول ومنطقة بيتليس زاغروس، وكلاهما يشتمل على الحدود الشمالية للصفيحة العربية.

يعتبر نظام صدع البحر الميت من البنيات التكتونية المميزة في منطقة الشرق الأوسط، يمتد من منطقة البحر الأحمر في خليج العقبة عبر الأردن، فلسطين، لبنان، سورية، و منطقة جنوب شرق تركيا في منطقة هاتاي القريبة من مناطق شمال غرب سورية **ليشكل نقطة تقاطع ثلاثية** في هذه المنطقة مع نظام صدع شرق الأناضول و نظام قوس قبرص المرتبط مع منطقة قبرص ويرتبط بهذا القوس فالق **اللاذقية/كلّس الرئيسي**.



يمكن تقسيم سورية إجمالاً إلى أربع بنيات تكتونية رئيسية:

- (1) الامتداد الشمالي لصدع البحر الميت.
- (2) حزام الطي التدمري،
- (3) نظام فالق الفرات،
- (4) فوالق منطقة جبل عبد العزيز في الحسكة.

# الفوالق

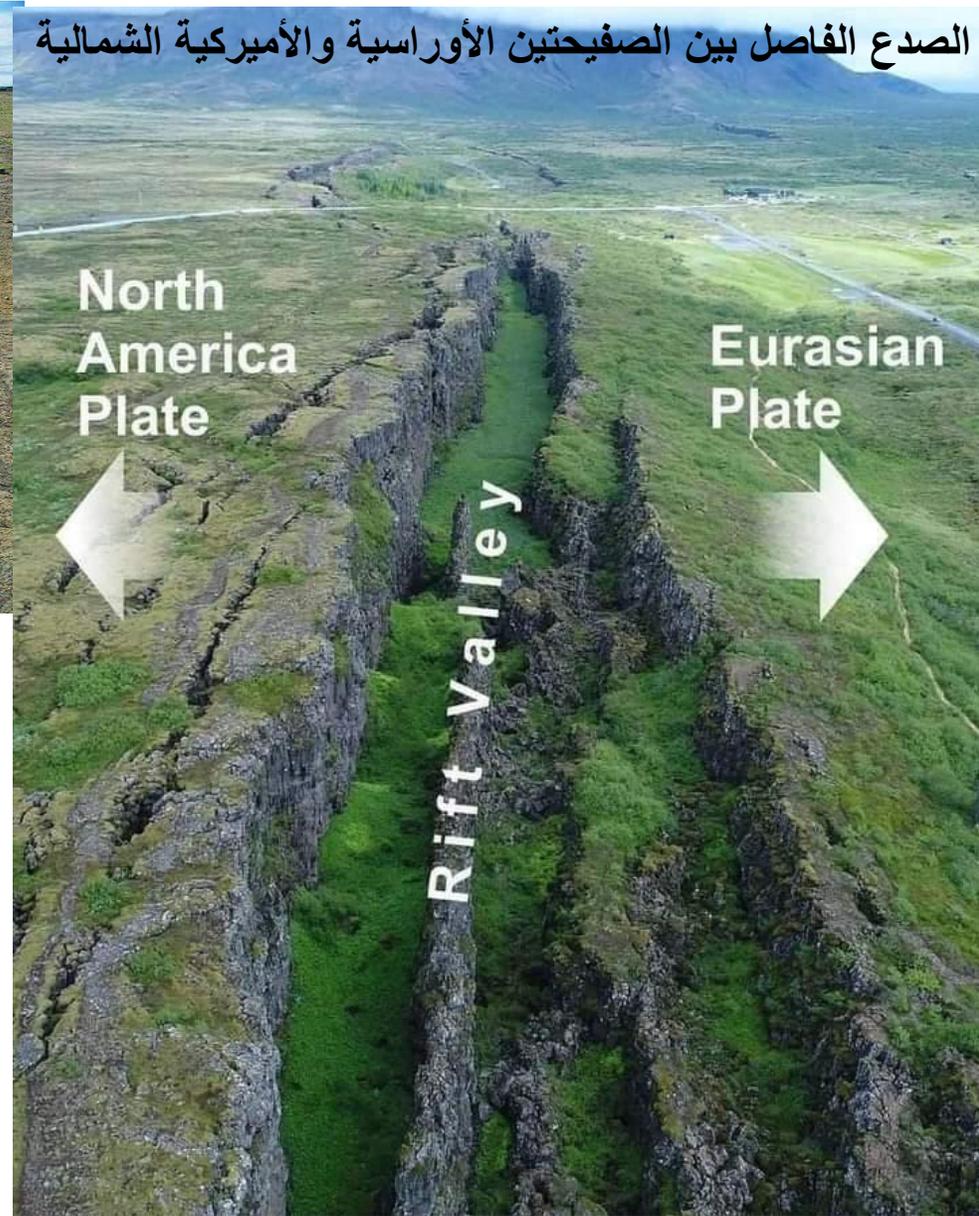
- الفالق هو تصدع أو كسر يحدث في صخور القشرة الأرضية عندما تنزلق قطاعات صخرية الواحدة عبر الأخرى بصورة متكررة.
- يتغير طول الفالق من عدة أمتار حتى مئات الكيلومترات، ويمكن أن يمتد لأعماق تصل حتى عشرات الكيلومترات.
- إن وجود الفوالق لا يعني بالضرورة أن المنطقة معرضة للزلازل فقد يكون الفالق **غير نشط** أي احتمال حدوث الزلزال عنده ضئيل جداً، وقد يكون نشطاً أي أنه مصدر محتمل للزلازل.



## فالق سان أندرياس في أميركا

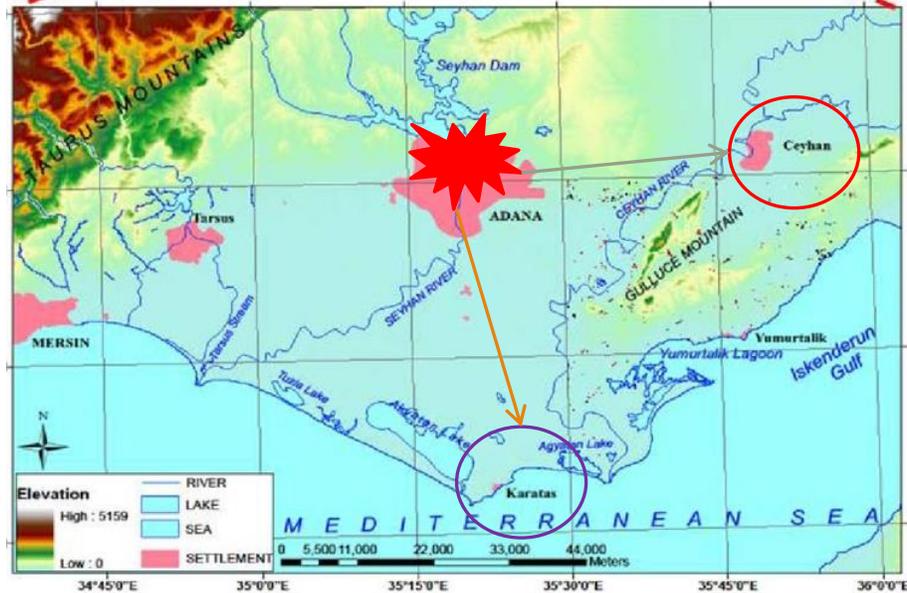


## الصدع الفاصل بين الصفيحتين الأوراسية والأميركية الشمالية



يمكن للفالق أن يكون ظاهراً  
على السطح أو غير ظاهر  
وصعب التحديد (مطمور).

- من الصعوبة بمكان تحديد البعد عن مصدر الزلزال بدقة، يتم عادة تقريب المصدر الزلزالي المرتبط بحركة الفالق وتصدعه إلى **مصدر نقطي**. يعتبر هذا التبسيط غير واقعي عملياً فمصدر الهزة أعقد من أن يعتبر نقطة فريدة بحد ذاتها. لذلك يلجأ الباحثون لاقتراح تمثيل مصدر الزلزال **بخط أو سطح**.



على سبيل المثال عند قياس تسارع الأرض الناتج عن زلزال أضنة بتركيا عام 1998 تم استخدام محطتي رصد زلزالي إحداهما في مدينة سيهان على بعد 32 km من المركز السطحي للزلزال والأخرى في مدينة كاراتاس على بعد 36 km. بلغت قيمة التسارع الأعظمي المسجل في محطة كاراتاس 0.03g في حين وصلت هذه القيمة إلى 0.27g في سيهان. يمكن أن نعزي هذا الفرق الكبير إلى أن نقطة بدء الحدث الزلزالي ومن ثم انتشار تصدعات الفالق كانت تتجه نحو مدينة سيهان مبتعدة في الوقت نفسه عن محطة كاراتاس.

## ❖ المصادر الأخرى للنشاطات الزلزالية

○ **النشاطات البركانية** : يمكن للبراكين أن تسبب زلازلاً سطحية نتيجة التشققات والانهدامات في الصخور المضغوطة واندفاع الماغما. يعد الصعود المستمر لبؤرة الزلزال (نتيجة اندفاع الماغما) مؤشراً على **صحوة البركان** وانفجاره الوشيك، على سبيل المثال حصل زلزال تبع نشاطاً بركانياً في جزر هاواي عام 1975 وقد سبب أضراراً كبيرة.

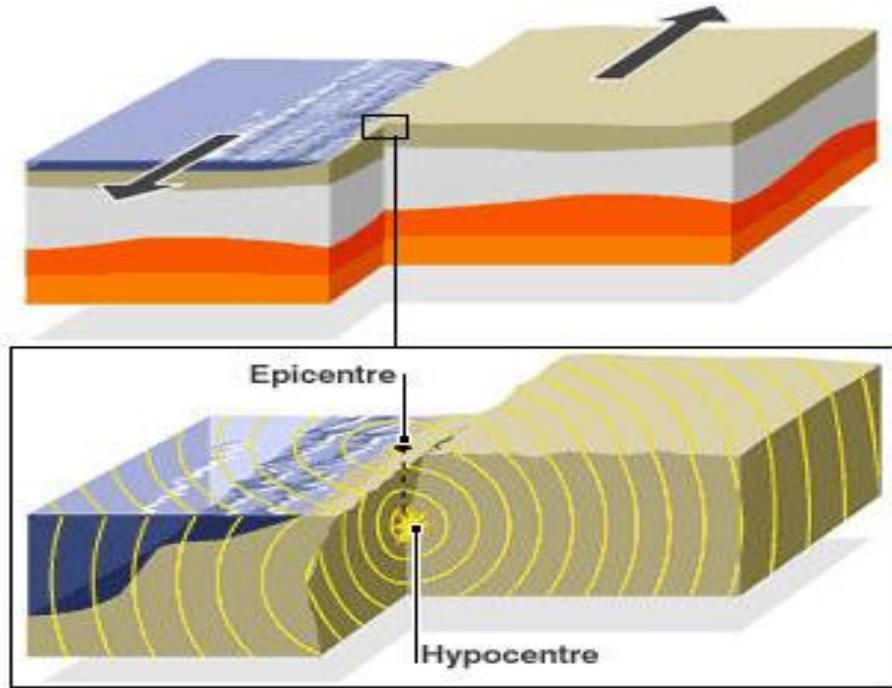
○ **التفجيرات تحت أرضية**: يمكن أن تنتج الزلازل أيضاً عن التفجيرات تحت أرضية المختلفة كالتفجيرات النووية التي تم تسجيل العديد من الزلازل نتیجتها خلال فترة الحرب الباردة.

○ **السدود** : يمكن لبناء السدود ان يحفز حدوث الزلازل. على سبيل المثال، في عام 1967 وبعد خمس سنوات من بدء ملء سد كويينا (Koyna) في الهند حصل زلزال شدته 6.5 درجة وتسبب بمقتل 177 شخص. لقد لوحظ زيادة عدد الزلازل الموضعية عند زيادة التخزين الفصلي للسدود.

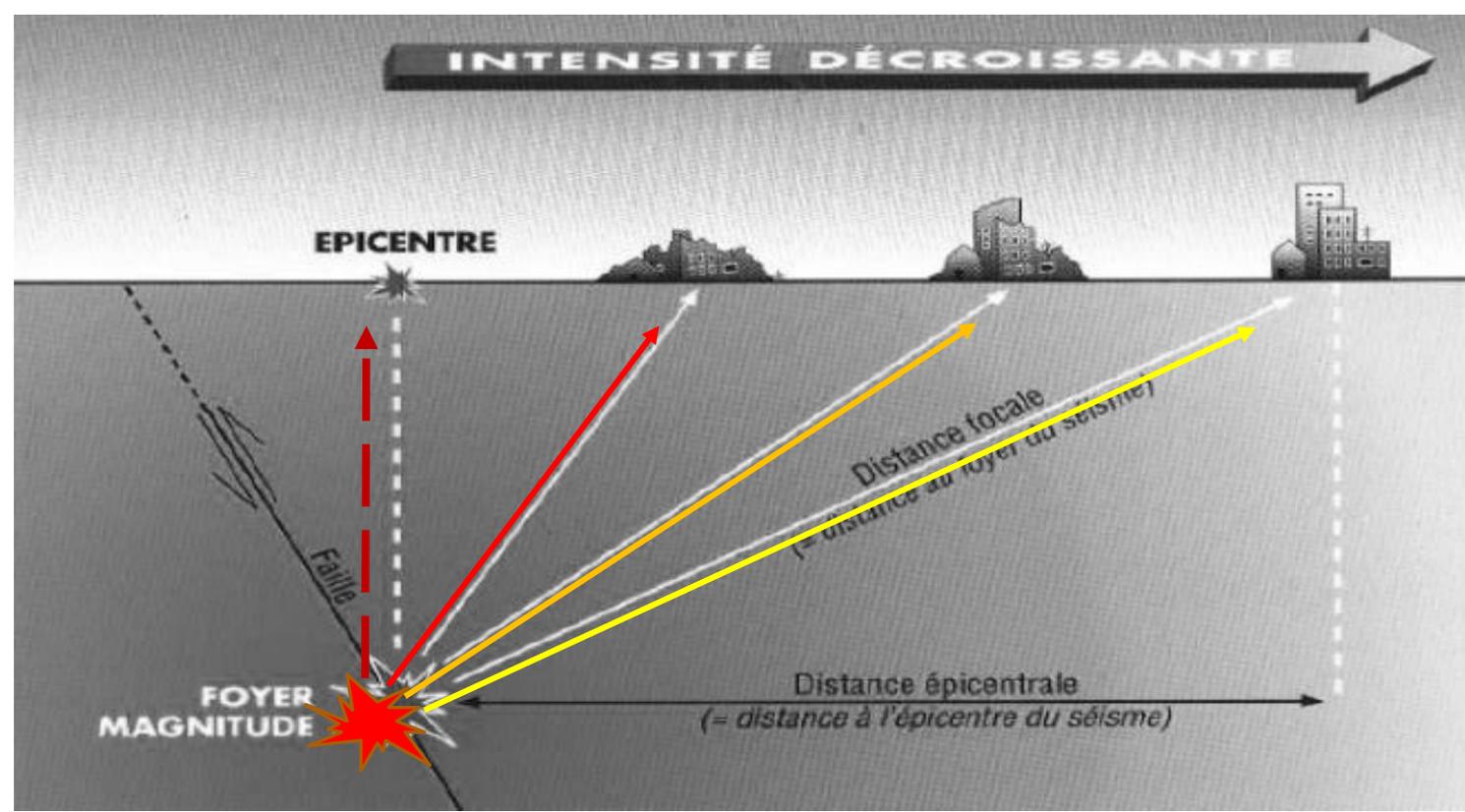
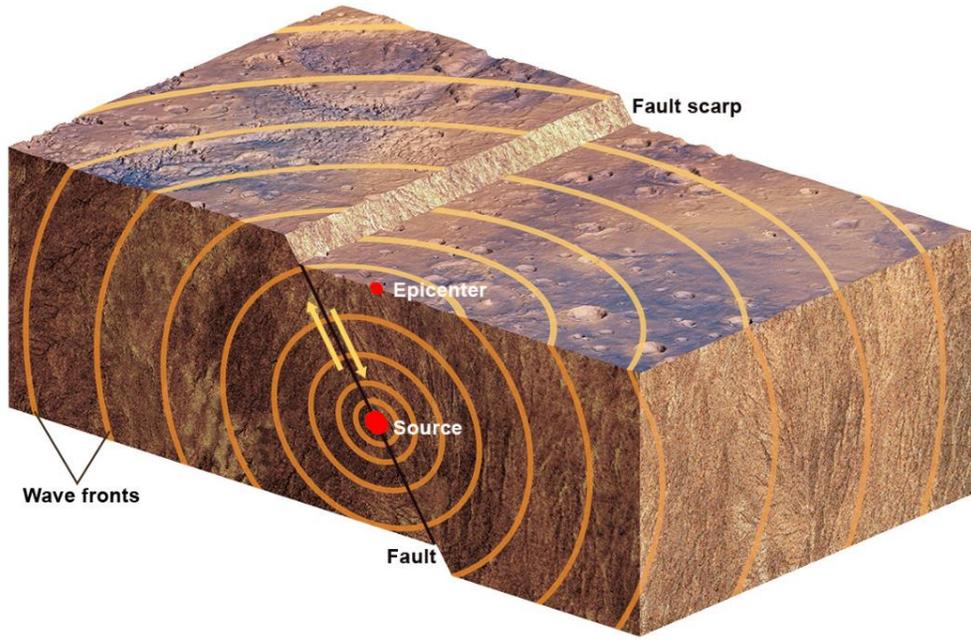
عادة لا يتم تحرير طاقة التشوهات بهزة وحيدة وإنما تحدث غالباً هزات متعددة قبل أن تأخذ الطبقات الأرضية وضعية جديدة مستقرة. لهذا السبب نشعر غالباً **بهزات ارتدادية** بعد الهزة الأساسية بشدات متناقصة ولمدة تتراوح من بضع أيام إلى بضعة أشهر أحياناً. بحسب قانون (Bath) فإن الشدة الأعظمية للهزات الارتدادية تكون أقل من الزلزال الرئيسي بحدود (1.1-1.2) مرة.

