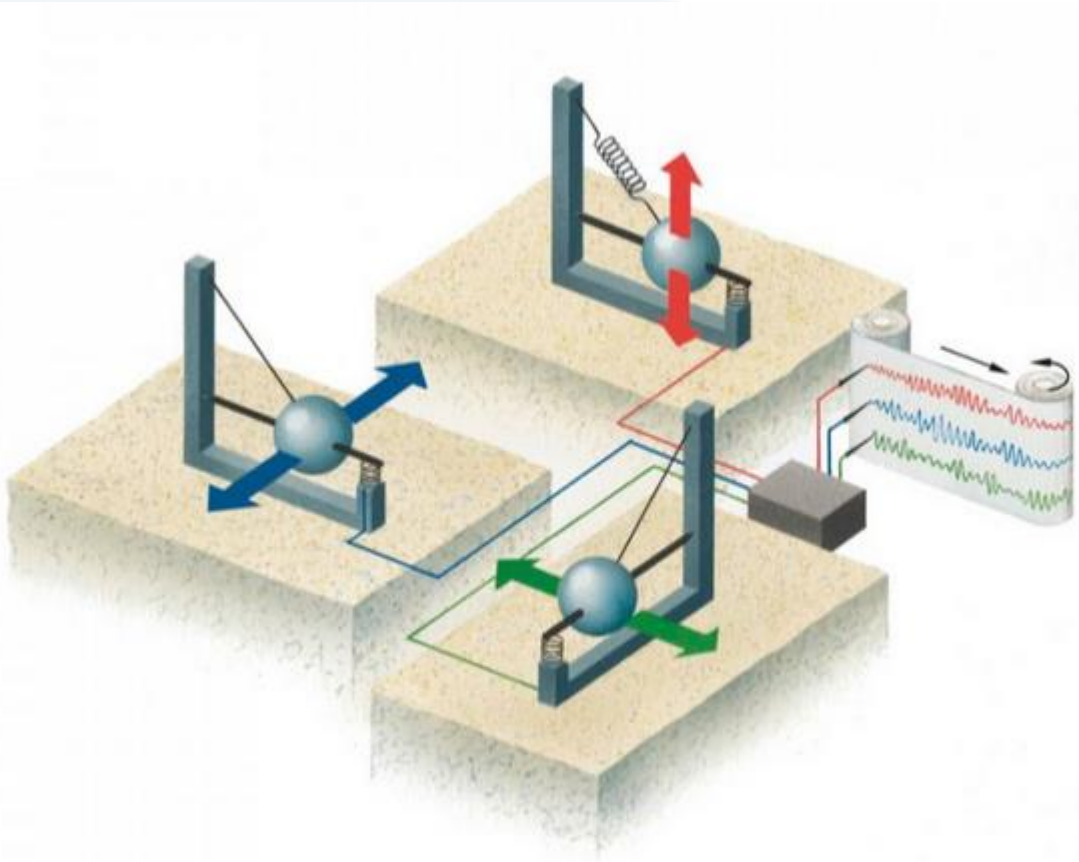
الفصل الثالث : خصائص الحركة الزلزالية (Characteristics of Earthquake Motion)

1 .3 مقدمة

ينتشر جزء من الأمواج المتحررة من الزلزال على شكل أمواج مرنة. بالقرب من بؤرة الزلزال تتواجد الأمواج الحجمية فقط (P و S)، وباستمرار صعود الأمواج باتجاه السطح تصادف هذه الأمواج طبقات تربة غير متجانسة فتخضع لانعكاسات وانكسارات متعددة على السطوح الفاصلة بين طبقات التربة وعلى سطح الأرض وهذا يؤدي إلى نشوء أنواع جديدة من الأمواج (الأمواج السطحية كأمواج ريليه وأمواج لوف). ينتشر كل نوع من هذه الأمواج بسرعته الخاصة التي تتعلق بخواص الوسط. تنتشر أمواج القص ذات الأهمية الكبيرة في الهندسة الزلزالية بسرعات تتجاوز 1000m/s في الصخور القاسية، وتنخفض إلى أقل من 100m/s في الترب الغضارية الرخوة.

