

الفصل الثاني

استجابة المنشآت للحمولات الديناميكية

1-2- أساسيات في الديناميك

1-1-2- تمهيد عام:

يمكن أن يعد علم ديناميك المنشآت من العلوم الأساسية في علم ميكانيك الإنشاءات، ويعرف بأنه العلم الذي يصف ويتوقع حالات السكون (الستاتيك) أو الحركية للمنشآت تحت تأثير الحمولات الديناميكية أو الحمولات التابعة للزمن، ومن ثم يعمل على توصيف استجابة هذه المنشآت تحت تأثير هذا النوع من الحمولات. إن هذا العلم لا يعتمد على الملاحظة والخبرة فحسب، بل يعتمد على المنطق في التحليل، وعلى حل المعادلات الرياضية المعقدة في حالات معينة، وهو بذلك لا يعتبر علماً نظرياً معقداً، وإنما يحمل في جوانبه علماً هندسياً تطبيقياً.

يهدف التحليل الديناميكي إلى دراسة السلوك الديناميكي للمنشآت وتحديد خصائص العلاقة بين القوى والأفعال الخارجية المطبقة على هذه المنشآت واستجاباتها، وذلك بعد نمذجتها وفق نماذج مبسطة ذات درجات حرية قليلة تسهل دراستها، وتحكم هذه النماذج المبسطة معادلات تفاضلية ناظمة للحركة.

في الواقع، إن الجمل الإنشائية تملك عدداً لا متناه من درجات الحرية، التي تحدد حالتها في كل لحظة زمنية، بالتالي ستكون الدراسة معقدة جداً، لذلك كان لا بد من محاولة تبسيطها بإعداد نماذج مأمثلة، تعرف بالنماذج الفيزيائية (Physical models).

تعتمد عملية النمذجة هذه بشكل أساسي على تخفيض عدد درجات الحرية بقدر الإمكان وذلك من خلال اعتبار درجات الحرية باتجاه الحركة الأساسية للجمل فقط والكافية لوصفها بشكل مقبول، حيث تحذف درجات الحرية المقيدة، ودرجات الحرية غير المحرصة. كما أنه من الضروري عند نمذجة جمل إنشائية ما اعتماد بعض الفرضيات المبسطة، مع مراعاة أن يحاكي النموذج المبسط سلوك المنشأة بشكل مقبول.

لا يمكن التطرق إلى العلاقة حمولة - استجابة عند وضع النموذج الفيزيائي لجمل ما إلا بعد تحديد النموذج الرياضي والخصائص الذاتية لمكوناته، ومن ثم دراسة العلاقة بين تحريضه واستجابته على ضوء القوانين الفيزيائية الناظمة لسلوكه، عندها يصبح من السهل صياغته بشكل جمل من المعادلات تضمن عمل مركبات النظام مع بعضها بعضاً وتكون قادرة على وصف سلوكه الديناميكي بدقة مقبولة. تملك هذه المعادلات في أغلب الأحيان الشكل التفاضلي، ولكنها قد تأخذ الشكل التكاملي أو قد تكون بشكل معادلات فروق جبرية.

بالنتيجة، يعتمد أسلوب حل مسائل ديناميك الإنشاءات على الفهم الكامل لطبيعة المنشأة الفيزيائية وعناصرها، وأيضاً على نمذجة المنشأة بشكل مبسط، ووضع العلاقات الرياضية الممثلة للنموذج، ليصار إلى حل هذه المعادلات ومناقشة النتائج ومحاولة ربطها بالواقع العملي وتدقيق مدى منطقيتها.

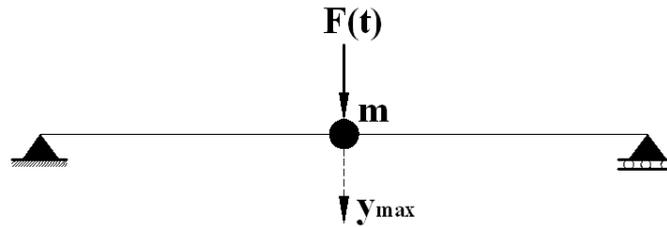
ولتوضيح المبادئ الأساسية التي تصب في حقل الديناميك، جرت العادة على تطبيقها على أنظمة ميكانيكية قابلة للتمثيل بدرجة حرية واحدة (SDOF) (Single-Degree-Of-Freedom System) باعتبارها أبسط النماذج الفيزيائية التي تساعد على الانطلاق بدراسة موضوع الديناميك، ثم يتم الانتقال بعد ذلك لتطبيقها على أنظمة أكثر تعقيداً. وللبداء بهذا الأمر، فإنه يجب تذكير الدارس ببعض المبادئ والمفاهيم الأساسية، واستعراضها على النحو التالي:

أ - درجات الحرية (Degrees of Freedom):

تعرف درجات الحرية بعدد الإحداثيات المستقلة كانتقال أو دوران، والتي تقوم بتحديد شكل تشوه منشأة أو مكان توضعها في أية لحظة زمنية معينة (t)، وذلك نتيجة تطبيق حمولات ديناميكية عليها.

- حالة جائر بسيط خاضع لحمولة ديناميكية في منتصفه (الشكل 1-2):

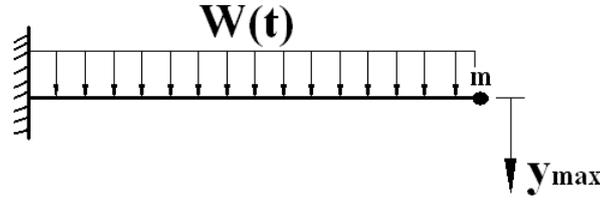
يبدو لأول وهلة أن عدد درجات الحرية في هذا الجائر لا متناه، ولكي نستطيع تحليله نقوم بتقريبه إلى عدد متميز أو محدد من درجات الحرية، لذلك نعتبر كتلة الجائر مركزة في منتصفه عند نقطة تطبيق القوة حيث يكون الانتقال أعظماً والدوران معدوماً. وبإهمال الانتقال الأفقي، يبقى الانتقال الشاقولي الأعظمي y_{max} فقط، بمعنى تم تبسيط الجائر ليصبح منشأة وحيدة درجة الحرية.