## ❖ تعريف أساسية ( الزلازل، البؤرة، العمق البؤري، ... )

تنتج التشوهات النسبية في منطقة ضيقة قرب الحدود الفاصلة بين الصفائح، ويمكن أن تتم ببطء وبشكل مستمر (تشوهات غير سيسمية)، أو بشكل مفاجئ ومتقطع على شكل زلازل.



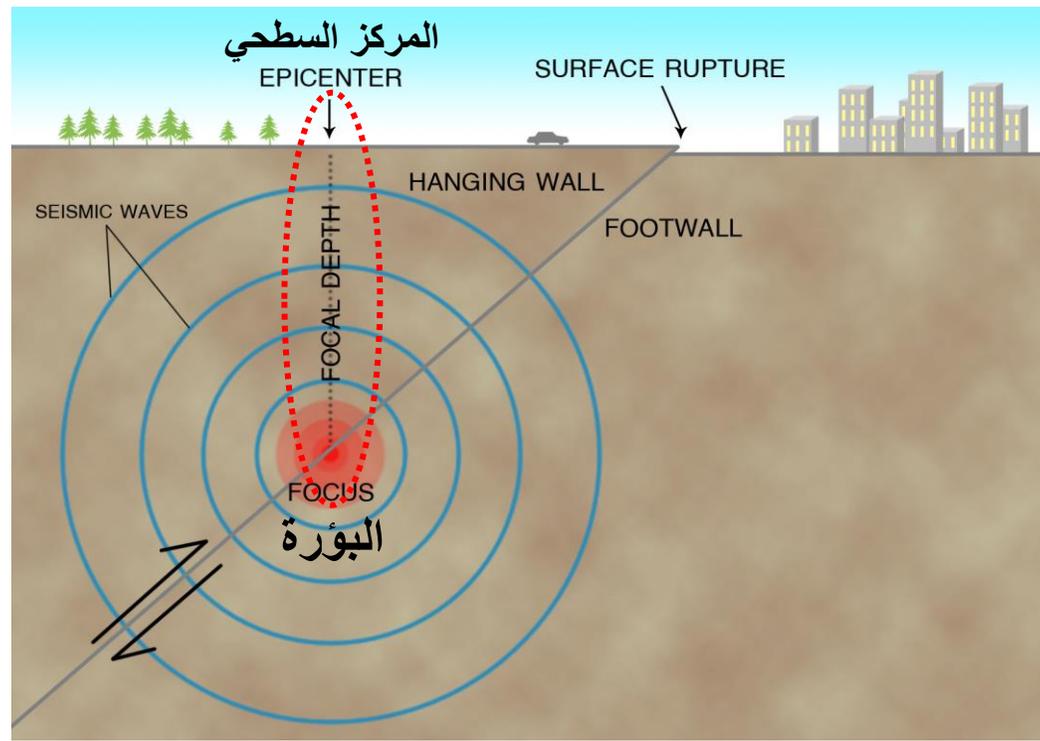
**الزلازل** هو اهتزاز لسطح الأرض يتولد نتيجة للتحرير المفاجئ لطاقة التشوهات المتجمعة في القشرة الخارجية للأرض (Crust) أو في الطبقة التي تحتها حيث تنتشر هذه الاهتزازات وتصل إلى سطح الأرض مولدة حركة سطح الأرض التي هي مصدر الأضرار.



**بؤرة الزلزال أو المحرق (Hypocenter/Focus):** النقطة (الموضع) التي يتولد فيها الزلزال ويبدأ منها انتشار الأمواج الاهتزازية الزلزالية ويمكن أن تقع ما بين سطح التربة وعمق يصل أحياناً إلى 700 km في حالة الزلازل العميقة.

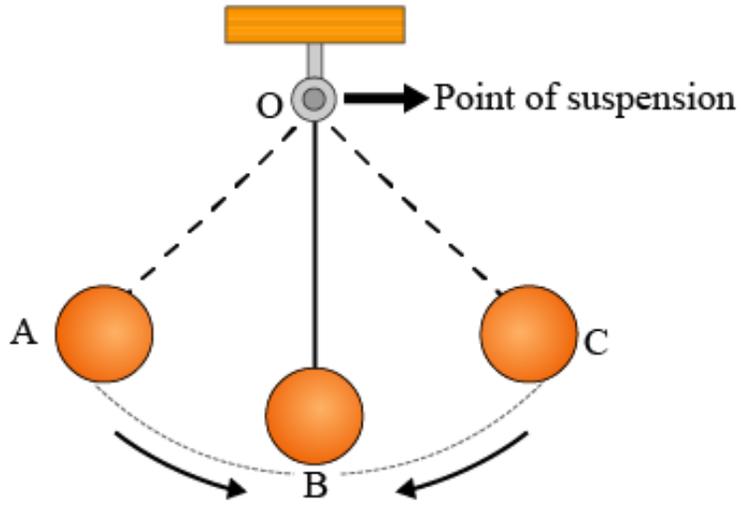
**المركز السطحي للزلزال (Epicenter):** النقطة على سطح الأرض مباشرة فوق البؤرة (أو المسقط الشاقولي لبؤرة الزلزال على سطح التربة) وعادة ما تحدث فيها الحركة الزلزالية الأكبر مطالاً (سعة).

في الحياة العملية، يتم استخدام مركز الزلزال السطحي أكثر من بؤرة الزلزال عند توصيف الزلازل.



**العمق البؤري (Focal depth) :** هو المسافة الشاقولية ما بين بؤرة الزلزال والمركز السطحي للزلزال. تقسم الزلازل حسب العمق البؤري إلى:

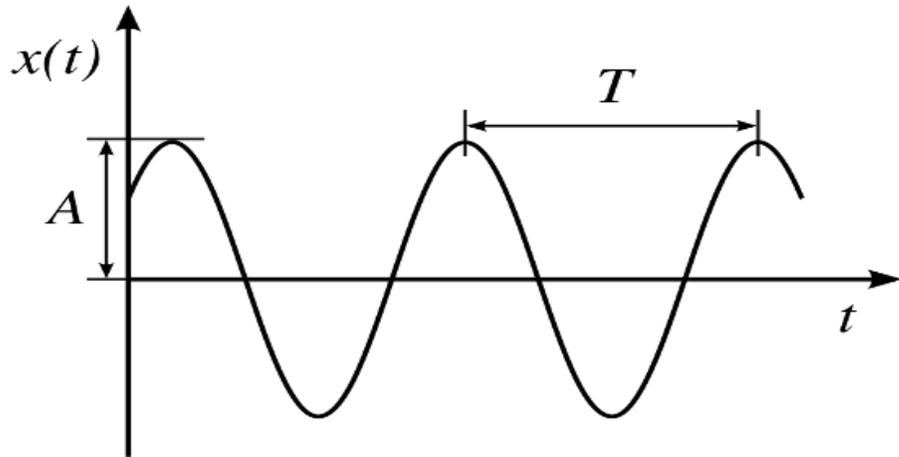
- زلازل سطحية: عمق البؤرة 0-70 km وتشكل 75% من مجموع الزلازل.
- زلازل متوسطة: عمق البؤرة 70-300 km وتشكل 22% من مجموع الزلازل.
- زلازل عميقة: عمق البؤرة 300-700 km وتشكل 3% من مجموع الزلازل.



**الدور (T):** هو الزمن الذي تقوم فيه الحركة باهتزاز كامل لتعود إلى وضعها الأصلي ويقاس عادة بالثانية.

**التردد (f):** عدد الموجات الاهتزازية أو الأدوار في واحدة الزمن وهي مقلوب الدور ( $f=1/T$ ) وتقاس بالهرتز (Hz).

**سعة الاهتزاز أو المطال:** هي المسافة التي يقطعها الجسم المهتز ابتداءً من وضع الراحة ويرمز لها بـ  $x(t)$  وهذه القيمة متغيرة مع الزمن، وعادة مايرمز للقيمة العظمى للمطال بالرمز (A)



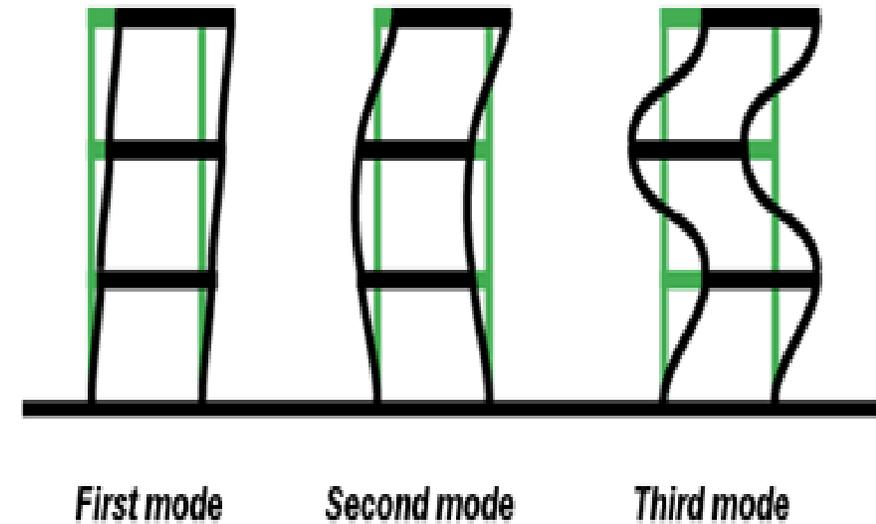
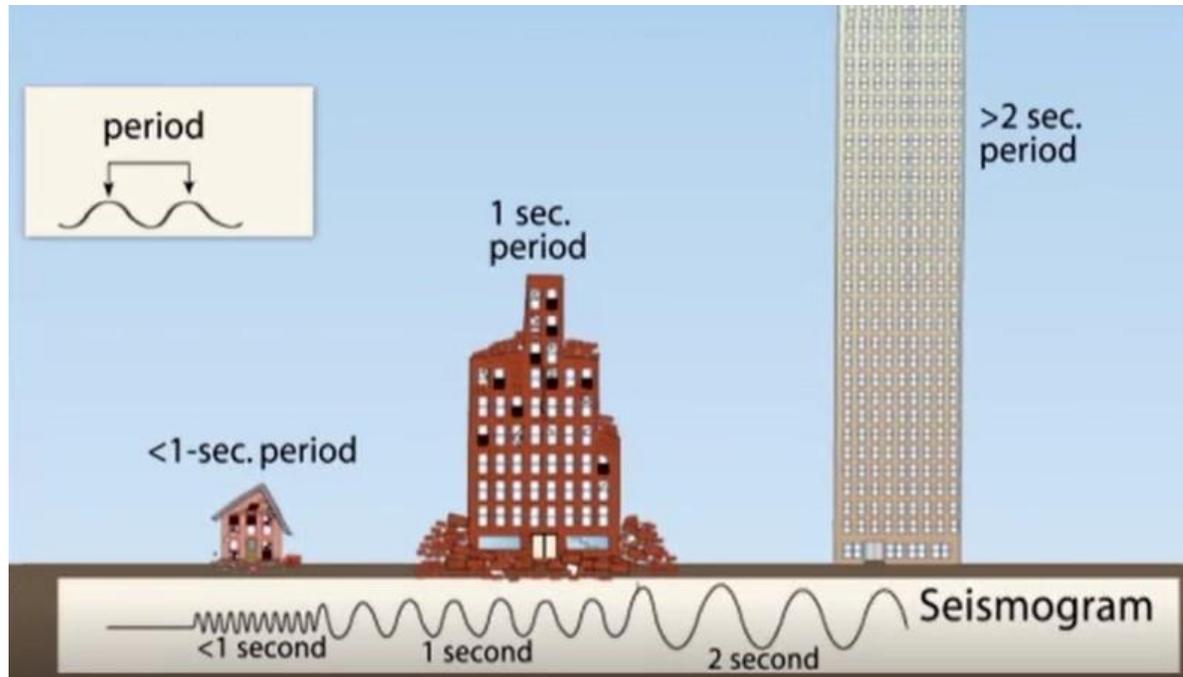
**طول الموجة:** المكافئ البعدي للدور أو المسافة التي تقطعها الموجة خلال مدة زمنية مساوية للدور.