تنتشر طاقة الأمواج الزلزالية في جميع الاتجاهات الأفقية والشاقولية ويتم تسجيل تسارعات هذه الأمواج بدلالة الزمن بواسطة أجهزة تدعى بالسيسموغراف توضع في ثلاثة اتجاهات (اتجاه شاقولي واتجاهين أفقيين شرق-غرب وشمال-جنوب) (الشكل المرفق)، وتدعى المنحنيات المسجلة بالسجلات الزمنية.

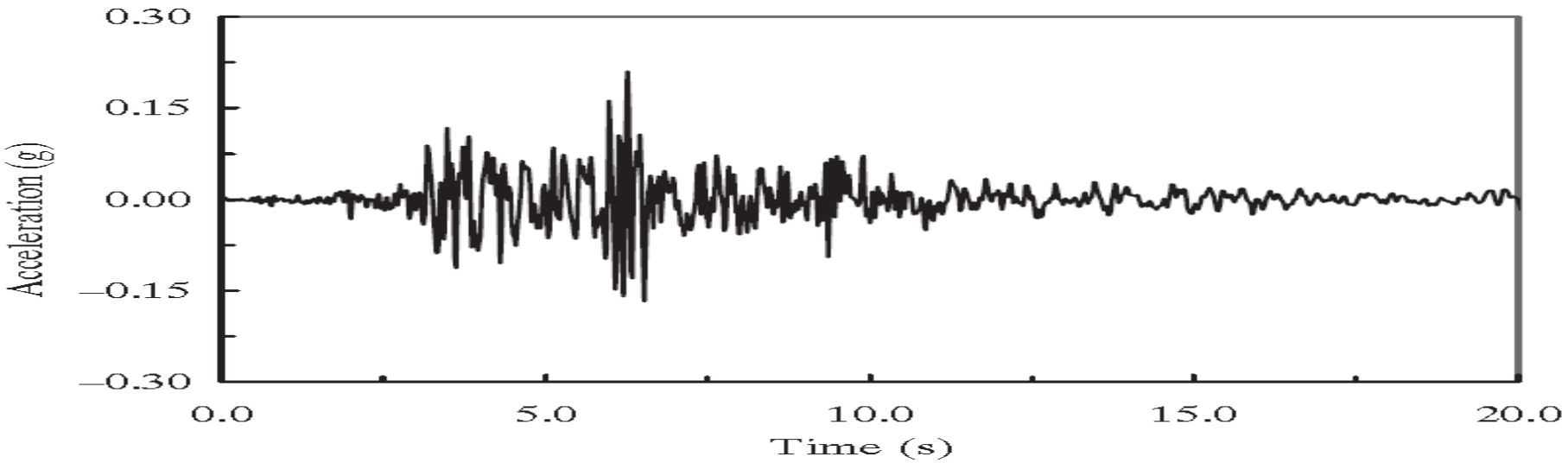


- the Z component measures up/down motion
- the E component measures east/west motion
- the N component measures north-south motion

A three-component seismometer. Z (red) measures up/down motion; E (green) measures east/west motion; N (blue) measures north/south motion.
BGS ©UKRI. All rights reserved.

3. 2 السجلات الزمنية

في مجال الهندسة الزلزالية نستخدم عادة التسارع الجزيئي لوصف حركة الأرض الناتجة عن الزلازل كونه البارامتر الفيزيائي الأكثر غنى والذي يتعلق مباشرة بالقوى التي تطبق على أساسات المنشآت في الهندسة المدنية. يتم تمثيل حركة أو اهتزاز سطح التربة أثناء الزلزال على شكل سجلات زمنية للتسارعات الجزيئية (الشكل):



الشكل 5.2: السجل الزمني للتسارع المسجل خلال زلزال ويستمورلاند– كاليفورنيا عام 1981.