الشكل (1-2): جائر وحيد درجة الحرية

- حالة ظفر معرض لحمولة ديناميكية موزعة بانتظام وتابعة للزمن (الشكل 2-2):

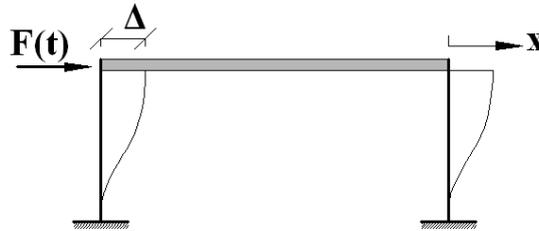
إن العامل المهم في هذه الحالة هو اعتماد الانتقال الأعظمي في الطرف الحر y_{max} ، لذلك يمكن اعتبار كتلة الظفر مركزة في الطرف الحر، فيتم الحصول على منشأة وحيدة درجة الحرية.



الشكل (2-2): جانز ظفري وحيد درجة الحرية

- حالة إطار مستوي معرض لحمولة ديناميكية أفقية تؤثر في البلاطة (الشكل 3-2):

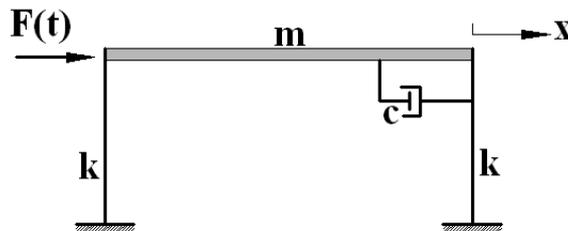
بفرض أن البلاطة صلبة جداً، أي الدورانات مهملة، وباعتبار أن الأعمدة مرنة وكتلتها مهملة مقارنة مع كتلة البلاطة، وأن التشوهات الشاقولية مهملة أيضاً، فيبقى الانتقال الأفقي فقط، وبهذا يتم تحويل المنشأة المعقدة متعددة درجات الحرية إلى منشأة وحيدة درجة الحرية في الاتجاه الأفقي x .



الشكل (3-2): إطار وحيد درجة الحرية

ب - النموذج الرياضي (Mathematical Model):

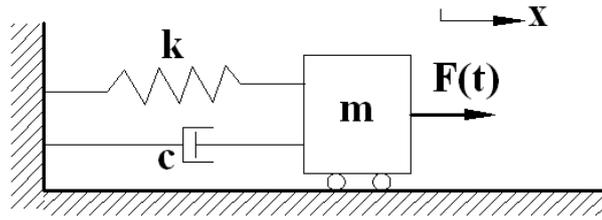
يعرف النموذج الرياضي بأنه الشكل المبسط للنموذج الهندسي المبين في الشكل (4-2) والذي يمثل المنشأة الفيزيائية الحقيقية المعقدة. يتم اعتماد النموذج الرياضي لتبسيط عملية تحليل المنشأة وتحديد استجابتها الفعلية من خلال حل جملة معادلات رياضية، تمثل هذا النموذج.



الشكل (4-2): النموذج الهندسي لإطار وحيد درجة الحرية

يمكن تمثيل الإطار الميّن في الشكل (4-2) بالنموذج الرياضي الموضح في الشكل (5-2)، والذي يتكون من العناصر التالية:

- القوة الديناميكية الخارجية المطبقة كتابع للزمن $F(t)$.
- كتلة المنشأة m ، وهي تمثل خواص العطالة للمنشأة.
- النابض، ويمثل صلابة المنشأة التي يرمز لها بـ k .
- المخمد، ويمثل التخامد في المنشأة الذي يرمز له بـ c .



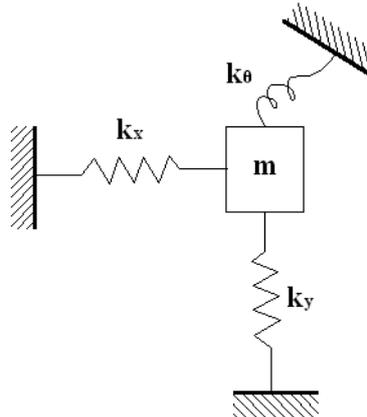
الشكل (5-2): النموذج الرياضي للإطار

في الواقع، إن ثابت صلابة النابض المرن k يمثل قوة التعديل المرنة في واحدة الطول، التي تحاول إعادة المنشأة إلى شكلها الأولي قبل التشوه، وهذه القوة تنتج من تحول الطاقة الكامنة المخزنة في المنشأة المرنة إلى عمل. بالمقابل فإن ثابت التخامد c يمثل نسبة من الضياع أو فقدان الطاقة بسبب الانتقال أو التشوه. هكذا يمكن تمثيل كل عقدة في المنشآت المستوية بثلاث درجات من الحرية: انتقالان أفقي وشاقولي ودوران، ففي النموذج الرياضي للعقدة الصلبة المبيّنة في الشكل (6-2) يكون هنالك ثلاث درجات حرية وهي: انتقالان (x & y) ودوران (θ)، بالتالي يمكن كتابة المعادلات التالية:

$$F_x = k_x x$$

$$F_y = k_y y$$

$$M = k_\theta \theta$$



الشكل (2-6): النموذج الرياضي لعقدة صلابة في المستوي

ج - ليونة عنصر (Member Flexibility):

هي الخاصية التي تعبر عن إمكانية تشوه عنصر ما تحت تأثير قوى مطبقة عليه. ويعرف ثابت المرونة بأنه الانتقال في واحدة القوة، ووحدته الدولية (m/N) .

د- صلابة عنصر (Member Stiffness):

الصلابة هي ممانعة العنصر للتشوه أو الحركة، بمعنى مقاومته للقوى المطبقة عليه. ويعرف ثابت الصلابة (k) بأنه القوة في واحدة الطول لتشوه المنشأة، ووحدته الدولية (N/m) .

هـ - مبدأ دالامبير:

يعتمد هذا المبدأ على التوازن الستاتيكي في لحظة زمنية محددة أثناء الاهتزاز، وتصبح المنشأة بحالة توازن عندما يكون مجموع القوى المؤثرة فيها معدومة.