**الدور الطبيعي:** الزمن اللازم لإتمام اهتزاز كامل لجسم ما وعودته للوضع الأصلي بغياب المحرض الخارجي

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

ويتعلق هذا الزمن بكتلة الجسم (m) وصلابته (k)

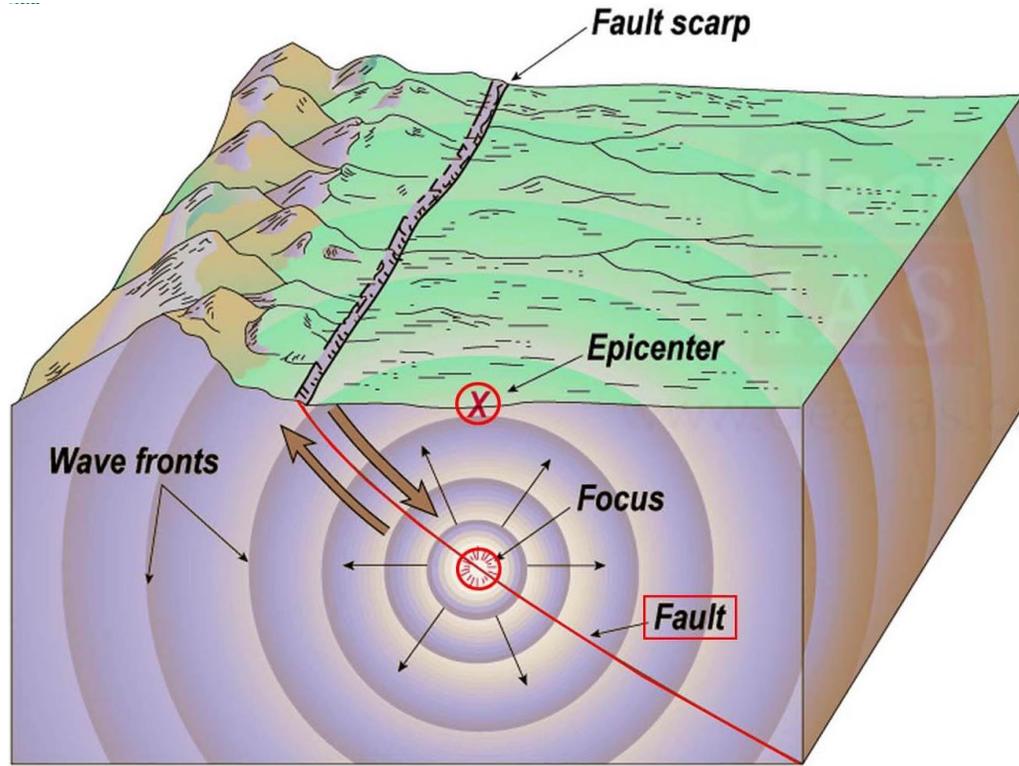
**التردد الطبيعي:** هو التردد أو عدد الدورات الاهتزازية الذي يهتز فيه جسم ما بغياب تأثير القوة المحرصة.



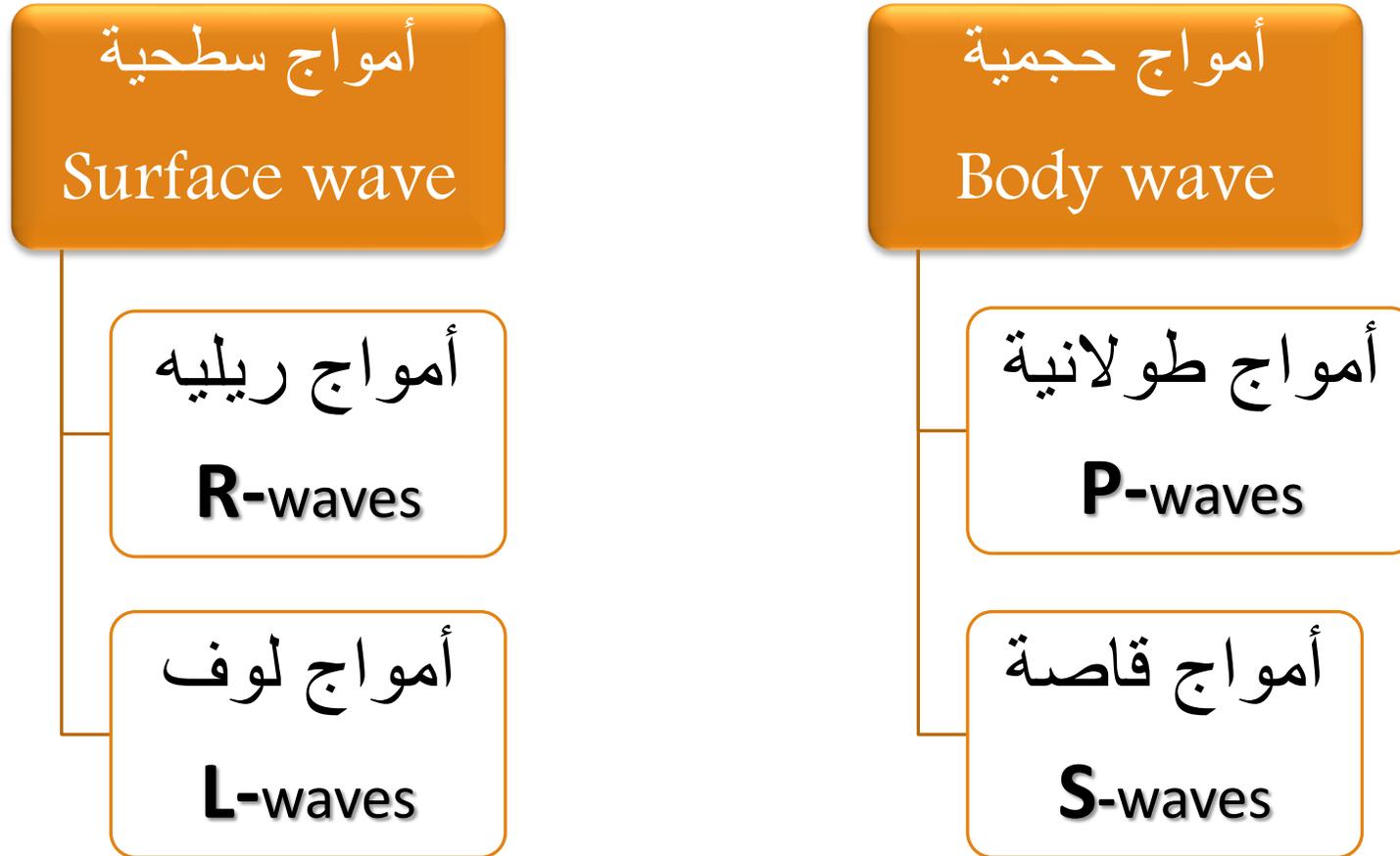
في حال توافق تردد الموجات الزلزالية مع التردد الطبيعي للمبنى يحدث تضخيم لحركة واستجابة المبنى وبالتالي ضرر زلزالي أكبر

## كيف تنتقل الطاقة الناتجة عن الزلزال عبر القشرة الأرضية؟

تنتقل من البؤرة أمواج تنتشر في كافة الاتجاهات بشكل سطوح كروية ندعوها الموجات السيسمية (Seismic waves) عندما تصل الموجات السيسمية من البؤرة إلى مركز الزلزال على سطح الأرض ينتشر من المركز موجات سطحية (Surface waves) مشابهة لطريقة انتشار الأمواج المائية على سطح مائي عند إلقاء حجر فيها، حيث تنتشر عبر دوائر متحدة المركز.



## ❖ أنواع الأمواج الزلزالية (السيسمية)



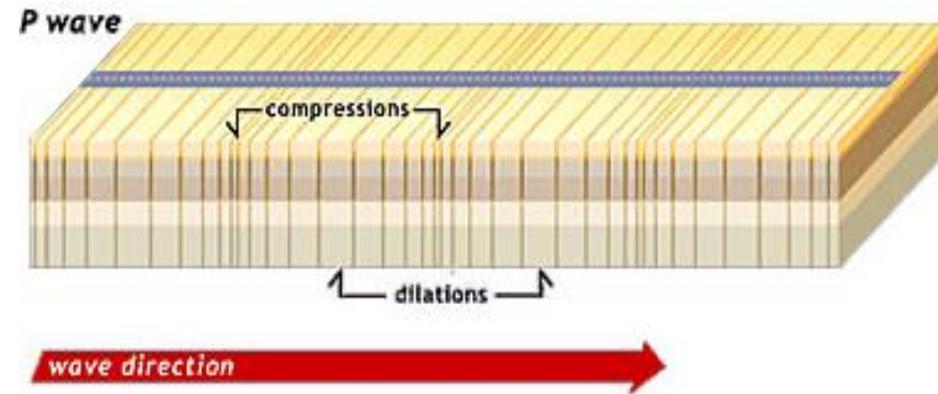
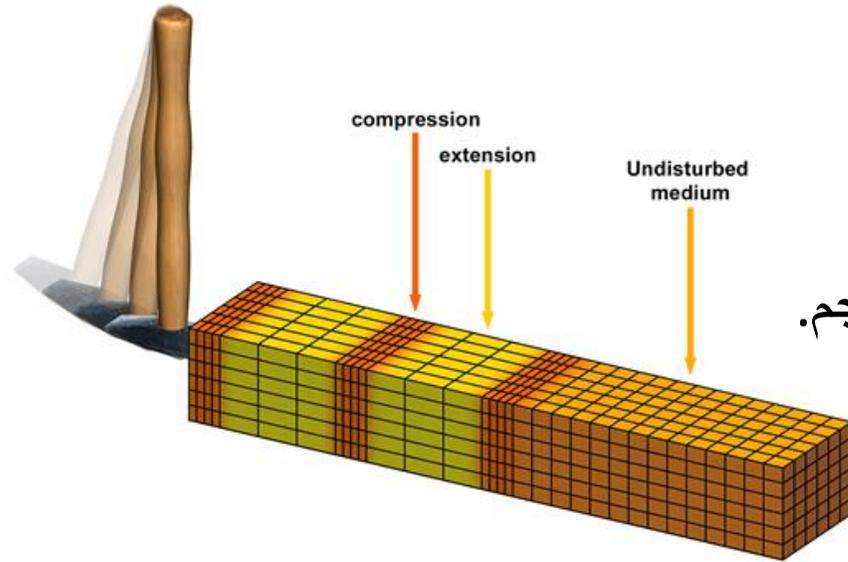
## أنواع الأمواج السيسمية وطريقة انتشارها (Seismic Waves)

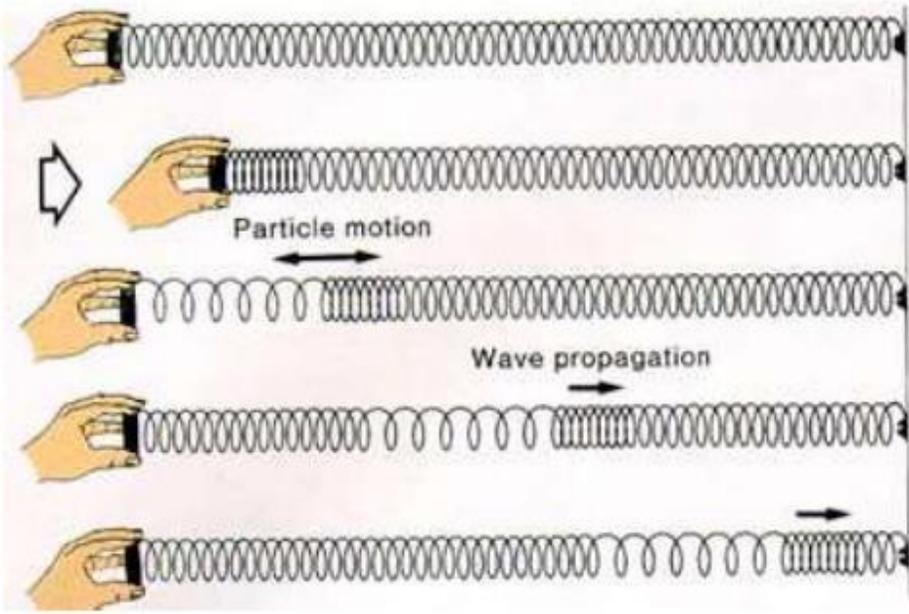
### 1- الأمواج السيسمية الحجمية (Seismic Body waves):

وهي الموجات التي تنطلق من البؤرة تنتشر بشكل فراغي ضمن الوسط الصخري و هي موجات ذات ترددات عالية ( high frequency) وموجات قصيرة (short wavelength) و تقسم إلى نوعين رئيسيين:

#### الموجات الطولية الضاغطة (P):

تسبب عند مرورها حركة جزيئات التربة في اتجاه مواز لمسار انتشار الموجة، وتسبب بالتناوب ضغطاً وشدّاً للوسط الذي تنتشر فيه أي تترافق مع تغير في الحجم.





- هي أسرع الأمواج السيسمية و يمكنها أن تصل حتى عدة كيلومترات في الثانية وتتعلق بتركيب الصخور التي تنتشر بها، إذ إنها أكبر في الصخور القاسية المتماسكة مما هي في الصخور الرخوة والمفككة أو الترب.
- تختلف سرعة الانتشار الموجات P حسب نوعية و خواص الوسط أو الصخور الذي تنتشر فيه هذه الأمواج ( الصلابة أو القساوة ، الكثافة ) ، حيث تزداد السرعة مع ازدياد الصلابة ومع نقصان الكثافة، و تبلغ

السرعة الوسطية للموجات P حوالي 5-8 km/s في طبقات القشرة . و تصل في طبقات المانتل حتى 13 km/s . وتعطى

$$V_p = \sqrt{\frac{Es}{\rho}}$$

سرعة الموجات P بالعلاقة:

$V_p$  - سرعة موجات الضغط أو الموجات الطولية [ m/s ] .

$\rho$  - الكثافة (كثافة المادة أو الوسط الذي تنتشر فيه الموجات) [g/cm<sup>3</sup>].

$Es$  -معامل الصلابة (نسبة الاجهاد إلى التشوه) kPa

$\gamma$  - الوزن الحجمي للمادة [kN/m<sup>3</sup>] ،  $g$  - تسارع الجاذبية الأرضية (9.81 m/sec<sup>2</sup>).