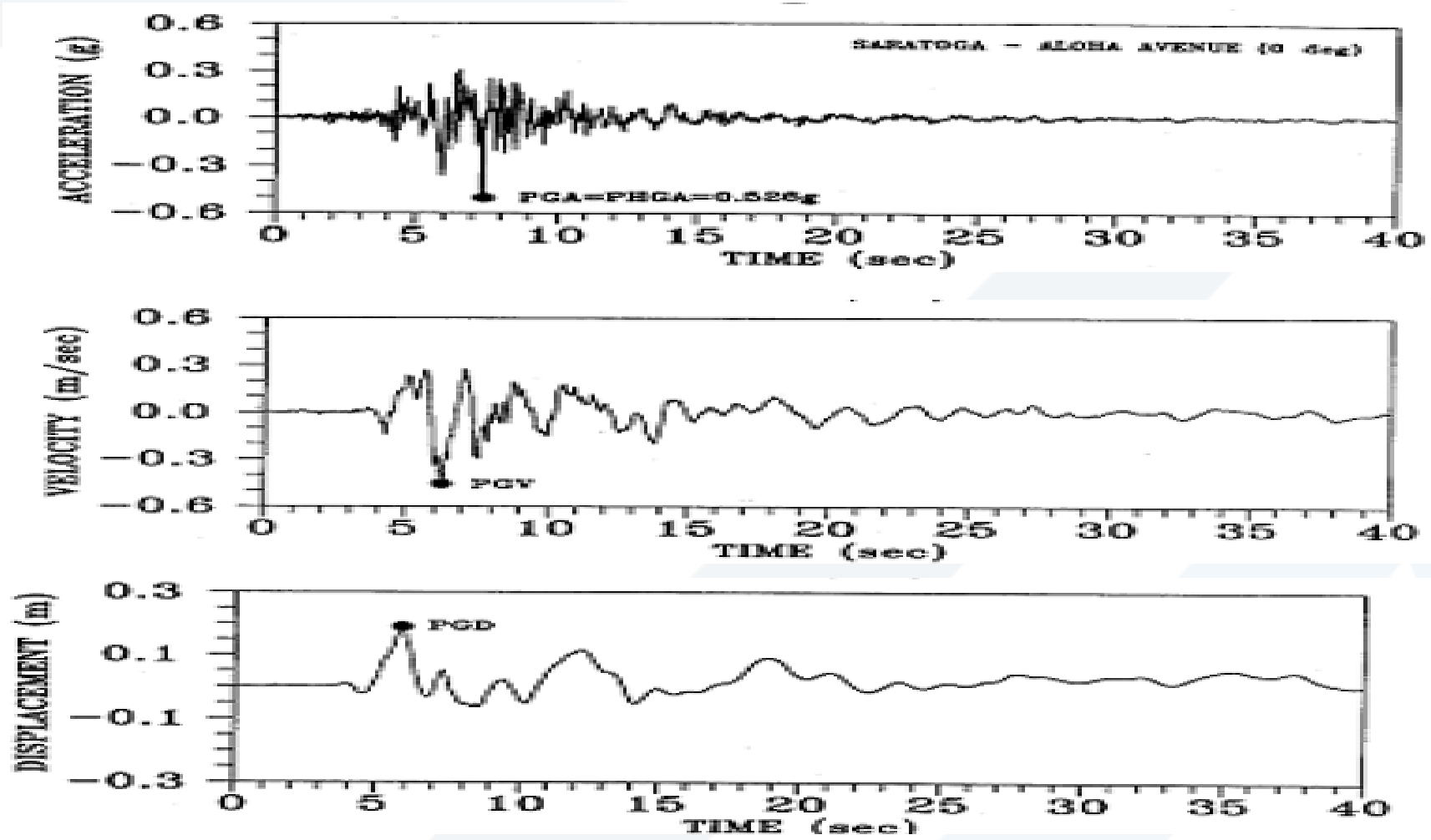
3. 3 بارامترات الحركة الزلزالية

تعتبر بارامترات الحركة الزلزالية أساسية من أجل وصف حركة الأرض أثناء الزلزال بشكل كمي موجز. تم اقتراح عدد من البارامترات أهمها مطال الحركة والمحتوى الترددي ومدة الحركة الزلزالية.