و- قانون نيوتن الثاني:

يتعرض الجسم أو المنشأة لحركة بتسارع متناسب مع محصلة القوى المطبقة عليه (قوى أو عزوم)، وذلك عندما لا تكون هذه المحصلة معدومة، ويمكن التمييز بين حالتين:

- حالة التسارع الخطي: يكون لدينا $(\sum \vec{F} \neq 0)$ ، بالتالي:

$$\sum \vec{F} = m \vec{a}$$

حيث: $\sum \vec{F}$ محصلة القوى، \vec{a} شعاع التسارع، m الكتلة.

- حالة التسارع الزاوي أو الدوراني: يكون لدينا $(\sum M \neq 0)$ ، بالتالي:

$$\sum M = I \alpha$$

حيث: $\sum M$ محصلة العزوم، I عزم العطالة، α التسارع الزاوي.

ز - التواتر الطبيعي الدوراني ω (Circular Natural Frequency):

هو قيمة الزاوية بالراديان خلال ثانية على مسار دائري أو السرعة الزاوية التي تنتقلها كتلة نقطية مكافئة لكتلة المنشأة وتحاكي حركتها أثناء الاهتزاز، ويرمز له بـ ω ، وبوحدة (rad/sec) ، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

يلاحظ بأن هذا التواتر ω (النض) يرتبط فقط بصلابة المنشأة وكتلتها، وليس له علاقة بالقوى الخارجية المطبقة ولا بالشروط الأولية.

ح – التواتر الطبيعي f (Natural Frequency):

هو عدد الدورات الكاملة في الثانية الواحدة التي تقوم بها الكتلة النقطية المكافئة لكتلة المنشأة أثناء الحركة التي تقوم بها، ويرمز للتواتر الطبيعي بـ f بوحدة دورة في الثانية (cps) أو بالهيرتز (Hz)، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

ط – الدور الطبيعي T (Natural Period):

هو الزمن اللازم لإتمام دورة كاملة خلال اهتزاز المنشأة، ويرمز له بـ T ، ووحدته الثانية (sec)، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

نلاحظ بأن الدور يزداد بازدياد كتلة المنشأة، وينقص بازدياد صلابتها.

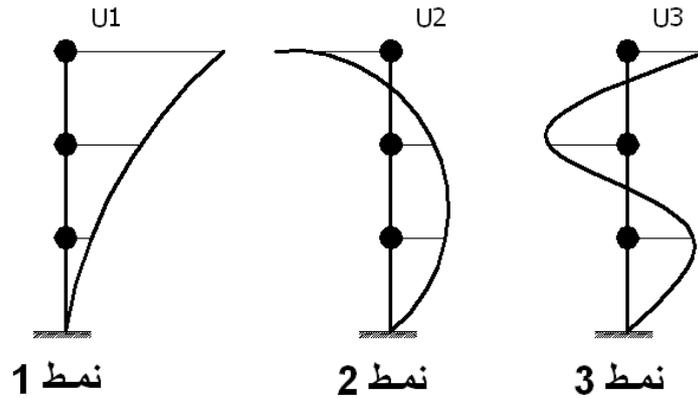
وبشكل عام تتراوح قيم الدور الطبيعي للمنشآت الهندسية بين ($0.1to6sec$). وفيما يخص التربة تقل قيمة الدور بازدياد متانتها وقوامها، فتتراوح قيم الدور للتربة الجيدة والصخرية بين ($0.1to.3sec$)، وتزداد للتربة الضعيفة ($0.5to2sec$).

2-1-2- أنماط الاهتزاز وتراكبها:

عندما تخضع منشأة ما إلى حمولة ديناميكية متغيرة مع الزمن (رياح، زلازل، صدم، انفجار، اهتزازات بكل أنواعها...)، فإنها تستجيب لهذه الحمولة وتبدي أنماط (أطوار) اهتزاز مختلفة (الشكل 7-2):

- نمط اهتزاز أساسي (أولي...)

- أنماط اهتزاز ثانوية.



الشكل (7-2): أنماط اهتزاز منشأة ما خاضعة لحمولة ديناميكية

لكل نمط من هذه الأنماط دور اهتزازي خاص به. وغالباً ما يكون النمط الأول هو المسيطر في التصميم عندما تكون المنشأة منتظمة ومتناظرة حيث أثبتت الدراسات الديناميكية أنه يتم صرف طاقة تزيد عن 90% في هذا النمط مقارنة مع الطاقة الكلية لأنماط الاهتزاز كافة. ومع هذا تعتمد برامج الحساب طرائق مختلفة عند تجميع أثار الأنماط (تراكباتها) وتقدير الاستجابة الأعظمية المحتملة للمنشأة (انتقال، قوة، عزم، الخ...)، ونبين فيما يلي الطرائق الأكثر شيوعاً:

- طريقة التجميع بالقيم المطلقة ABS:

في هذه الطريقة، يتم الحصول على الانتقالات الأعظمية باعتبار أن كل كتلة تتعرض لانتقال أعظمي بقيمة مطلقة بالرغم من أن الانتقالات الأعظمية تحت بأزمة مختلفة، وتعتبر هذه الحالة عن الانتقالات الأعظمية التي لا يمكن للمنشأة أن تتجاوزها مهما كانت الحمولات الديناميكية مطبقة عليها، وهي بالتالي تعتبر طريقة محافظة جداً.

- طريقة التجميع بالجذر التربيعي لمجموع مربعات الاستجابة SRSS:

(Square Root of Sum of Squares)

يتم الحصول على الانتقالات الأعظمية باعتبار أن كل كتلة تتعرض لانتقال أعظمي بقيمة مطلقة رغم أنها بوقت مختلف. فعند دراسة الانتقال في نقطة ما للنموذج المبين أعلاه، (الشكل 2-1)، يكون لدينا:

$$U_{\max} = \sqrt{U1_{\max}^2 + U2_{\max}^2 + U3_{\max}^2}$$

وجد أن قيم الاستجابات التي تعطيها هذه الطريقة تقع بين قيم الطريقة النظرية الدقيقة وطريقة القيم المطلقة ABS، وهي تعتبر طريقة اقتصادية ومقبولة.