انتبه للواحدات

مثال: احسب سرعة موجات الضغط ( $V_p$ ) في المواد التالية: فولاذ- صخر رملي - مطاط - ماء، إذا علمت خواص هذه المواد المرفقة في الجدول التالي. يمكن حساب السرعة المطلوبة حسب العلاقة السابقة مع اعتبار أن تسارع الجاذبية الأرضية ( $g=9.81m/sec^2$ ) كما يلي:

$$V_p = \sqrt{\frac{Es}{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{2.78 \cdot 10^5 \cdot 10^3}{7.85}\right)} = 5951m/sec$$

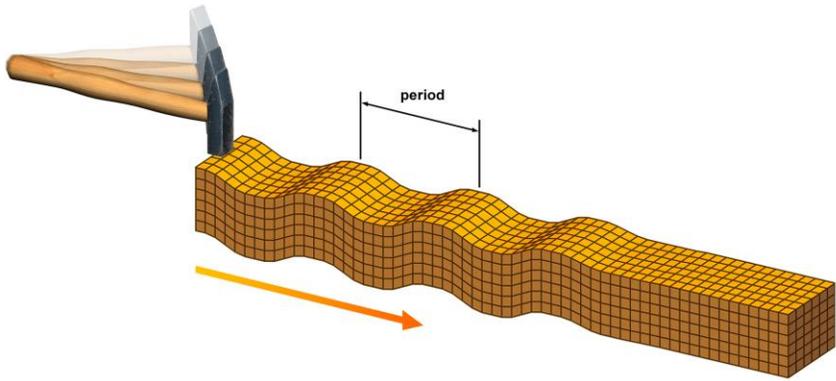
نسبة لبقية المواد تنظم الحسابات في الجدول التالي:

سرعة موجات الضغط		الوزن الحجمي	معامل الصلابة المحصور جانبياً	الكثافة	المادة
$V_p$ [km/sec]	$V_p$ [m/sec]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_s$ [Mpa=MN/m <sup>2</sup> ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
6 ≈ 5.95	5951	77	$2.78 \cdot 10^5$	7.85	الفولاذ
2.61	2606	26	$1.8 \cdot 10^4$	2.65	الحجر الرملي
31	30957	11.77	$1.15 \cdot 10^6$	1.2	المطاط
1.53	1530	9.81	$3.4 \cdot 10^5$	1	الماء

انتبه للوحدات

## 2-1- الموجات الثانوية أو موجات القص أو الموجات العرضانية (S-waves) (Secondary or Shear Waves)

- هي عبارة عن موجات قص و تتحرك ذرات المادة التي تتعرض لهذه الأمواج لحركة عمودية على اتجاه انتشار الموجة
- و يمكنها أن تنتشر ضمن الأوساط الصلبة فقط و لا تنتشر في الأوساط السائلة كما الموجات P و لذلك تنعكس هذه الموجات عندما



- تصل إلى عمق 2900 كم، حيث يتوافق هذا العمق مع الحد الفاصل بين المانتل و بداية النواة الخارجية السائلة عند فاصل فيشرت - غوتينبيرغ (Wiechert-Gutenberg).
- و هي أقل سرعة من الأمواج الطولية (P) بمقدار 1.7-1.87 مرة أي  $(V_p/V_s \approx 1.73-1.87)$



- هذه الأمواج يمكن أن تعتبر أخطر من الأمواج P بالنسبة للعديد من المنشآت الهندسية لأن سعتها أكبر و تؤثر على المنشآت بالاتجاه الأخطر.
- تعطى سرعة أمواج القص العرضانية بالعلاقة التالية:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{G \cdot g}{\gamma}}$$

$$G = \frac{E_s}{2(1 + \nu)}$$

- معامل بواسون يتراوح بين (0.5-0) و بالنسبة لمعظم المواد الجيولوجية (0.2-0.35).

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{\sqrt{\frac{E_s}{\rho}}}{\sqrt{\frac{G}{\rho}}} = \frac{\sqrt{\frac{E_s}{\rho}}}{\sqrt{\frac{E_s}{2(1+\nu)\rho}}}$$

$$\frac{V_p}{V_s} = 1.87 - 1.73$$

مثال : احسب سرعة موجات القص ( $V_s$ ) في المواد: فولاذ- صخر رملي - مطاط - ماء ، إذا علمت خواصها مرفقة في الجدول التالي. يمكن حساب السرعة المطلوبة حسب العلاقة السابقة مع اعتبار أن تسارع الجاذبية الأرضية ( $g=9.81m/sec^2$ ) كما يلي:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{7.93 \cdot 10^4 \cdot 10^3}{7.85}\right)} = 3178m / sec$$

بـة لبقية المواد تنظم الحسابات في الجدول التالي :

سرعة موجات القص		الوزن الحجمي	معامل مرونة القص	الكثافة	المادة
$V_s$ [km/sec]	$V_s$ [m/sec]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$G$ [Mpa=MN/m <sup>2</sup> ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
3.178	3178	77	$7.93 \cdot 10^4$	7.85	الفولاذ
1.504	1504	26	$6 \cdot 10^3$	2.65	الحجر الرملي
0.978	978	11.77	$1.15 \cdot 10^3$	1.2	المطاط
0	0	9.81	0	1	الماء

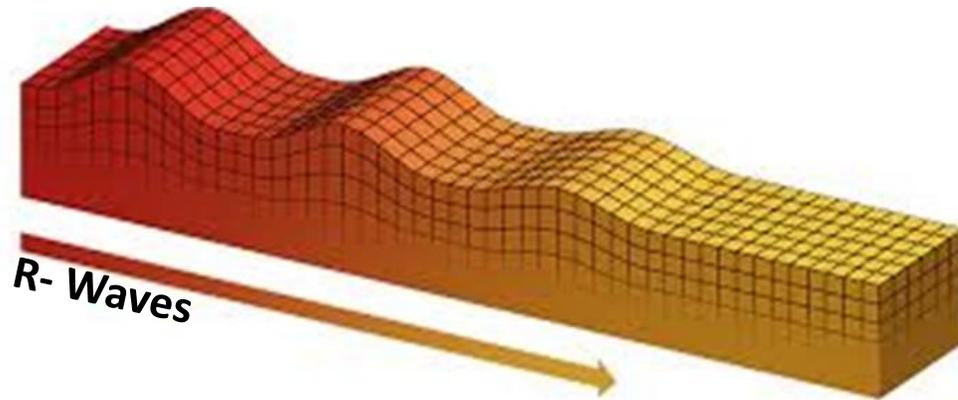
من السطر الأخير في الجدول نلاحظ أن الماء لا يمكنه مقاومة اجهادات القص و بالتالي لا يمكن لموجات القص الانتشار فيه.

## 2- الأمواج السطحية (Surface waves):

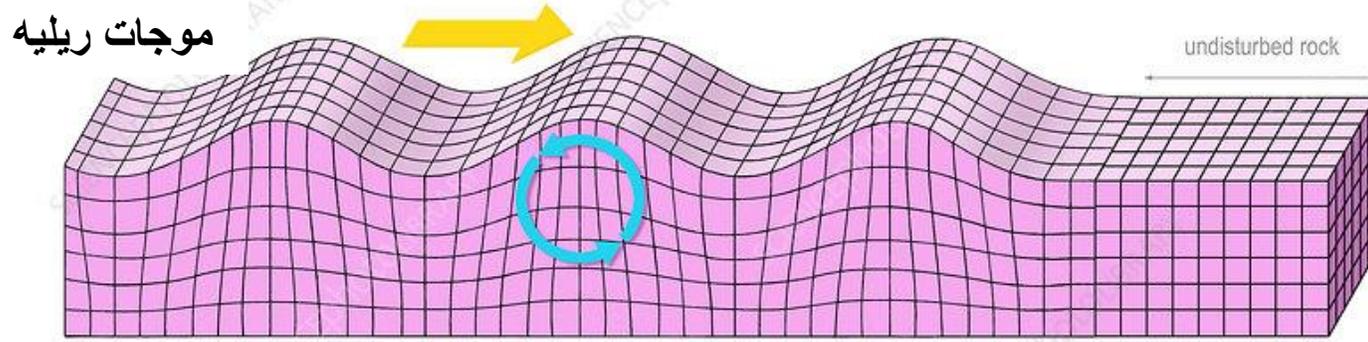
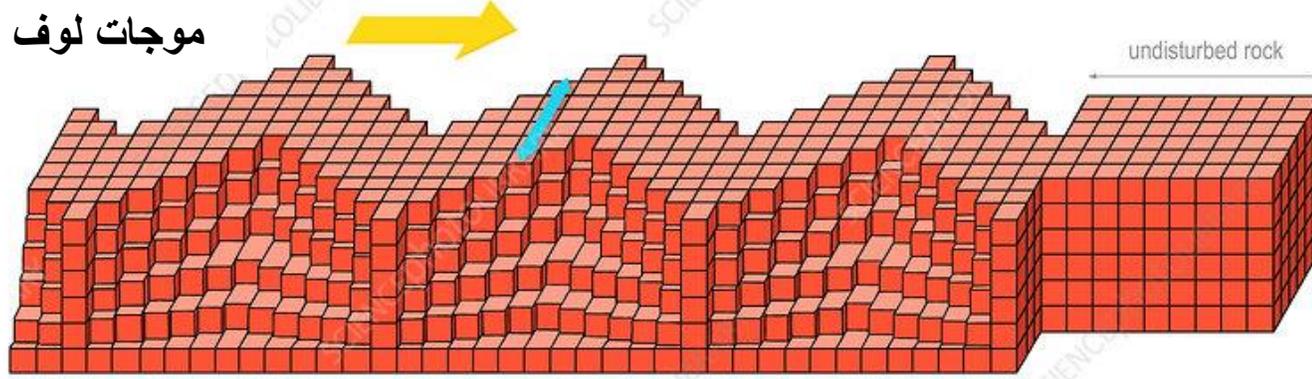
وهي الموجات التي تنطلق من مركز الزلزال السطحي و تنتشر على سطح الأرض: سرعتها بطيئة أقل من الموجات S، و سعتها كبيرة نسبياً أكبر من الموجات (S) و (P)، و تستمر في سعتها العظمى فترة طويلة أكثر من الموجات (P,S) و تؤثر في الاتجاه الحرج على المنشآت الهندسية و لذلك تعتبر بأنها المسبب الرئيسي لأغلب الأضرار المرافقة للزلازل على سطح الأرض و خصوصاً للمنشآت الهندسية و تقسم إلى نوعين رئيسيين :

1-2 - موجات ريليه (R-waves) / Rayleigh-waves / و هي عبارة عن موجات تتحرك ذرات المادة التي تتعرض لها لحركة عمودية على اتجاه انتشار الموجة للأعلى و الأسفل و بشكل قطع ناقص بشكل موجات مشابهة للموجات المائية التي تحدث عند القاء حجر في ماء ساكن. تعطى علاقة سرعة الموجات السطحية لريليه (R) بعلاقة تقريبية كنسبة من موجات القص (S) كما يلي:

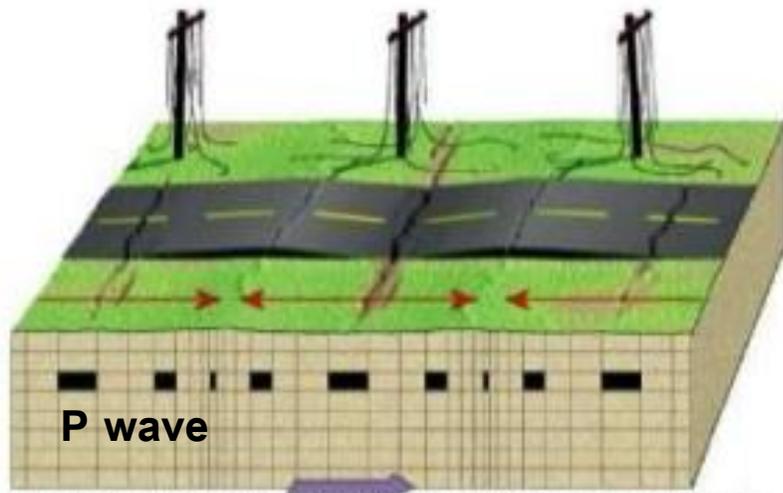
$$V_s = 1.09 \cdot V_R \quad \text{or} \quad V_R \approx 0.917 \cdot V_s$$



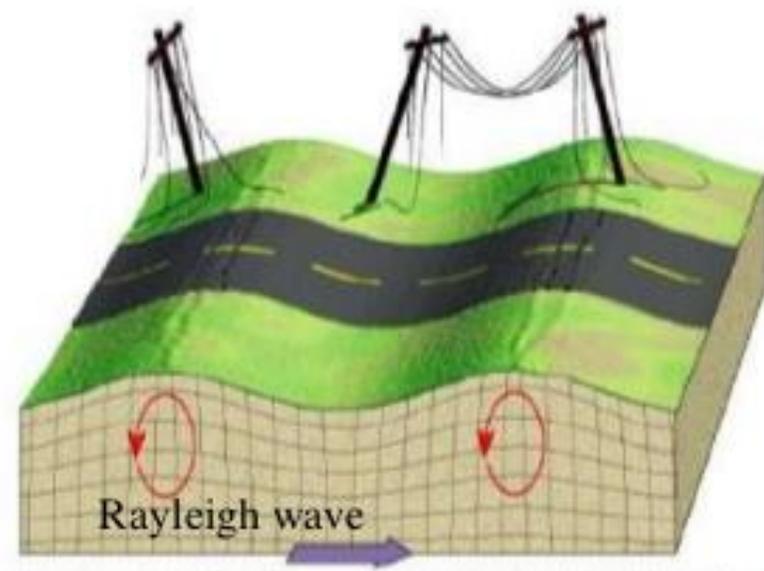
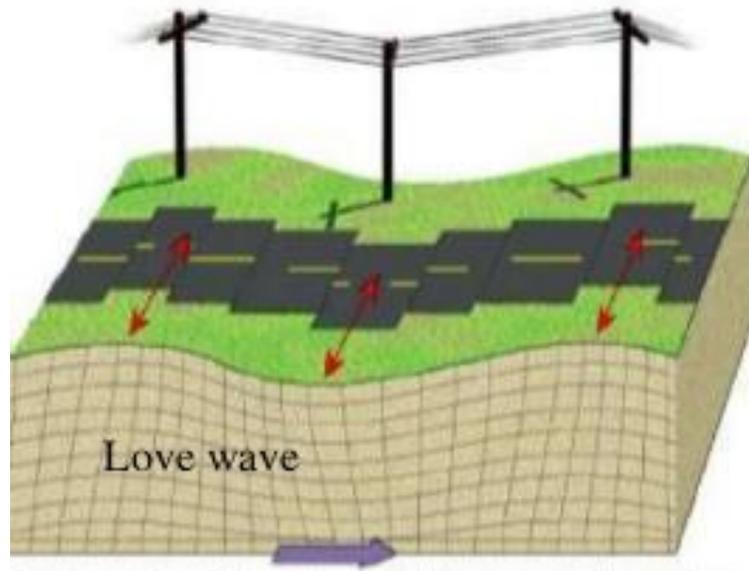
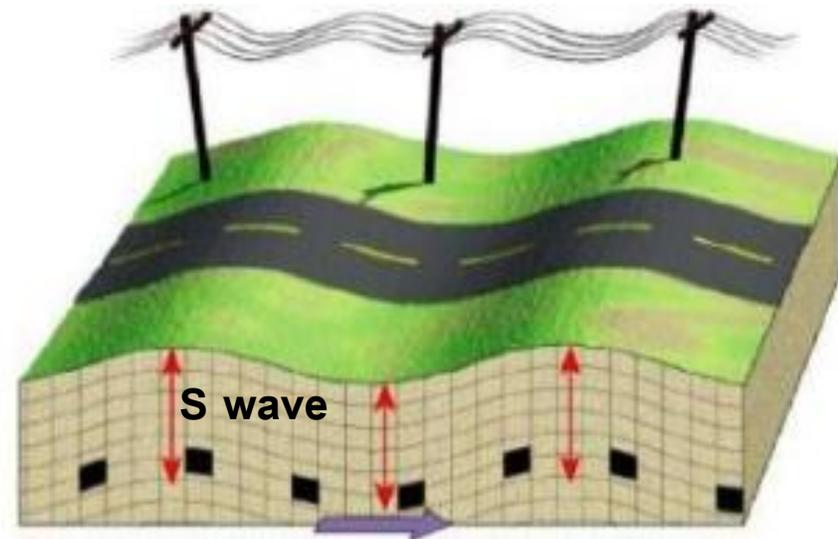
2-2 - موجات لوف (L-waves): /Love-waves/ هي عبارة عن موجات تتحرك ذرات المادة التي تتعرض لها بحركة عمودية على اتجاه انتشار الموجة و بشكل أفقي و تسبب انتقالات عمودية على الانتقالات التي تحدث من موجات ريليه. وتكون سرعتها أقل قليلاً من موجات القص ( $V_s$ ) و سرعتها أكبر من موجات ريليه ( $V_L > V_R$ ). و تعتبر هذه الموجات هي الأكثر خطورة على المنشآت الهندسية على سطح الأرض بسبب تأثيرها بالاتجاه الأفقي الحرج على المنشآت و بسبب شدتها (سعتها أو مطالها الكبير نسبياً و طول فترة تأثيرها بالسعة الاعظمية).