3. 3. 1 بارامترات المطال

يتم عادة وصف مطال حركة الأرض الزلزالية بواسطة مطال التسارع (PGA) ، كما يستخدم أحياناً مطال السرعة (PGV) أو مطال الانتقال (PGD) كما يمكن تمثيل القيم الثلاثة معاً (الشكل)

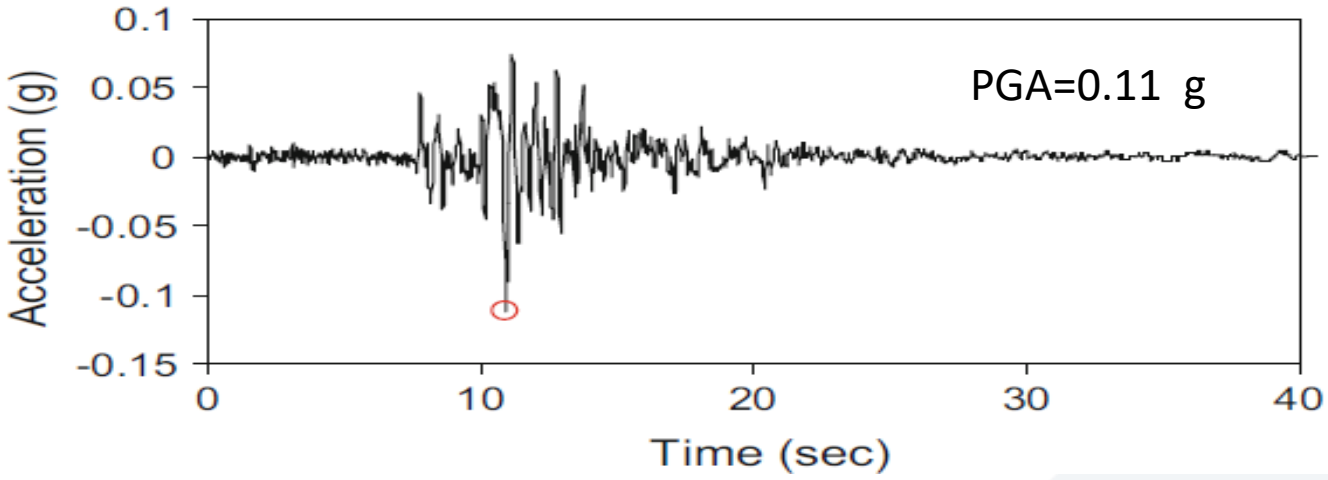
تعريف مطال التسارع (PGA) للحركة الزلزالية : يعرف مطال التسارع للحركة الزلزالية بالقيمة المطلقة العظمى لتسارع الحركة الزلزالية (الشكل)



PGA : Peak Ground Acceleration

PGV : Peak Ground Velocity

PGD : Peak Ground Displacement



هناك العديد من العلاقات التي تربط بين مطال التسارع الأفقي وبارامترات زلزالية أخرى، على سبيل المثال :

$$\log a_h = 0.16 I_{MM} + 0.2 M_L - 0.62 \log R + 0.61$$

a_h مطال التسارع الأفقي
I_{MM} شدة الزلزال بمقياس ميركالي
M_L الشدة الموضعية للزلزال بمقياس ريختر
R بعد الموقع عن مركز الزلزال بالكيلومتر

بشكل عام، التسارع الأفقي أكبر من التسارع الشاقولي. بالمقابل، لقد سجلت تسارعات شاقولية قريبة من التسارعات الأفقية وأحياناً أكبر منها في العديد من المواقع القريبة من مركز الزلزال، وقد تسببت بأضرار وانهيارات كبيرة في المنشآت.