- طريقة التراكب التربيعي التام CQC:

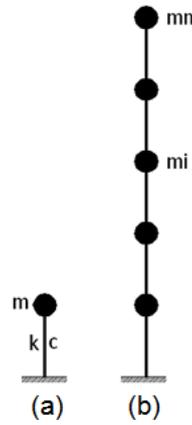
(Complete Quadratic Combination)

إن هذه الطريقة هي الأكثر استخداماً، وتعتبر بديل أدق من الطرائق سابقة الذكر في كثير من المنشآت. تعتمد هذه الطريقة على نظريات الاهتزاز العشوائي، وهي تأخذ بالحسبان ترابط الأنماط الناتج عن التخميد الطيفي، حيث تبين وجود عدم استقلالية كاملة لبعض الأطوار المتجاورة، وذلك لبعض المنشآت الفراغية. يتم حساب الاستجابة، وفق هذه الطريقة، عن طريق إيجاد المجموع الثنائي لقيمة كل عامل من عوامل الاستجابة المرنة لكل نمط متأثراً بقيمة الأنماط القريبة منه والذي يمكن تمثيله بعامل العلاقة المتبادلة بين كل نمطين مدروسين (عامل ارتباط الأطوار $\rho < 1$)، ومن ثم يؤخذ الجذر التربيعي لهذا المجموع. وأيضاً، وجد أن قيم الاستجابات التي تعطيها هذه الطريقة تقع بين قيم الطريقة النظرية الدقيقة وطريقة القيم المطلقة ABS، وهي أقرب إلى طريقة SRSS، بل أكثر دقة منها وأنها تحتاج بالضرورة لاستخدام الحاسب.

تحدد الخواص الديناميكية لمنشأة ما (الدور، التردد، النبض، أنماط الاهتزاز...) من خلال دراسة وتحليل النموذج

الممثل بهزاز بسيط أو متعدد (مركب) (الشكل 8-2)، منطلقين من صياغة المعادلات العائدة لكل من:

- الطاقة الكامنة في النابض
- الطاقة الحركية للكتلة
- العمل المتخادم في المخمد لفعل القوة الخارجية
- والعمل المعطى من القوة الخارجية.

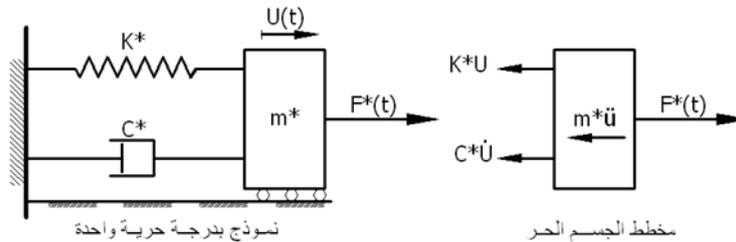


الشكل (8-2): (a) هزاز بسيط - (b) هزاز مركب

عندما لا تخضع المنشأة لقوى خارجية تفودنا المسألة لدراسة هزاز حر، أما عندما تخضع لتحريض خارجي سواءً أكان هذا التحريض قوة ديناميكية خارجية مطبقة (الشكل 9-2)، أو بتأثير حركة مسند (تحريض زلزالي)، (الشكل 10-2)، فنتجه نحو دراسة ما يسمى الاهتزازات القسرية. ونبين فيما يلي المعادلة العامة لحركة هزاز بسيط ما:

$$m^* \ddot{u} + c^* \dot{u} + k^* u = 0 \text{ or } F^*(t)$$

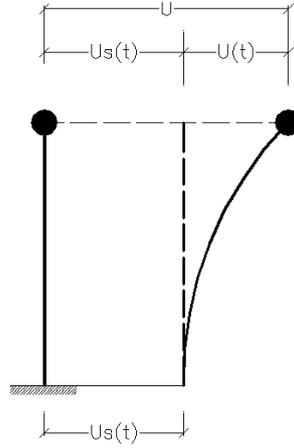
حيث m^* , c^* , k^* : الصلابة المعممة (النابض)، التخادم المعمم (المخمد)، والكتلة المعممة للجملية.



الشكل (9-2): هزاز بسيط محرض بقوة خارجية

وفي حالة الهزاز المركب القسري، تكتب الصيغ العامة لمعادلة الحركة كما يلي:

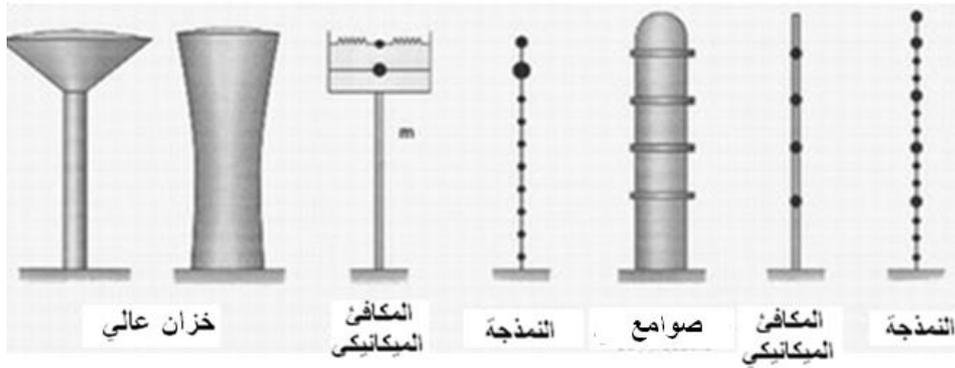
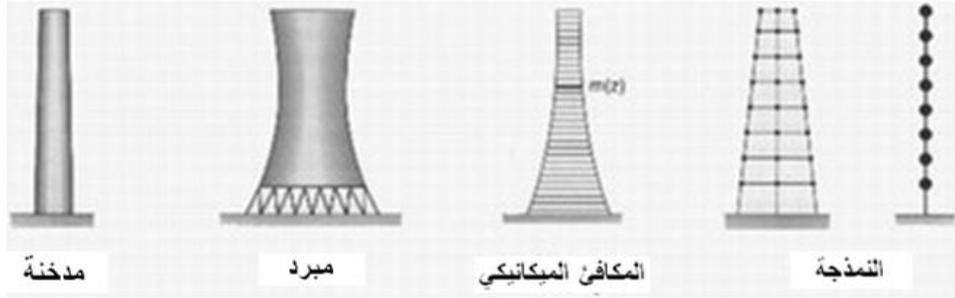
- قوة خارجية: $M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU = F(t)$
 - حركة مسند (زلزال): $M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU = \Gamma\ddot{U}_s(t)$
- حيث: $\ddot{U}_s(t)$: تسارع حركة التربة
- الانتقال المطلق: $U = U(t) + U_s(t)$
- $U_s(t)$: انتقال التربة، و $U(t)$: الانتقال النسبي للكتلة.