موجات سطحية



The back-and-forth motion produced as P waves travel



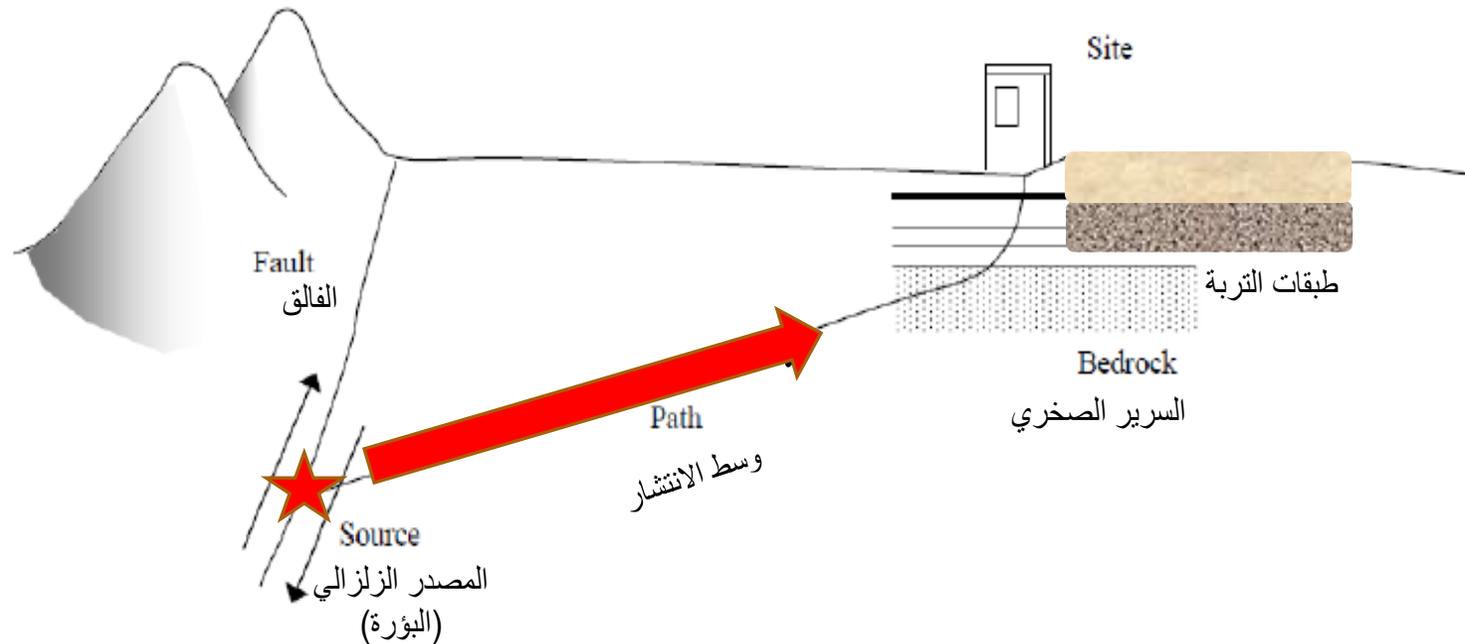
**انتشار الأنواع المختلفة من  
الأمواج السيسمية  
وتأثيراتها.**

# ❖ الأضرار الناتجة عن الزلازل (Seismic hazards)

## 1- اهتزاز سطح الأرض (Ground shaking)

عند حدوث زلزال تنتشر الأمواج الاهتزازية بسرعة كبيرة من المصدر (البؤرة) وعندما تصل إلى سطح الأرض تسبب اهتزازة لمدة تدوم من ثوانٍ إلى دقائق. تتعلق شدة اهتزاز سطح الأرض ومدته في موقع معين بشكل أساسي :

- بشدة الزلزال
- المسافة بين بؤرة الزلزال من جهة والموقع المدروس،
- خصائص الموقع (الطبقات السطحية)
- بسبب إمكانية تضخيم الموقع للموجات الزلزالية.



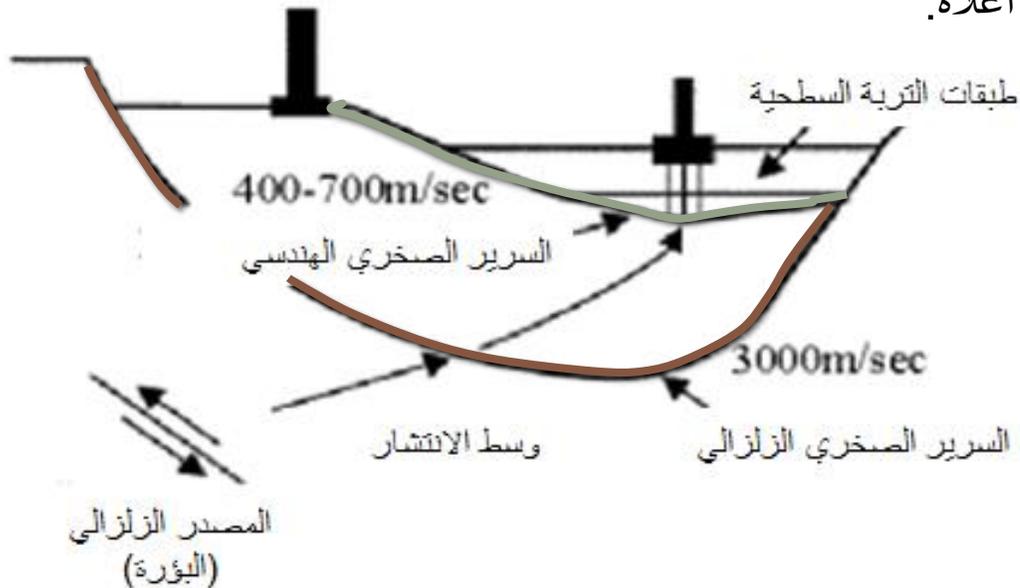
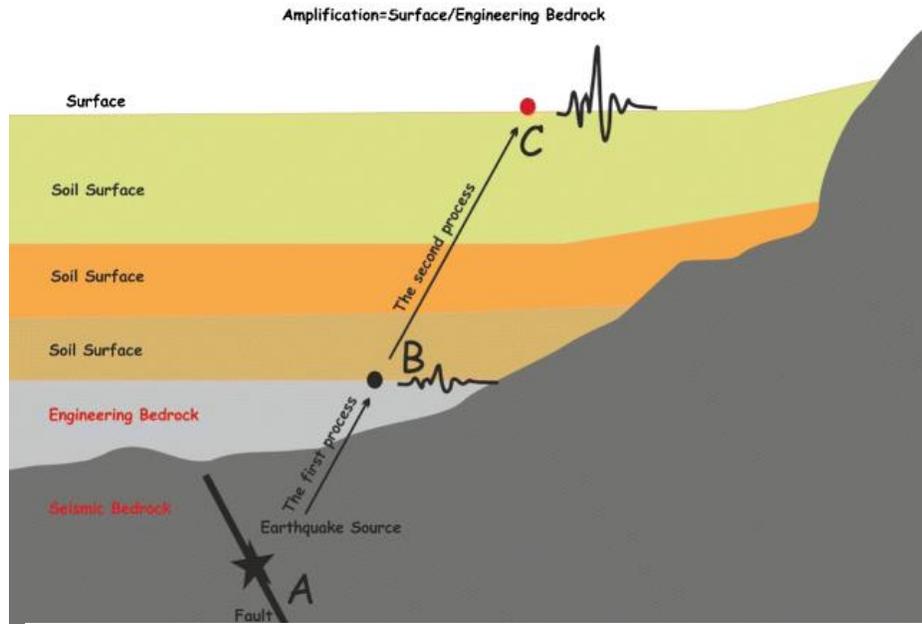
من أجل تقييم وتقدير حركة الأرض بطريقة عملية فإنه من الملائم تقسيم هذه الظاهرة المعقدة إلى قسمين:

**القسم الأول** يعبر عن تأثير المصدر الزلزالي ويمتد في طبقات القشرة الأرضية الصخرية  
**القسم الثاني** يعبر عن تأثير طبقات التربة العلوية على استجابة سطح التربة  
إن الحد الفاصل بين القسمين يسمى **بالسرير الصخري الزلزالي** (seismic bedrock).

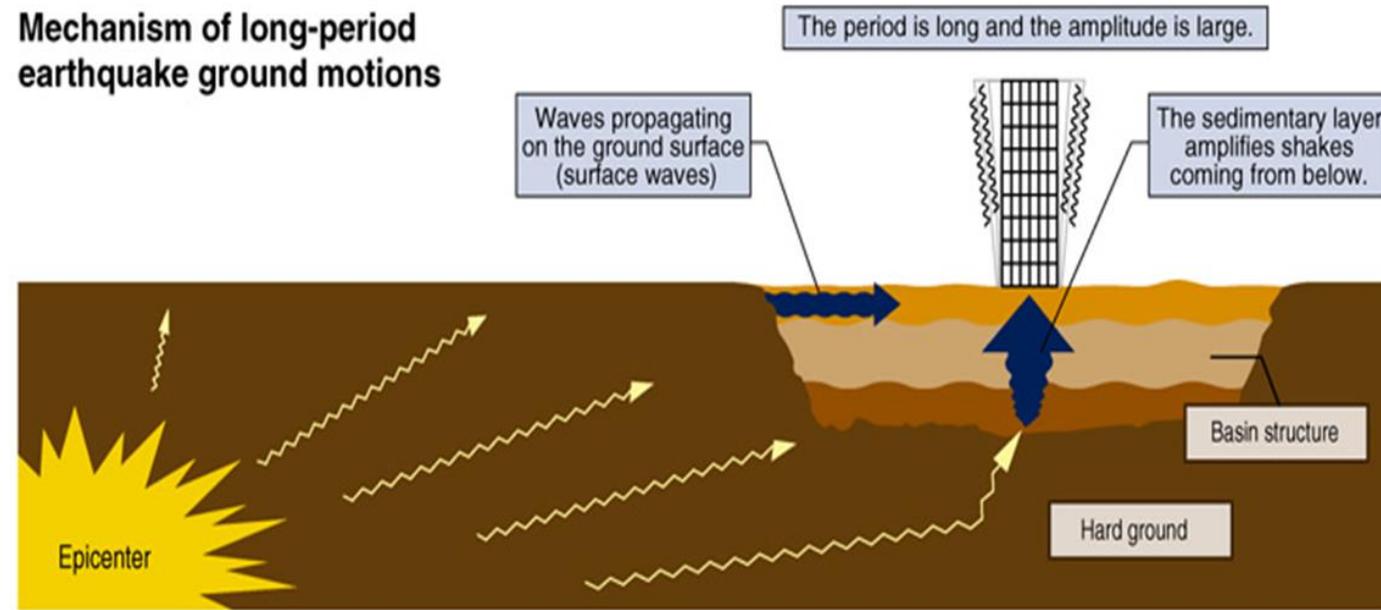
يجب أن يتميز السرير الصخري بما يلي:

- امتداد جانبي واسع مع تماثل نسبي في الخصائص الفيزيائية للطبقات أسفل الحد الفاصل
- خصائص الطبقات أسفل السرير الصخري الزلزالي أكثر تجانساً مقارنة مع طبقات التربة أعلاه.

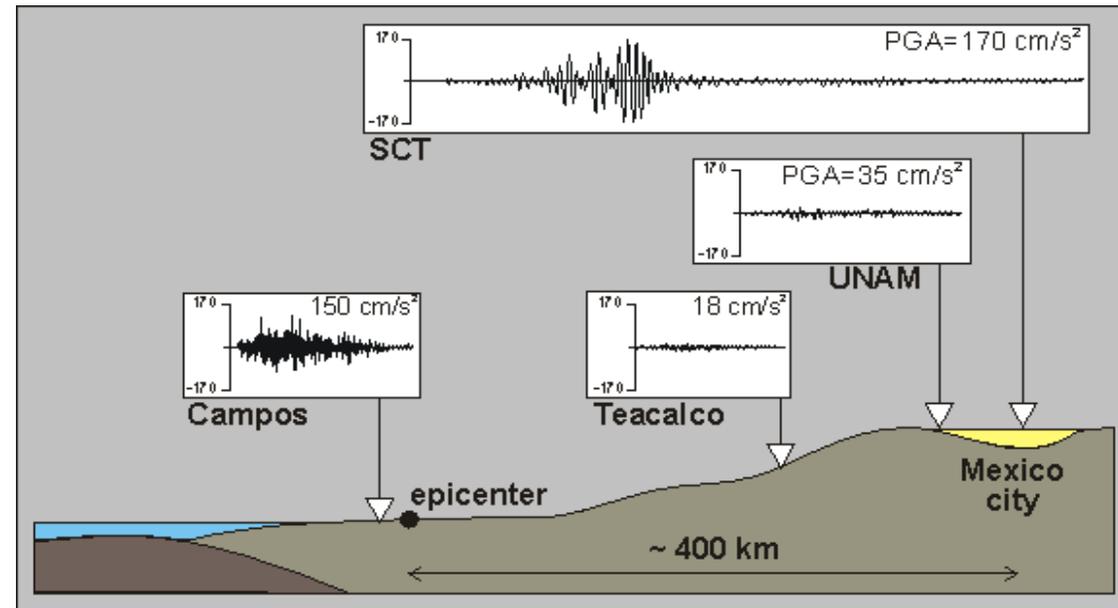
عملياً من وجهة نظر الهندسة الجيوتكنيكية الزلزالية يمكن افتراض وجود **سرير صخري هندسي** عند أقل عمق تبلغ فيه سرعة انتشار الموجات القاصة  $760\text{m/s}$ . وهكذا إذا استطعنا تسجيل أو تقدير حركة السرير الصخري الهندسي، تصبح المسألة عندئذ عبارة عن حساب استجابة تربة الموقع تحت تأثير حركة السرير الصخري المتوضع مباشرة تحت التربة.



## Mechanism of long-period earthquake ground motions



تقطع الأمواج الزلزالية الجزء الأكبر من مسارها من البؤرة وحتى سطح الأرض ضمن الطبقات الصخرية غير أن القسم الأخير من هذا المسار يتم عبر التربة بجوار سطح الأرض والتي تؤثر خواصها بشكل كبير على طبيعة اهتزاز سطح الأرض.



تلعب طبقات التربة دور الفلتر للأمواج الاهتزازية التي تنتشر عبرها حيث تقوم بتخميد الاهتزاز عند بعض الترددات وتضخيمه عند ترددات أخرى. وبما أن خواص التربة يمكن أن تتغير بشكل كبير من نقطة لأخرى فإن مستوى اهتزاز سطح الأرض يمكن أن يتغير بالنتيجة بوضوح ضمن منطقة صغيرة .