3. 3. 2 بارامترات المحتوى الترددي (Frequency Content Parameters)

يصف المحتوى الترددي للحركة توزع مطال حركة الأرض بحسب مختلف الترددات الموجودة في هذه الحركة. نوضح فيما يلي أهم الأطياف المستخدمة من أجل توصيف المحتوى الترددي لحركة الأرض الزلزالية.

3. 3. 2. 1 أطياف حركة الأرض (Ground Motion Spectra)

نظراً لصعوبة دراسة سلوك التربة تحت تأثير الحمولات الاهتزازية العشوائية (الحركة الزلزالية) فإنه يفضل تحويل الحركة العشوائية إلى مجموعة حركات توافقة بسيطة بواسطة تحويل فورييه

تحويل فورييه :

تقوم الفلسفة الرئيسية وراء مبدأ تحويل فورييه Fourier Transform ، على تقسيم كل موجة اهتزازية إلى مجموعة موجات توافقية بسيطة ذات ترددات ومطالات وأطوار مختلفة. ليكن لدينا التابع $x_{(t)}$ الذي يعبر حركة اهتزازية ما، باستخدام تحليل فورييه يمكن كتابة هذا التابع على الشكل التالي:

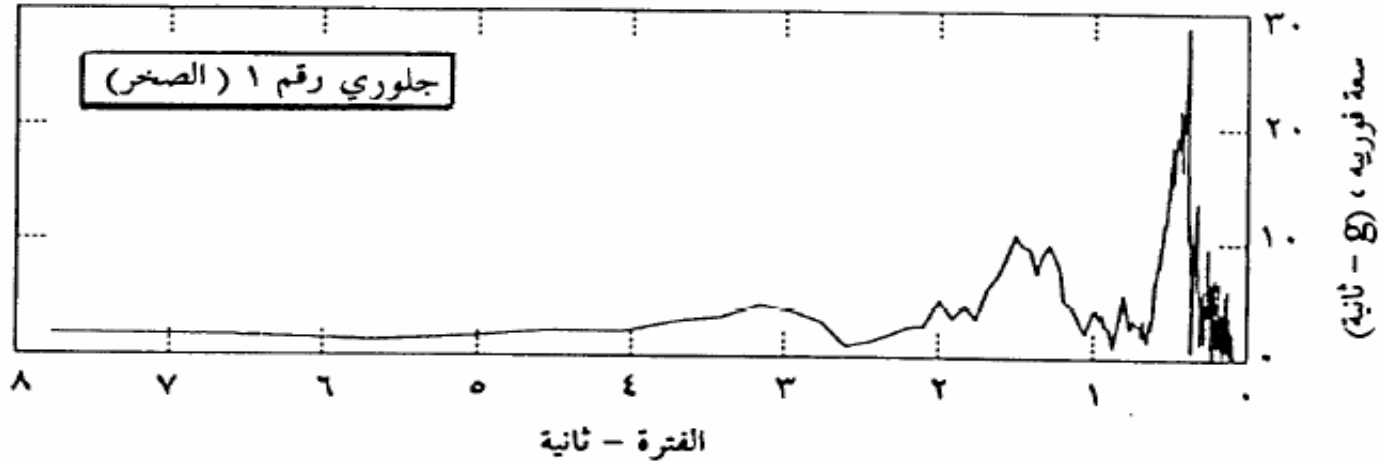
$$x_{(t)} = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(\omega_n t + \phi_n)$$