الشكل (10-2): هزاز بسيط محرض عند الأساس (زلزال)

ويتم حل المعادلة في هذه الحالة بطرائق مختلفة، وموضحة بالتفصيل في دروس علم ديناميك الإنشاءات. يبين الشكل (11-2) طريقة نمذجة المنشآت كأظفار شاقولية مع كتل مركزة، حيث نلاحظ أن هذه العملية (النمذجة) تترجم السلوك الحقيقي للمنشآت.





الشكل (11-2): نمذجة المنشآت الهندسية كأظفار شاقولية

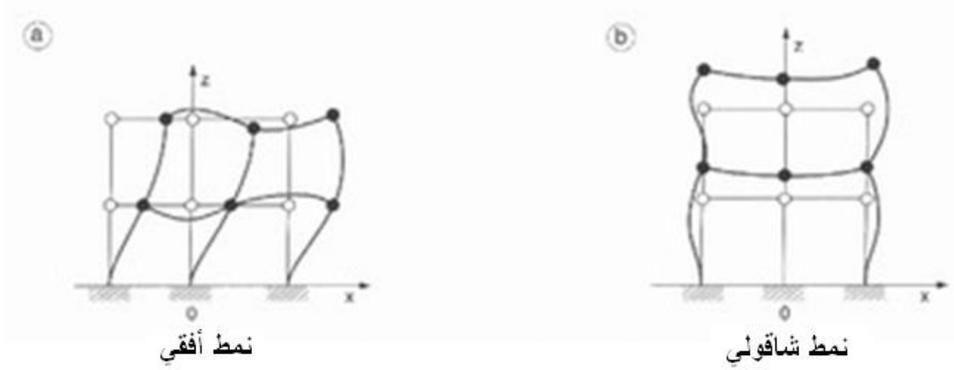
يوضح الشكل (12-2) ثلاثة أنماط اهتزاز مهمة في تحديد الاستجابة الديناميكية لمنشأة مكونة من ثلاثة طوابق (نموذج فراغي) بحيث تم تركيز الكتلة في العقد (نمذجة العقد):

- نمط أفقي رئيس
- نمط ثانوي شاقولي
- نمط فتلي.



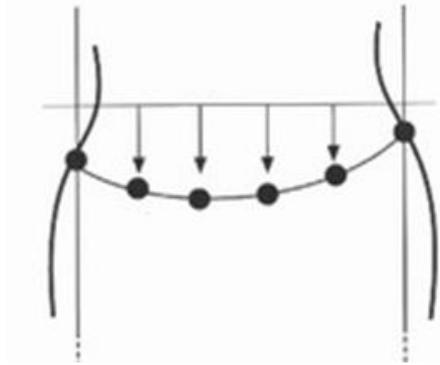
الشكل (12-2): أنماط الاهتزاز المهمة لنموذج فراغي خاضع لفعل زلزالي

وفي حالة المنشآت المتناظرة يمكن اعتماد النموذج المستوي المكافئ حيث تكون الأنماط المؤثرة هي النمطان الأفقي والشاقولي (الشكل 13-2).



الشكل (13-2): أنماط اهتزاز نموذج مكافئ - جملة متناظرة

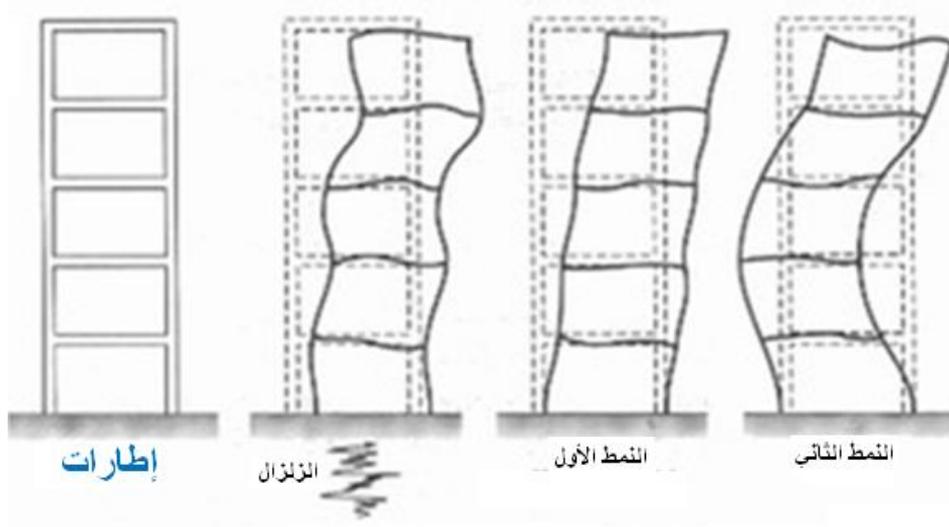
ويجب الانتباه عند إعداد النمذجة لمنشأة تتأثر بالزلازل الشاقولي (مجازات كبيرة) بحيث نعمل على إضافة عقد ثانوية لهذا النموذج كما هو مبين في الشكل (14-2).



الشكل (14-2): إضافة عقد ثانوية للنموذج - زلازل شاقولي

وتبين الأشكال (من 15-2 حتى 18-2) أنماط الاهتزاز الرئيسية المعتمدة في الكودات العالمية عند دراسة المنشآت المتناظرة الخاضعة لأفعال زلزالية وفقاً للطرائق الستاتيكية المكافئة.