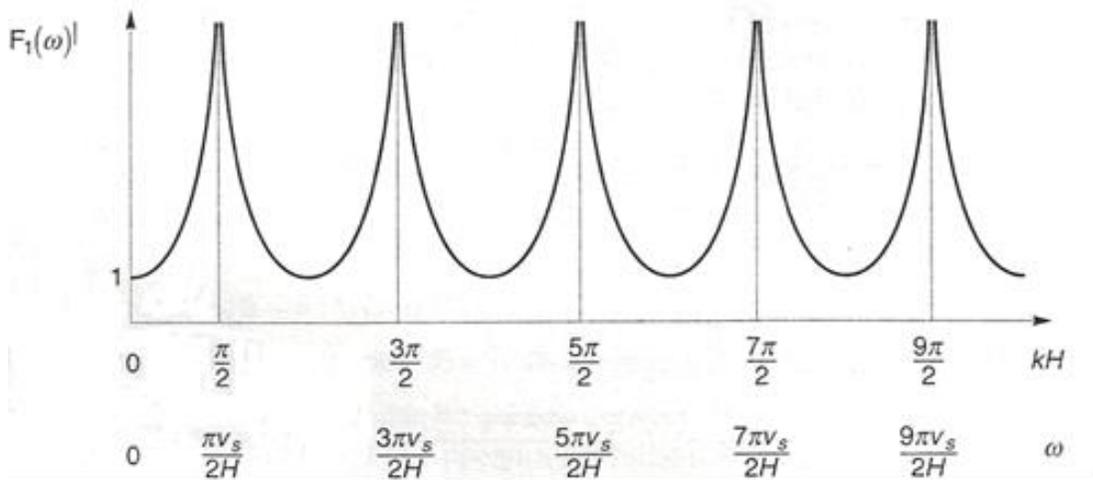
لاحقاً لزلزال مكسيكو (1985) كان تسارع سطح الأرض على بعد 400 كم من مركز الزلزال أكبر بكثير من المناطق الأقرب (تأثير الموقع وتضخيم التربة)

أظهرت الأبحاث العلمية أن **تضخيم الموجة** في الترب السطحية يتعلق بسرعة انتشار الموجات القاصة في التربة (Cs) إضافة إلى سماكة طبقات التربة (H) أي (الرسوبيات) أعلى السرير الصخري، ويصل التضخيم إلى قيمته الأعظمية عندما يتحقق:

حيث: (H) سماكة طبقة التربة أعلى السرير الصخري،  
 (ω) التردد الزاوي (ω= 2π.f)،  
 n= 0, 1, 2, 3...∞

$$\frac{\omega \cdot H}{C_s} = \frac{\pi}{2} + n \cdot \pi$$

تدعى مجموعة الترددات الموافقة لعامل التضخيم الأعظمي **بالترددات الطبيعية لطبقة التربة**.



$$\omega_n = \frac{C_s}{H} \left( \frac{\pi}{2} + n\pi \right)$$

يحصل التضخيم الأعظمي عموماً عند أصغر تردد طبيعي (n=0)،

ويدعى هذا التردد **بالتردد الأساسي**، ويعطى بالعلاقة:

$$\omega_0 = \frac{\pi C_s}{2H} \Rightarrow f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{C_s}{4H}$$

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{4H}{C_s}$$

يدعى دور الاهتزاز الموافق للتردد الأساسي **بالدور المميز أو الأساسي** للموقع، ويعطى بالعلاقة:

يتعلق الدور المميز للموقع بارتفاع طبقة التربة وبسرعة انتشار الموجة فقط.

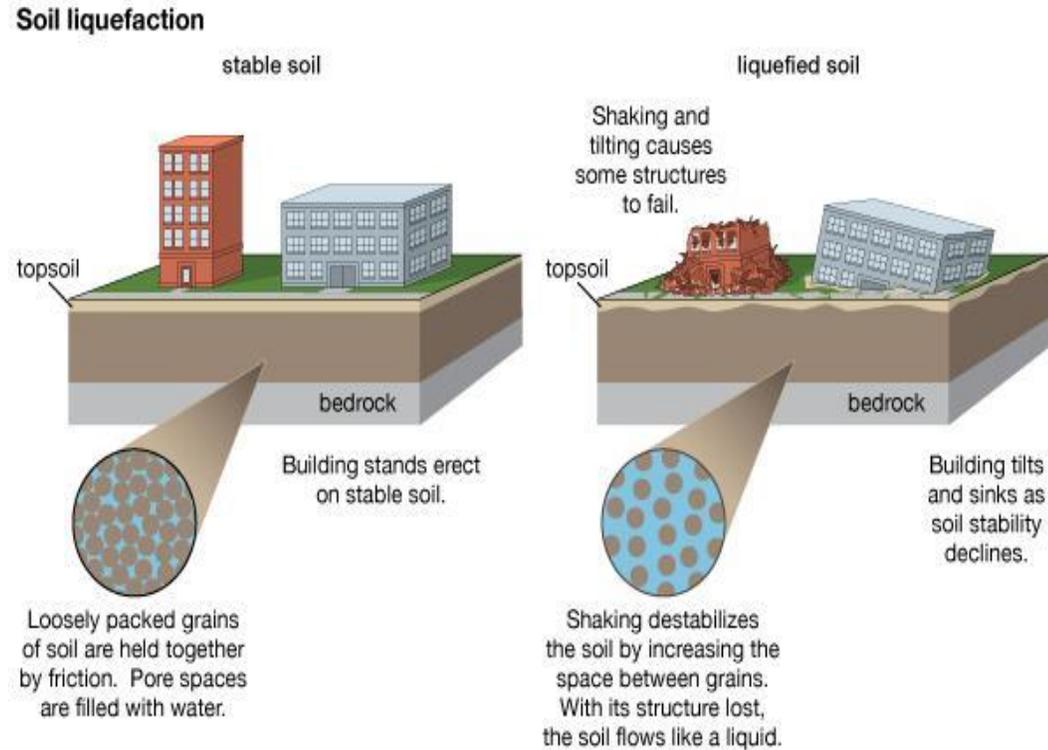
## 2- الأضرار الإنشائية (Structural hazards)

إن الأضرار الإنشائية المتمثلة بتهدم المنشآت قد تؤدي إلى وقوع العديد من الضحايا البشرية ضمن المنشآت ما لم يتم التنبؤ مسبقاً بالزلازل. كما قد تحدث وفيات وأضرار ملحوظة دون تهدم المنشأ وسقوطه وذلك لأسباب مختلفة مثل سقوط قرميد الأسقف أو أحجار الواجهات أو قطع الأثاث الداخلية وتخرب شبكات التجهيزات الداخلية في المباني... الخ.



تصميم المنشآت والمباني لمقاومة الزلازل من خلال تضمين كودات البناء الحالية متطلبات خاصة بالتصميم الزلزالي (على سبيل المثال تصمم المباني في اللادقية لتحمل تسارع لطبقة السرير الصخري مقداره  $300 \text{ cm/s}^2$  أي  $0.3g$ )

يشكل تسيل التربة أحد الظواهر الأكثر وضوحاً للأضرار الناتجة عن الزلازل حيث يمكن أن تسبب اهتزازات الأرض فقداناً لمقاومة القص لبعض الترب (خصوصاً الرمال المفككة المشبعة) وبالتالي تسلك التربة سلوك السائل اللزج بدلاً من سلوك الجسم الصلب. تدعى هذه الظاهرة بتسيل التربة والتي يتم فيها تخفيض مقاومة القص للتربة إلى درجة لا تستطيع عندها البقاء ثابتة وتحمل المنشآت المقامة عليها وبالتالي يمكن أن تغوص هذه المنشآت في التربة المتسيلة أو تميل بدرجة كبيرة تؤدي إلى فقدان استقرارها الإنشائي وتهدمها.



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

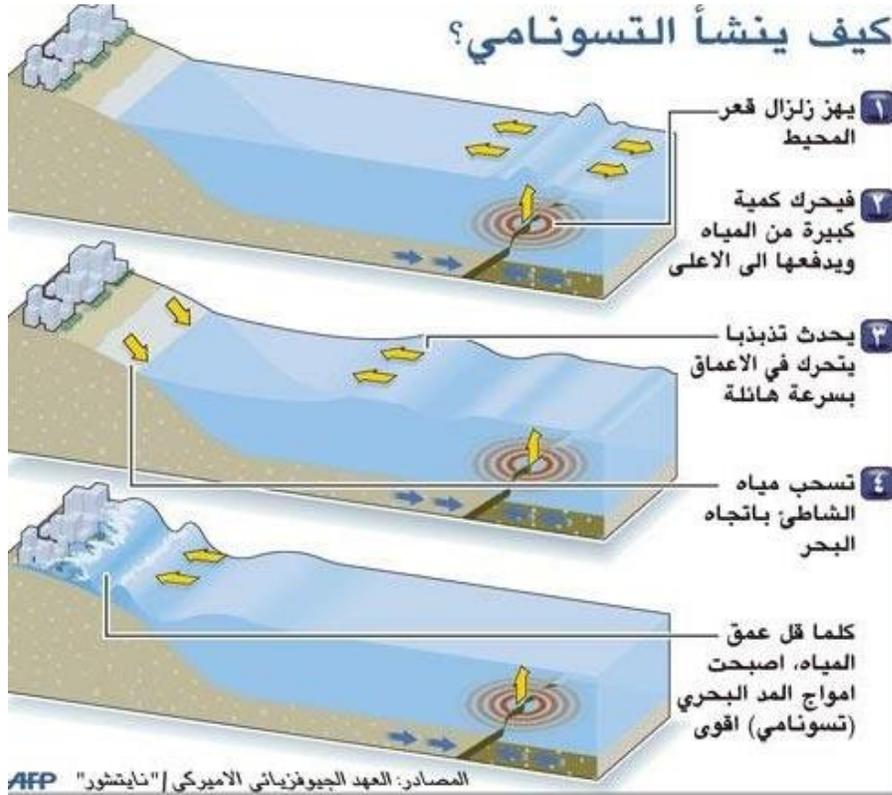


#### 4- ظاهرة تسونامي (Tsunamis)

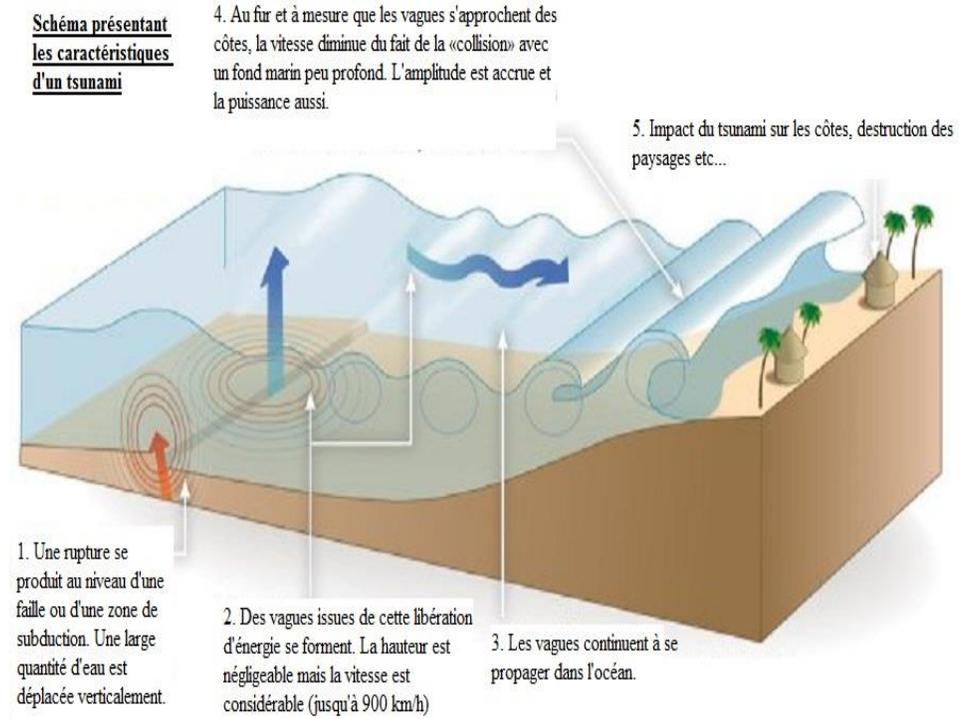
ظاهرة نشوء وانتشار أمواج بحرية ذات قدرة تدميرية هائلة تحدث نتيجة لحركة في قعر المحيطات بسبب حدوث زلزال أو اندفاع بركاني أو انزلاق أرضي مع الانتباه إلى أن ظاهرة التسونامي قد تحدث بعد عدة ساعات من الحدث المسبب وليس بعده مباشرة.



## كيف ينشأ التسونامي؟



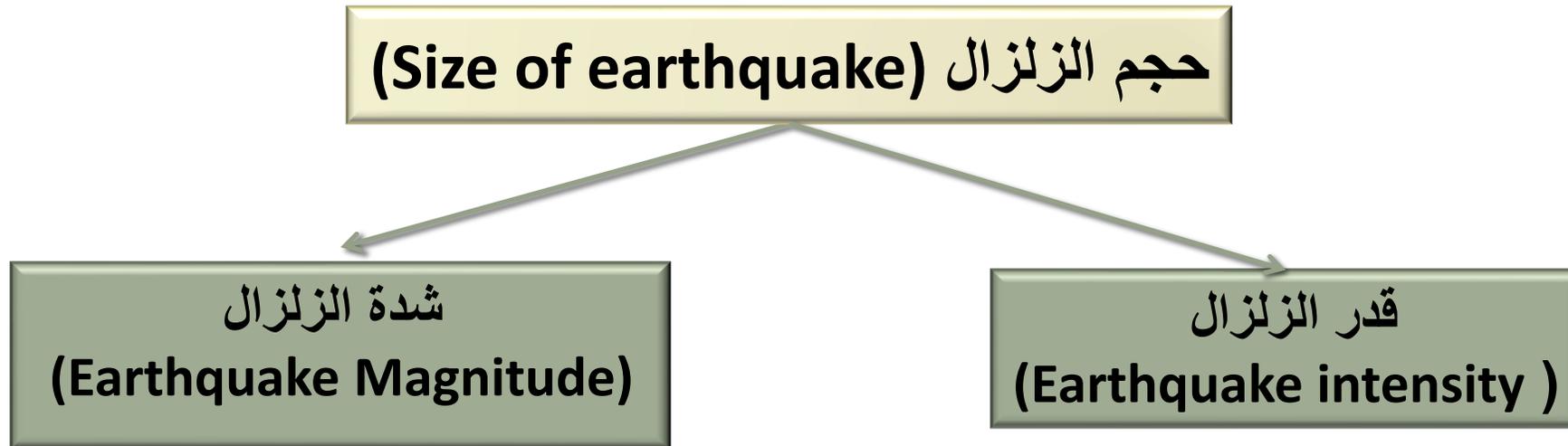
### Schéma présentant les caractéristiques d'un tsunami



- يصل ارتفاع أمواج التسونامي في المياه قليلة العمق إلى 30m. تتراوح سرعة انتشار هذه الأمواج بين 500-800 km/h في المياه العميقة وتتناقص لتصل إلى بضع عشرات من الكيلومترات في الساعة في المياه قليلة العمق (أقل من 100 متر).
- بعد وصول الموجة الأولى يمكن أن يلي الموجة جزر ثاني، ثم موجة ثانية، وهكذا.
- عادة ما تؤخذ بعين الاعتبار بضعة أمواج فقط نظراً لكون مطالها يتخامد بشكل مستمر.

يعتبر حجم الزلزال من البارامترات الهامة التي تعبر عن قوة الزلزال، وقد تم التعبير عنه بعدة طرق:

- ✓ قبل تطور أجهزة القياس الزلزالي اقتصرت طرق قياس حجم الزلزال على التوصيف الكيفي (قياس قدر الزلزال (Earthquake intensity)،
- ✓ أما بعد استخدام السيسموغرافات الحديثة فقد تم استخدام التوصيف الكمي (قياس شدة الزلزال Earthquake Magnitude).