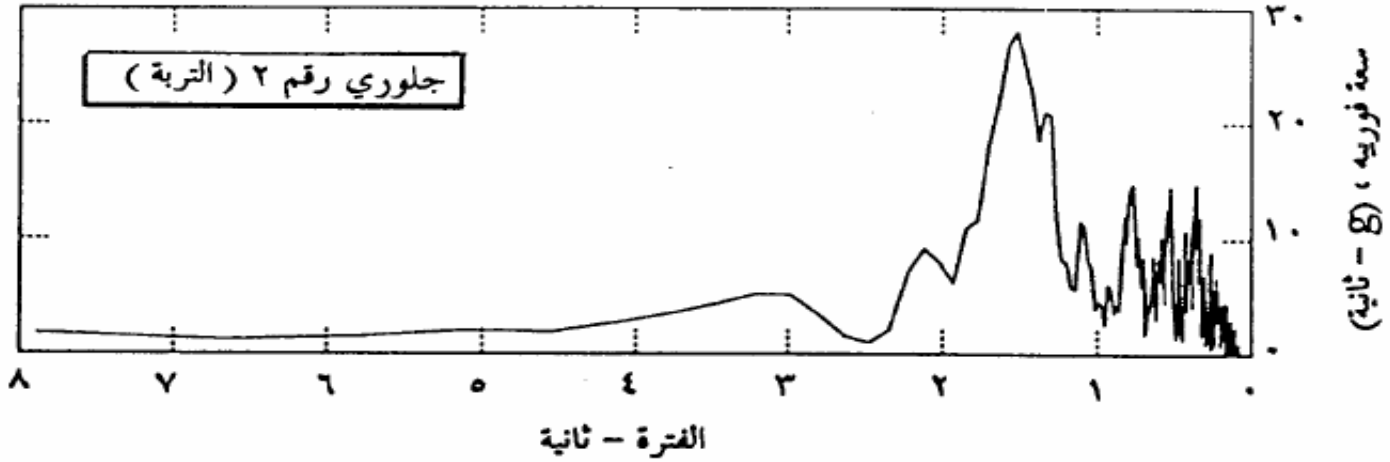
- **أطياف فوريه (Fourier Spectra)**

يدعى منحني مطال فوريه (Fourier Amplitude) بدلالة التردد (أو الدور) (C_n بدلالة ω_n من المعادلة السابقة) بطيف المطال لفوريه.

يوضح طيف المطال لفوريه لحركة الأرض كيفية توزع المطال بدلالة التردد (أو الدور)، وبالتالي فهو يعبر بوضوح عن المحتوى الترددي لهذه الحركة.

يمكن لطيف المطال أن يكون ضيقاً أو عريضاً. يدل الطيف الضيق على أن للحركة تردداً (أو دوراً) مسيطراً وهذا يمكن أن يولد سجلاً زمنياً أملساً وتقريباً جيبياً للحركة. أما الطيف العريض فيوافق حركة تحتوي على مجموعة من الترددات (أو الأدوار) ويمكن أن تولد سجلاً زمنياً للحركة أقل انتظاماً من السابق.


جلوري رقم ١ (الصخر)
٣٠
٢٠
١٠
٠
٨ ٧ ٦ ٥ ٤ ٣ ٢ ١ ٠
الفترة – ثانية
سعة فوريه ، (g – ثانية)