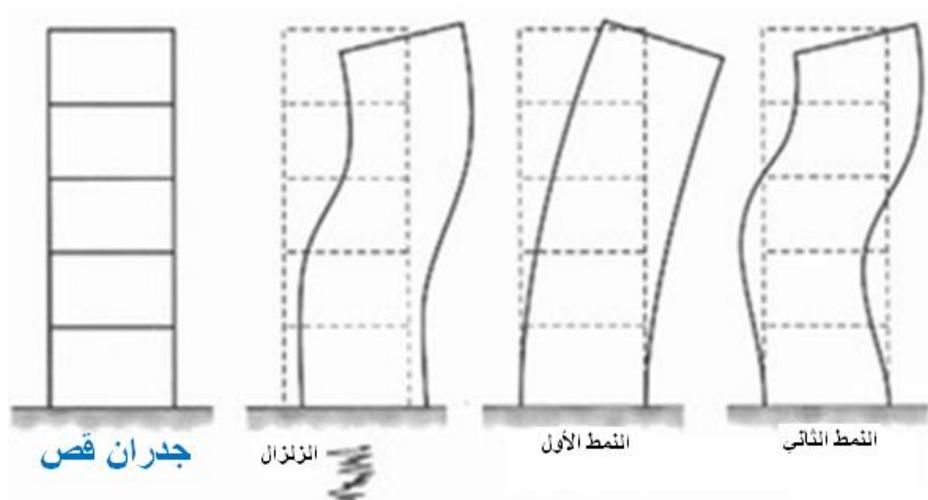
- حالة الإطارات المقاومة للعزوم
- حالة الجدران الإنشائية (جدران قص)



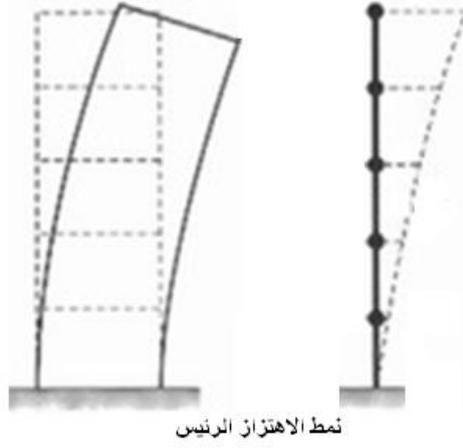
الشكل (2-15): أنماط تشوه المنشآت الإطارية (تشوه قصي)



الشكل (2-16): نمط الاهتزاز الرئيس المعتمد من قبل الكودات العالمية - حالة منشأة إطارية

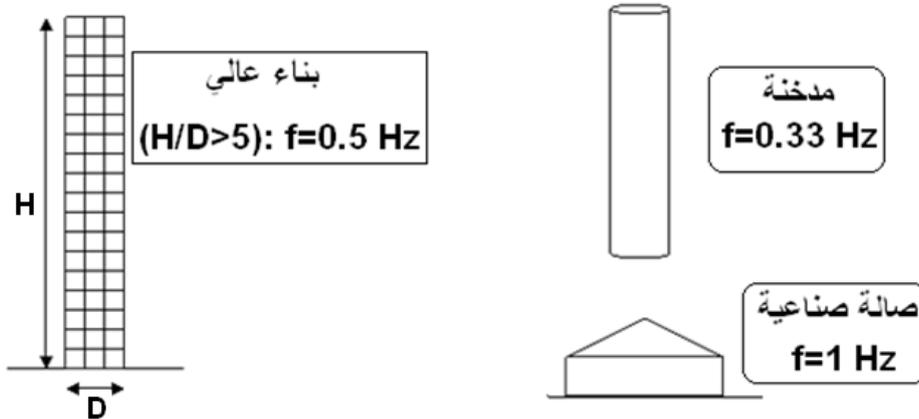


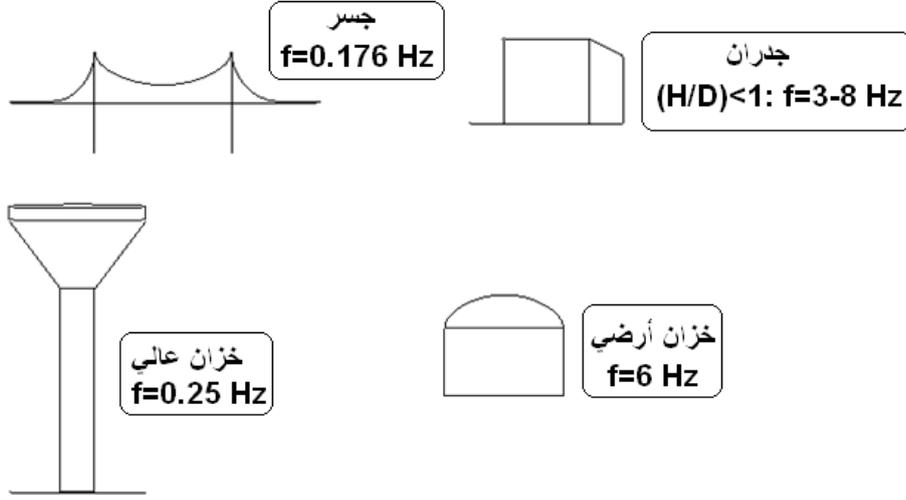
الشكل (17-2): أنماط تشوه المنشآت الصلبة – جدران قص (تشوه انعطافي)