## ❖ قدر الزلزال ( Earthquake intensity )

قدر الزلزال هي أقدم قياس لحجم الزلزال وهي توصيف نوعي (كيفي) لتأثير الزلزال على موقع ما اعتماداً على ملاحظة حجم الأضرار التي خلفها الزلزال وعلى ردود أفعال الناس في ذلك الموقع. يتعلق قدر الزلزال بشكل أساسي بقوة الزلزال وبالشروط الموضعية للموقع وبنظام البناء المعتمد في المنطقة التي حدث فيها الزلزال.

تجدر الإشارة إلى أن **قدر الزلزال لا تعبر دوماً عن قوة الزلزال**، فقد يكون الزلزال ضعيفاً نسبياً والأبنية غير مصممة على الزلازل فتكون الأضرار كبيرة ويصنف الزلزال اعتماداً على القدر على أنه قوي. بينما يمكن أن يكون الزلزال قوياً وتكون الأبنية مصممة على الزلازل فتكون الأضرار طفيفة ويصنف الزلزال على أنه ضعيف.

يوجد عدة مقاييس لقدر الزلزال يمكن أن نذكر منها:

- مقياس RF (Rossi-Forel)،
- مقياس MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik)،
- المقياس الأوروبي (EMS98)، مقياس Shindo الياباني،
- وأخيراً **مقياس ميركالي** الذي يعتبر أشهر مقاييس قدر الزلزال

يعبر عن قوة الزلزال على مقياس مكون من 1 إلى XII درجة رومانية وذلك اعتماداً على أمرين أساسيين: مقدار الأضرار التي يسببها الزلزال ودرجة إحساس الناس بالزلزال.

شدة الزلزال المكافئة وفق مقياس ريختر	نتائج الزلزال	قوة الزلزال وفق مقياس ميركالي
2	لا يتم الشعور بحدوثه	I
3	يندر الشعور بحدوثه ولكن مراكز الرصد تتمكن من تسجيله	II - III
4	غالباً ما يتم الشعور بحدوثه ولكن لا يسبب أضرار	IV - V
5	يسبب حركة بعض أساسات المنزل ولكن من النادر أن يسبب أضراراً هامة	VI
6	قد يسبب أضراراً طفيفة للمنشآت	VII
7	يمكن أن يسبب أضراراً هامة في المنشآت وقد يسبب تشققات في التربة	VIII - IX
8	دمار كبير للمنشآت	X
9	كوارث	XI - XII

يعتمد مقياس ميركالي بشكل كبير على الملاحظة والتقدير لحجم الأضرار ودرجة الإحساس بالزلزال واللذين يختلفان بدورهما مع اختلاف المسافة عن مركز الزلزال، لذلك يمكن القول أن مقياس ميركالي هو مقياس متغير جغرافياً.

قليل الاستخدام حالياً وكان يستخدم في الماضي نظراً لعدم توفر الوسائل اللازمة لوضع مقياس أكثر موضوعية

## ❖ شدة الزلزال (Earthquake Magnitude)

خلافًا لقدر الزلزال التي تتعلق بملاحظة آثار ونتائج الزلزال في مكان معين، تحسب شدة الزلزال (يرمز لها بـ  $M$ ) انطلاقاً من **مطال أو سعة الأمواج الزلزالية** ذات التردد المحدد والتي يولدها الزلزال وتسجل بواسطة سيسموغراف. تحسب الشدة انطلاقاً من أنواع مختلفة للأمواج الزلزالية مع الأخذ بعين الاعتبار عوامل مختلفة كبعد المركز السطحي للزلزال، عمق بؤرته، تردد الاهتزاز، نوع السيسموغراف المستخدم ..إلخ.

يمكن حساب قيم مختلفة للشدة أشهرها

- الشدة الموضعية لريختر  $M_L$
- شدة الأمواج السطحية  $M_S$
- شدة الأمواج الطولانية  $M_B$

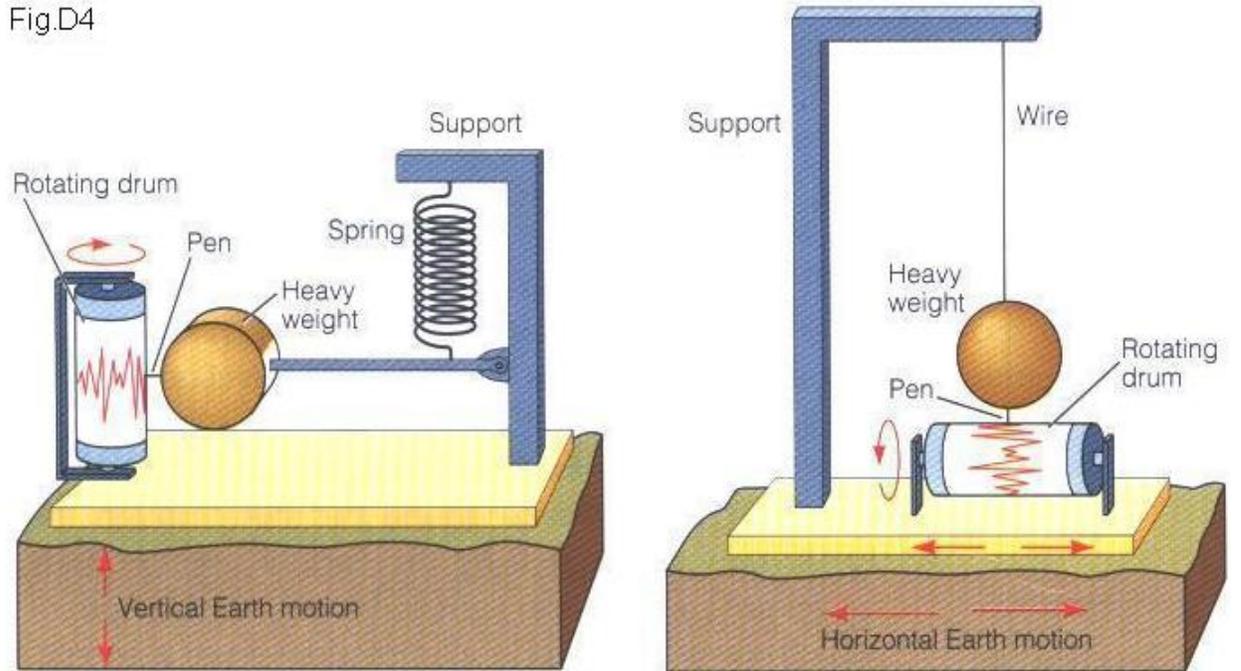
لكن هذه القيم المختلفة ليست دقيقة في حالة الزلازل القوية جداً حيث يفضل الباحثون عندها استخدام **شدة العزم**  $M_W$  التي تتعلق مباشرة بالطاقة المحررة من قبل الزلزال.

# الشدة الموضعية لريختر $M_L$ (Richter Local Magnitude)

يمكن تعريف السيسموغراف بأنه جهاز قادر على ضبط الاهتزازات المنتشرة في التربة حيث تنتقل إلى إبرة تقوم بتسجيلها على اسطوانة تدور بسرعة ثابتة فنحصل على تسجيلات زمنية للاهتزاز.



Fig.D4



نموذج للإشارة المسجلة بواسطة سيسموغراف

قام العالم شارل فرانسيس ريختر بوضع مقياس الشدة الموضعية  $M_L$  الذي يعتمد على عاملين أساسيين : مسافة التسجيل والمطال الأعظمي الموافق.

عرف ريختر الشدة الموضعية للزلازل بأنها اللوغاريتم العشري للمطال الأعظمي بالميكرومتر المسجل بواسطة سيسموغراف خاص من نوع Wood-Anderson متوضع على بعد 100 km من مركز الزلزال السطحي.

هذا المقياس ليس دقيقاً إلا من أجل مسافة قصيرة ولذلك يدعى حالياً الشدة الموضعية ويستخدم للزلازل الموضعية (مسافة قصيرة).

يتم عملياً تحديد شدة الزلازل اعتماداً على تسجيلات لحركة سطح التربة في عدة نقاط مراقبة متوزعة على مسافات مختلفة من مركز الزلزال السطحي، ثم يتم استنتاج مطال الحركة على بعد 100 km منه، ومنها يتم استنتاج شدة ريختر الموضعية  $M_L$  للزلزال.

يظهر هذا التعريف العام بوضوح الصبغة التجريبية لمقياس ريختر الذي يعتمد من جهة على نوع السيسموغراف المستخدم ومن جهة أخرى على الطريقة المستخدمة لرسم المخطط السيسمي الذي سيتم عليه القياس والتي تختلف من محطة زلزالية لأخرى.

حسب التعريف الأصلي الذي أعطاه ريختر فإن الشدة الموضعية  $M_L$  تعطى بعلاقة لوغارتمية

$$M_L = \log(A) - \log(A_0) + c \cdot \log(\Delta)$$

حيث:  $A$ : المطال الأعظمي المقاس على المخطط السيسمي (ميكرومتر)

$A_0$ : قيمة مرجعية للمطال الموافق لزلزال ذي شدة تساوي 0 على مسافة 100 km.

$\Delta$ : مسافة المركز السطحي للزلزال (km)

$c$ : ثابت معايرة

يمكن بسهولة ملاحظة الطابع التجريبي لهذه العلاقة من خلال اعتمادها على قيم الثوابت  $A_0$  و  $c$  مما يجعلها صالحة فقط موضعياً. على سبيل المثال، في التعريف الأصلي الذي تمت فيه المعايرة على زلازل متوسطة في جنوب كاليفورنيا وباستخدام سيسموغراف من النوع Wood-Anderson وجد

أن  $c = 2.76$  و  $\log(A_0) = 2.48$

فيما بعد، اقترح ريختر في العام 1958 العلاقة التالية لربط شدة الزلزال  $M$  بكمية الطاقة المحررة عند حدوث الزلزال (مقدرة بـ ergs)

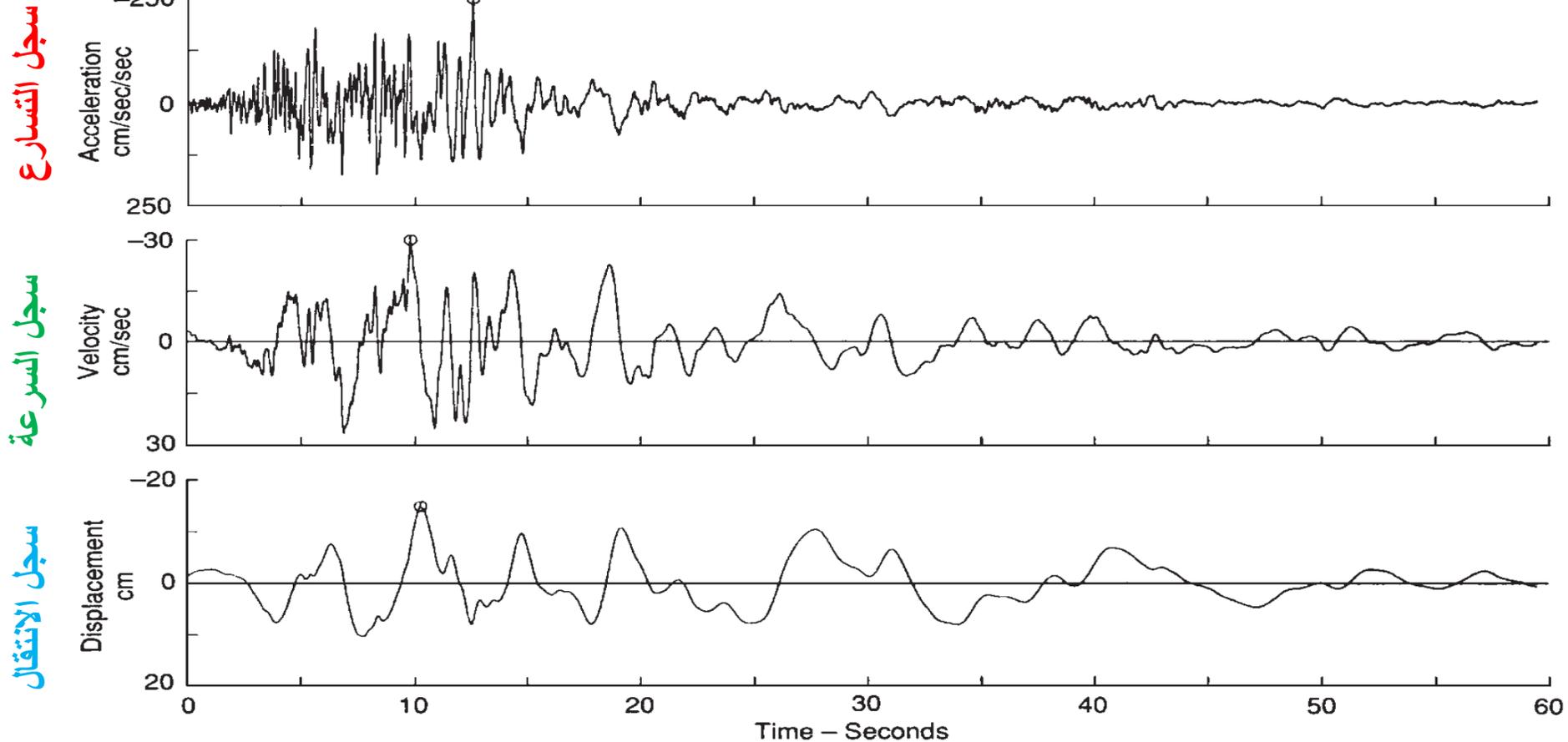
حيث  $1 \text{ erg} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2$

$$\text{Log}(E) = 11.4 + 1.5 M$$

أي أن العلاقة بين شدة ريختر والطاقة المحررة في البؤرة هي علاقة لوغارتمية وبالتالي:

زيادة الشدة بشكل طبيعي تقابلها زيادة أسية في الطاقة المحررة، لذلك عندما تتغير شدة الزلزال بمقدار 1 فإن الطاقة المحررة بواسطة الزلزال تتغير بمعامل 10 وبالتالي سنرى أن زلزالاً بشدة 7 سيكون أقوى عشر مرات من آخر بشدة 6 من ناحية سعة الاهتزاز

يمثل الشكل البيانات التسجيلية لسيسمو جراف من النوع Wood Inderson تتوضع على بعد 36 km من المركز السطحي  
لزلزال سان فيرناندو (1971)، احسب شدة ريختر لهذا الزلزال.



**FIGURE 2.14** Acceleration, velocity, and displacement versus time recorded during the San Fernando earthquake. (Data record from California Institute of Technology 1971, reproduced from Krinitzsky et al. 1993.)