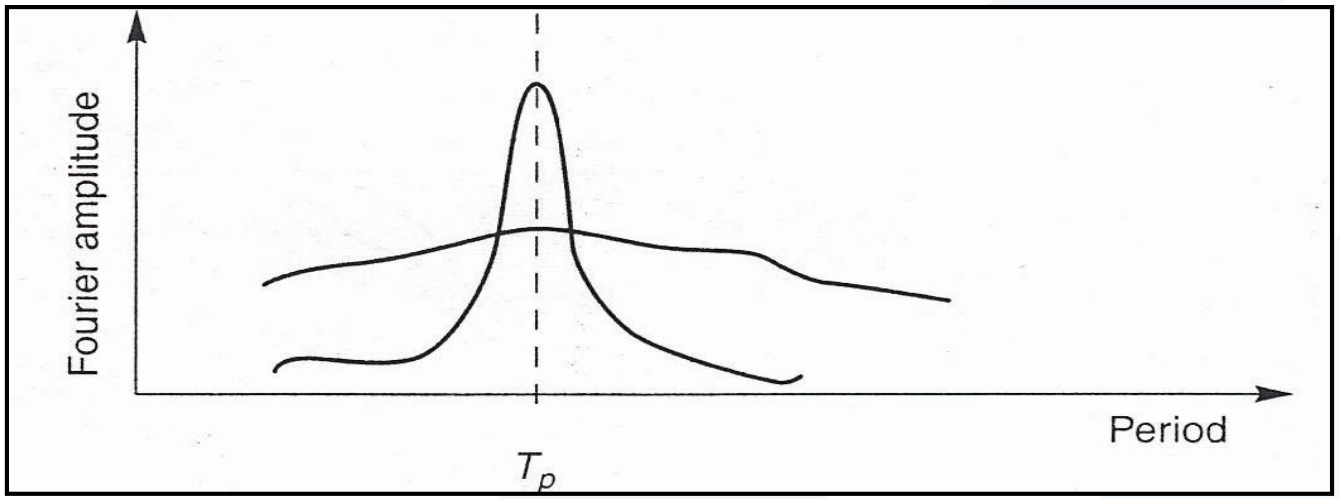

جلوري رقم ٢ (التربة)
٣٠
٢٠
١٠
٠
٨ ٧ ٦ ٥ ٤ ٣ ٢ ١ ٠
الفترة – ثانية
سعة فوريه ، (g – ثانية)

3. 3. 2. 2 البارامترات الطيفية (Spectral Parameters)

طيف الاستجابة تابع معقد ووصفه بشكل كامل يحتاج لعدد كبير من البارامترات، وقد تم اقتراح عدد من البارامترات اللازمة لتوصيف الطيف أهمها **الدور المسيطر و عرض الحزمة ومدة الحركة الزلزالية**.

أ- الدور المسيطر (Predominant Period)

يعرف الدور المسيطر Tp بأنه دور الاهتزاز الموافق للقيمة العظمى لطيف فوريه للمطال. يتم عادة تحديد الدور المسيطر بسهولة انطلاقاً من طيف أملس (Smoothed Spectrum)، كما أنه يمكن لحركتين مختلفتين تماماً أن يكون لهما نفس الدور المسيطر (الشكل).



الشكل : طيفا مطال فوريه لهما نفس الدور المسيطر ولكن المحتوى الترددي لهما مختلف جداً

ب- عرض الحزمة (Bandwidth)

يمكن أن يستخدم الدور المسيطر لتحديد القيمة العظمى لمطال الطيف ولكنه لا يقدم أية معلومات عن توزع مطال الطيف حول الدور المسيطر. يعرف عرض الحزمة لطيف فورييه للمطال بأنه مجال الترددات الذي يتجاوز ضمنه مطال فورييه مستوى محدد. يعتبر هذا المستوى عادة مساوياً لـ $\frac{1}{\sqrt{2}}$ مطال فورييه الأعظمي. يتم عادة تحديد عرض الحزمة اعتماداً على أطياف ملساء.

ت- مدة الحركة الزلزالية (Duration)

يمكن أن يكون لمدة حركة الأرض الزلزالية $\mathbf{T_d}$ تأثير كبير على الأضرار الناتجة عن الزلزال. تتأثر العديد من الظواهر الفيزيائية المرافقة للزلازل بعدد مرات انعكاس اتجاه التحميل (عدد أشواط التحميل) وبالتالي بالحمولة الناتجة عن هذا الانعكاس. من أهم هذه الظواهر: الانخفاض التدريجي لصلابة ومقاومة بعض المنشآت و زيادة ضغط الماء المسامي في الترب الرملية المخلخلة المشبعة.