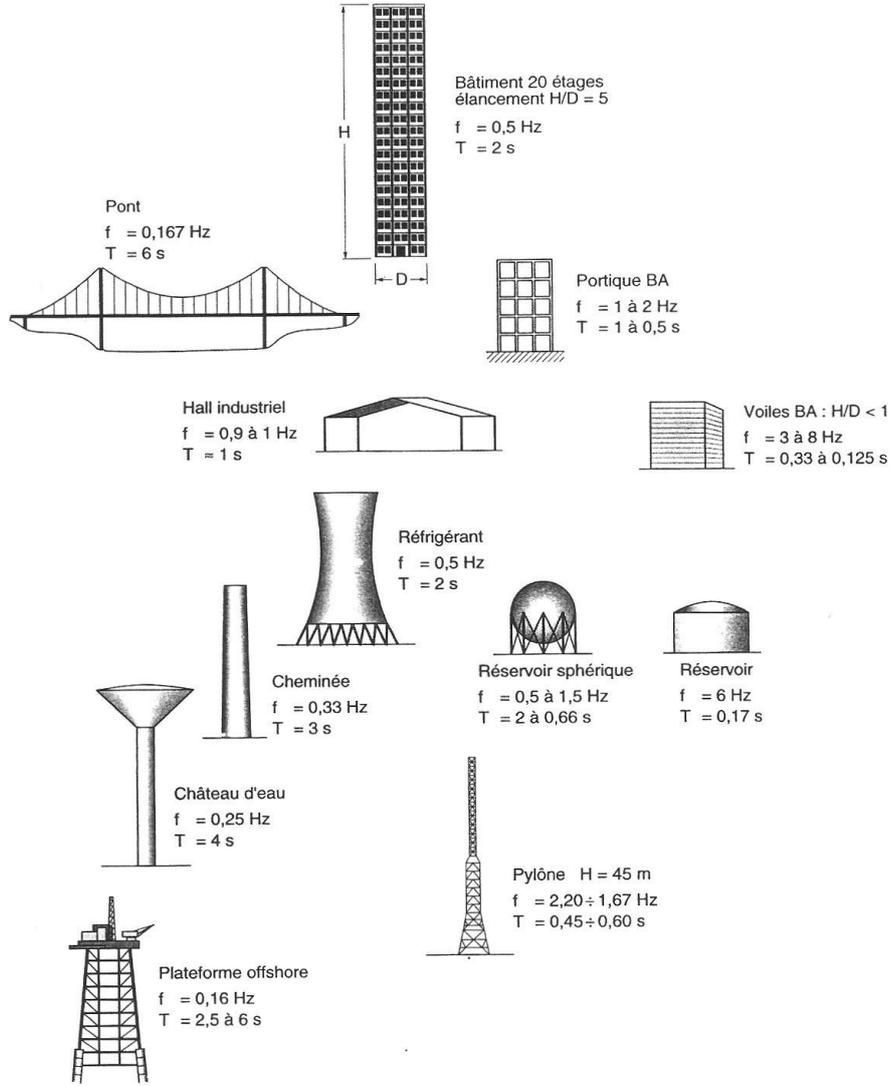
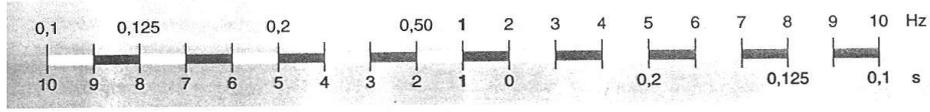
الشكل (18-2): نمط الاهتزاز الرئيس المعتمد من قبل الكودات العالمية – حالة جدران القص

يبين الشكل (19-2) قيم التواتر الطبيعي بالهرتز $\left(f = \frac{1}{T}\right)$ لبعض من منشآت الهندسة المدنية.





الشكل (19-2): قيم تواتر أنماط الاهتزاز الرئيسية بالهرتز لبعض المنشآت الهندسية



تابع للشكل (19-2): قيم أدوار وتواترات أنماط الاهتزاز الرئيسية لطيف واسع من المنشآت

2-2- حساب دور الاهتزاز الذاتي (الرئيس) لمنشأة متعدد الطوابق

توجد طرائق مختلفة لتحديد قيمة هذا الدور، نذكر منها:

- طرائق تجريبية: عادة تكون تقريبية.
- طريقة ريليه: تعتمد هذه الطريقة على مبدأ مصونية الطاقة (تحليل ديناميكي تقريبي)، ويوصي الكود السوري باستخدام الطريقتين السابقتين عند إعداد الدراسات الأولية لمشروع ما.
- طريقة المعادلة المعممة للحركة.
- طرائق الحل الدقيق: تحليل ديناميكي بعد إعداد النموذج المناسب للمنشأة مع تمثيل صحيح لعناصره وتوزيع دقيق لكتله.

1-2-2- الطرائق التجريبية:

يتم حساب قيمة دور نمط الاهتزاز الذاتي للمنشأة عن طريق جملة من العلاقات الرياضية الموجودة في الكثير من المراجع المختصة، وخاصة الكودات العالمية. هذه العلاقات تربط الدور بأبعاد المنشأة في المسقط والارتفاع، وكذلك بطبيعة هيكله الحامل وعدد طوابقه ... الخ. مع الإشارة إلى أن بعض هذه العلاقات تعطي قيمة بعيدة عن قيمته الفعلية بفارق حوالي 60% في بعض الحالات، بالتالي يجب الانتباه جيداً عند استخدامها، وضرورة مقارنتها بطرائق أخرى: ريليه أو إحدى طرائق التحليل الديناميكي الدقيق.

ونبين فيما يلي الطرائق التجريبية المعتمدة من الكود السوري وملحقاته:

- عند استعمال جدران قصية في التصميم المقاوم للزلازل:

$$T_{(sec)} = 0.08N$$

حيث N : عدد طوابق المنشأة.

- المنشأة منفذة من جمل إطارية فراغية مطاوعة:

$$T_{(sec)} = 0.1N$$

حيث N : عدد طوابق المنشأة.

- علاقة تجريبية إلزامية لتحديد قيمة الدور عند تحديد القوة الزلزالية بالطريقة الستاتيكية المكافئة:

$$T_{sec} = C_t (h_n)^{3/4}$$

حيث:

h_n ارتفاع المنشأة من القاعدة حتى أعلى منسوب فيه مقدرًا بالمتر.

$C_t = 0.0853$ للإطارات المعدنية المقاومة للعزوم.

$C_i = 0.0731$ للإطارات الخرسانية المسلحة المقاومة للزلازل وللإطارات المربطة (المكتفة) لا مركزيا.

$C_i = 0.0488$ للمباني الأخرى كافة.