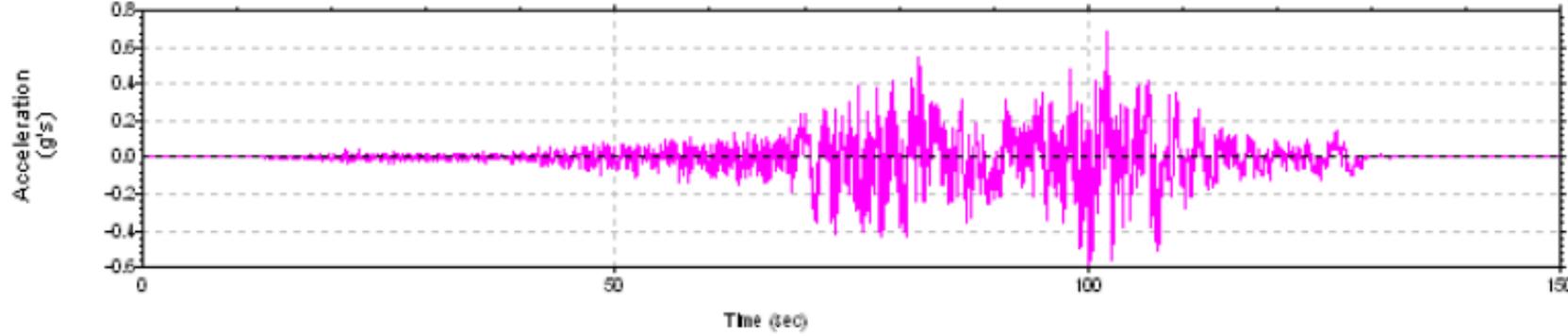
تعطى الشدة الموضعية  $M_L$  بعلاقة لوغارتمية بسيطة من الشكل:

$$M_L = \log (A) - \log (A_0) + c \times \log(\Delta)$$

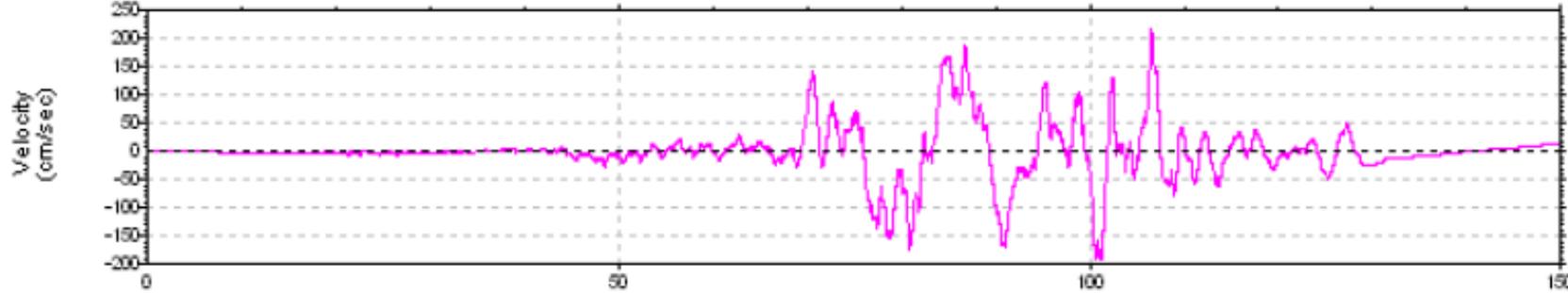
$$ML = \log(15.10^4) - 2.48 + 2.76 * \log(36) = 6.99$$

# تسجيلات محطة تشرين لزلزال 6 شباط 2023 بحسب التقرير الصادر عن المركز الوطني للزلازل في سورية

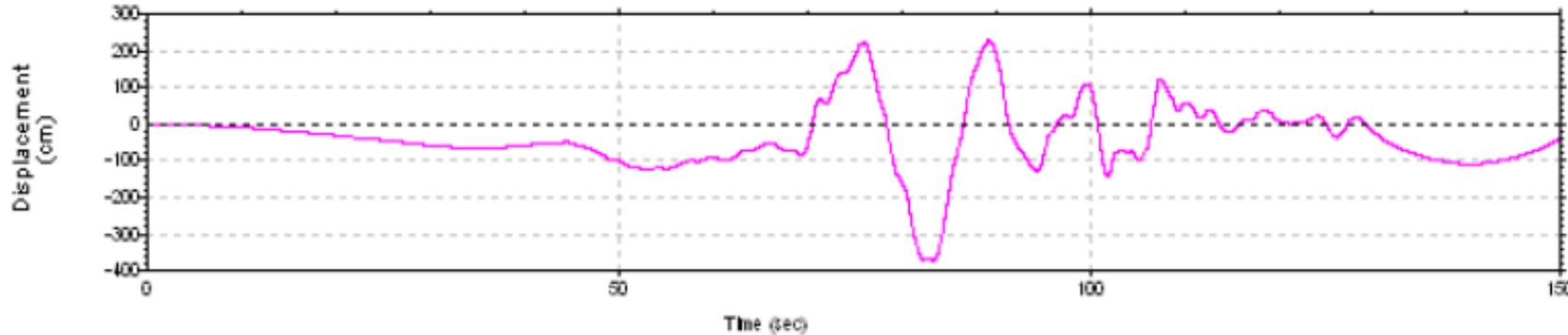
سجل التسارع



سجل السرعة



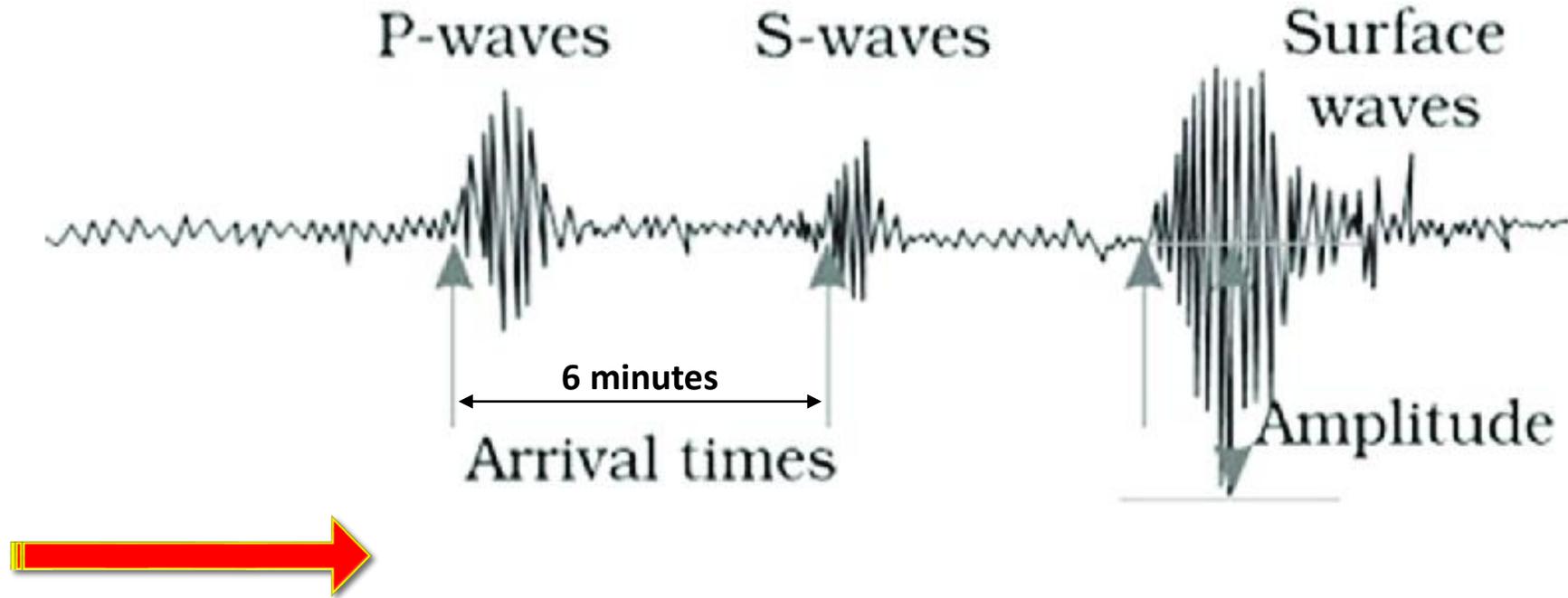
سجل الانتقال



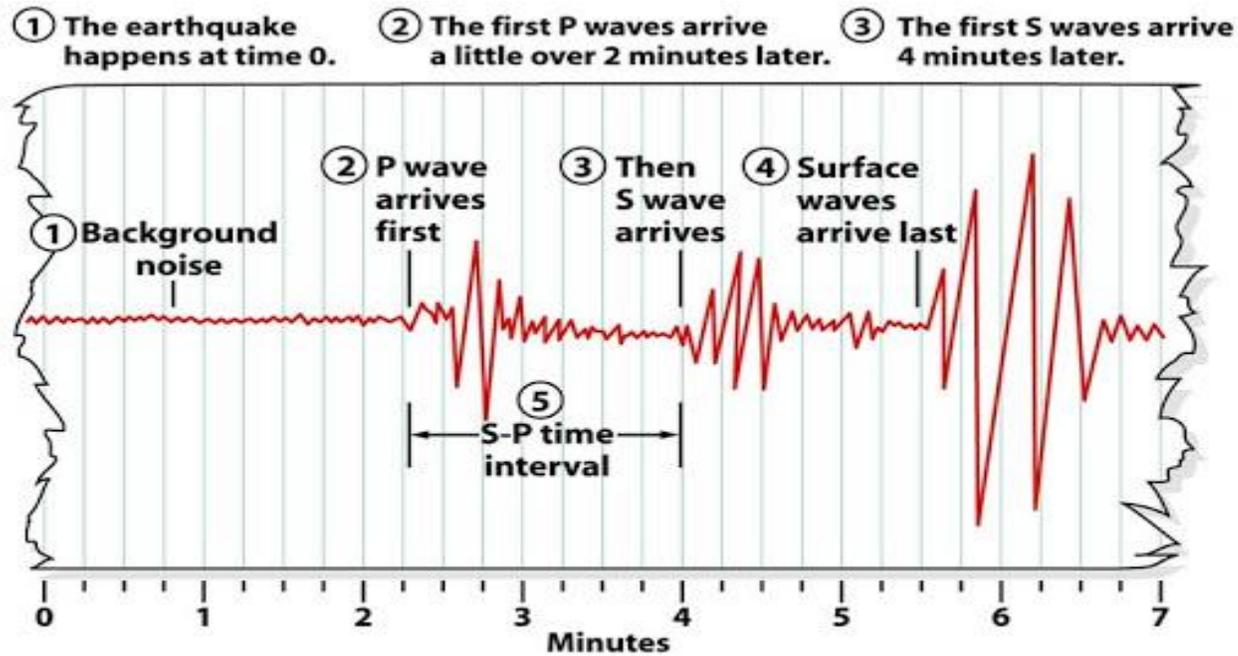
لا حظ القيم الكبيرة جداً  
مقارنة بتسجيلات زلزال  
سان فيرناندو المذكورة  
سابقاً

## ❖ تحديد المركز السطحي للزلزال (Epicentre)

بعد أقل من ساعة على حدوث الزلزال يتم تحديد مركزه. كيف يتم ذلك ؟  
كما رأينا سابقاً فإن الأمواج P تنتشر بسرعة أكبر من بقية الأمواج؛ هذه هي الخاصية التي تسمح لنا بتحديد مركز الزلزال. لنعتبر أنه في مكان ما قام السيسموغراف بتسجيل مايلي:



بما أن الأمواج P تصل في البداية فسيكون هناك فاصلاً زمنياً بين وصول الأمواج P والأمواج S، هنا على سبيل المثال ستتأخر الأمواج S ست دقائق عن P. إن سرعة انتشار الأمواج الاهتزازية في باطن الأرض معلومة تقريباً فمثلاً تتراوح سرعة انتشار P من 3-8 km/s والأمواج S من 2-5 km/s. يحسب بعد مركز الزلزال عن موقع محطة الرصد بالعلاقة التالية

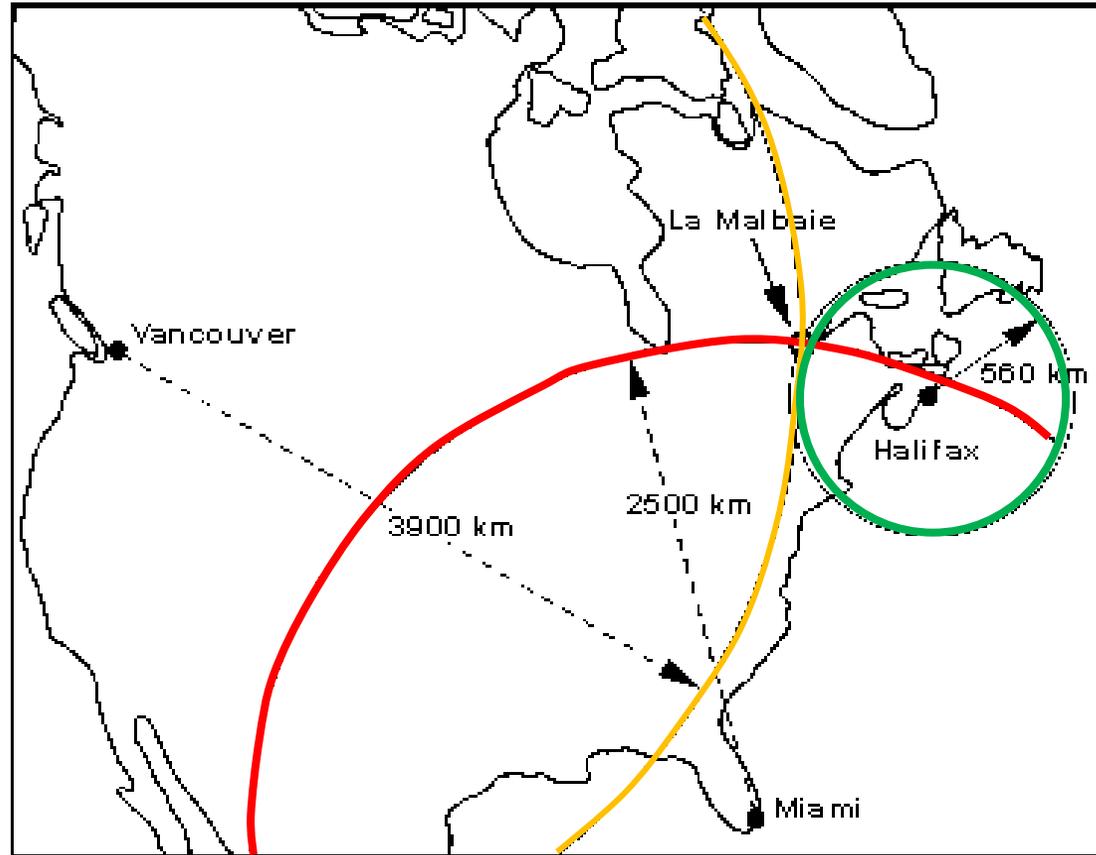


$$d = \frac{\Delta t_{P-S}}{\frac{1}{C_s} - \frac{1}{C_p}}$$

حيث يمثل  $\Delta t_{p-s}$  الفاصل الزمني بين وصول الأمواج P والأمواج S

- ④ The surface waves, which travel the long way around Earth's surface, arrive last.      ⑤ The S-P interval, here slightly less than 2 minutes, tells the seismologist how far away the earthquake was.

لنفرض أننا قد قمنا بتسجيل الزلزال في ثلاثة مواقع : هاليفاكس، فانكوفر وميامي . هذه التسجيلات تشير إلى أن مركز الزلزال يقع على مسافة 560km من هاليفاكس و 3900km من فانكوفر و 2500km من ميامي. يقع مركز الزلزال إذاً عند نقطة تقاطع الدوائر الثلاث ولتكن عند مالبي.



# نهاية المحاضرة



انهيارات أبنية في مدينة جبلة  
بعد زلزال 6 شباط 2023