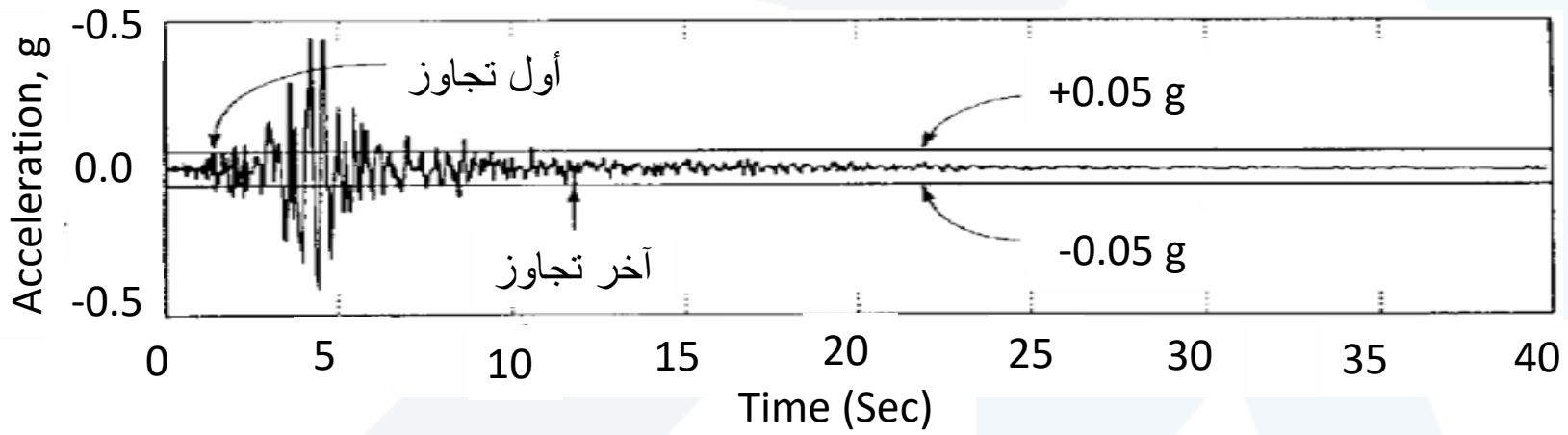
يمكن للحركات ذات المدة القصيرة ألا تحدث حمولة منعكسة الاتجاه كافية لإحداث أضرار في المنشأ حتى لو كان مطال الحركة كبيراً. بالمقابل، يمكن للحركات الزلزالية ذات المطال المعتدل والمدة الطويلة أن تولد حمولات منعكسة الاتجاه كافية لإحداث أضرار هامة بالمنشآت.

تتعلق مدة الزلزال بالعديد من العوامل، أهمها :

- الزمن اللازم لتحرير طاقة التشوه المتراكمة عن طريق الانهيار على طول الفالق. كلما زاد طول أو مساحة الفالق كلما زاد الزمن اللازم للانهيار. بالنتيجة، تزداد مدة الزلزال بزيادة شدته.
- طبيعة طبقات التربة التي تعبرها الاهتزازات الناتجة عن الزلزال حتى وصولها إلى سطح الأرض. على سبيل المثال، لوحظ في العديد من الزلازل أن وجود الأحواض الرسوبية يطيل من مدة الزلزال، ويعود ذلك إلى انحباس الأمواج الاهتزازية ضمن الحوض، وبالتالي تكرار انعكاس الأمواج على قاعدة الحوض وصعودها إلى السطح (زلزال كوبيه، اليابان 1994).

يحتوي السجل الزمني للتسارع على جميع الترددات من بدء الزلزال حتى تصبح حركة الأرض مكونة من الضجيج (Background noise). من أجل الأغراض الهندسية، يهتم المهندسون فقط بجزء من هذا السجل الذي تكون الحركة ضمنه قوية.

هناك عدة طرق لتحديد مدة الحركة القوية لسجل زلزالي للتسارع، أكثرها انتشاراً تعتبر مدة الزلزال مساوية للزمن المحصور بين أول وآخر تجاوز لعتبة التسارع (عادة العتبة مساوية لـ $\pm 0.05\,g$



الشكل : تحديد مدة حركة الأرض الزلزالية للحركة Gilory No.1 (Td1=9.8 sec)

شدة الزلزال	مدة الزلزال بالثواني	
	المواقع الصخرية	المواقع الترابية
5.0	4	8
5.5	6	12
6.0	8	16
6.5	11	23
7.0	16	32
7.5	22	45
8.0	31	62
8.5	43	86

الجدول : مدة الزلزال للعديد من المواقع المتوضعة على بعد أقل من 10 كم عن المصدر الزلزالي (Chang and Krinitszky 1977)