ويمكن كطريقة بديلة تحديد C_i في حالة المنشآت والأبنية الحاوية على جدران قص خرسانية أو حجرية من العلاقة التالية:

$$C_i = 0.0743 / \sqrt{A_c}$$

حيث: A_c المساحة الكلية الفعالة لمقاطع جدران القص في الطابق الأول من المنشأ فوق الأساس، وتقدر بالمتر المربع وتعطى بالعلاقة التالية:

$$A_c = \sum [A_i (0.2 + (D_i / h_n)^2)]$$

حيث: A_i المساحة الدنيا للمقطع العرضي لجدار القص i في الطابق الأول (مقدرة بالمتر المربع).
 D_i طول جدار القص في الطابق الأول مقدرا بالمتر بالاتجاه الموازي للقوى الجانبية المطبقة.
ويجب أن لا تزيد قيمة (D_i / h_n) عن 0.9 .

يلزم الكود اعتماد القيمة الأصغر للدور الناجمة عن هذه العلاقة أو العلاقتين السابقتين في حالة استخدام الطريقة الستاتيكية المكافئة الأولى.

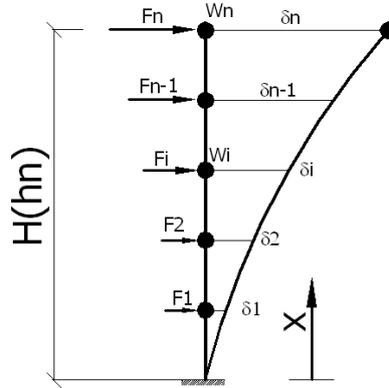
2-2-2- طريقة ريليه (Rayleigh's Method):

توصي الكودات العالمية باستخدام هذه الطريقة التي تعتمد على مبدأ مصونية الطاقة الذي ينص على تعادل الطاقة الحركية مع الطاقة الكامنة لحالة نموذج البناء القصي المعبر عنه بهزاز مركب متعدد الكتل مع درجة حرية واحدة (الشكل 20-2). ويمكننا التعبير عن الطاقة الحركية والطاقة الكامنة بالعلاقتين التاليتين:

$$(PE)_{\max} = \frac{1}{2} \sum F_i \delta_i \quad \text{الطاقة الكامنة العظمى:}$$

$$(KE)_{\max} = \frac{\omega^2}{2} \sum m_i \delta_i^2 \quad \text{الطاقة الحركية العظمى:}$$

$$(PE)_{\max} = (KE)_{\max} \Rightarrow \omega^2 = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i^2} = \frac{\Delta' F}{\Delta' M \Delta}$$



الشكل (20-2): تشوه نموذج بناء قصي

وبعد أن تم تحديد النبض يمكن حساب الدور من العلاقة:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum m_i \delta_i^2}{\sum F_i \delta_i}}$$

$$m_i = \frac{W_i}{g} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum W_i \delta_i^2}{g \sum F_i \delta_i}} \text{ (sec)}$$

حيث: W_i (kN) : وزن المنسوب المدروس (i) (الزلزالي).

m_i (kN.sec²/m) : كتلة المنسوب المدروس (i).

δ_i (m) : الانتقال الأفقي عند المنسوب (i) الناجم عن تطبيق القوى الأفقية على المنشأة.

F_i (kN) : القوة الأفقية المركزة في المنسوب (i). $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$: التسارع الأرضي.

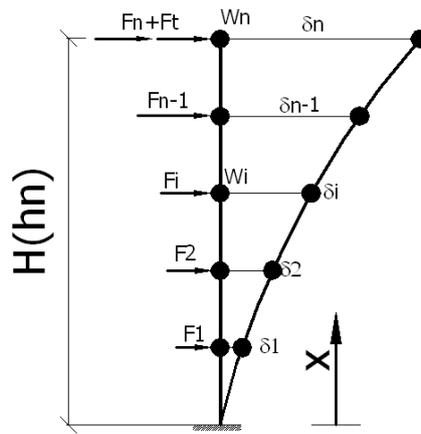
$$F = \begin{Bmatrix} F_n \\ F_{n-1} \\ \vdots \\ F_2 \\ F_1 \end{Bmatrix} = K\Delta, \quad \Delta = \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_{n-1} \\ \vdots \\ \delta_2 \\ \delta_1 \end{Bmatrix}$$

حيث:

Δ : شعاع الانتقالات. Δ^t : منقول شعاع الانتقالات. F : شعاع القوة.

K : مصفوفة الصلابة. M : مصفوفة الكتلة.

ولتحديد $F_i(kN)$ يلزم حساب قوة القص القاعدية $V = \sum F_i(kN)$ (ستاتيكي مكافئ). ونشير هنا إلى أن معظم الكودات العالمية تعتمد التوزيع الخطي لهذه القوة على كامل ارتفاع البناء (مثلث مقلوب) كما هو مذكور سابقاً، في الواقع إن هذا الأمر يفترض التغير الخطي للتسارع مع الارتفاع وكذلك التوزيع المنتظم للكتل. وعندما يزيد الدور عن حد معين ($T > 0.7 \text{ sec}$) تبين أن أنماط الاهتزاز الثانوية يكون تأثيرها أكبر، بالتالي أضاف الكود السوري قوه مركزة مطبقة (F_i) في أعلى المنشأة لتكافئ تأثير الأنماط أو الأطوار الثانوية بعد الأول (الرئيس)، كما في الشكل (21-2).



الشكل (21-2): إضافة قوه مركزة (F_i) في أعلى المنشأة للتعويض عن تأثير أنماط الاهتزاز الثانوية

وبالتالي تصبح علاقة ريليه كما يلي:

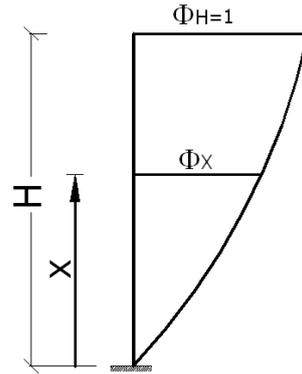
$$T = 2\pi \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i \delta_i^2 \right) \div g \left[\sum_{i=1}^{n-1} F_i \delta_i + (F_n + F_t) \delta_n \right]}$$

3-2-2- طريقة المعادلة المعممة للحركة:

في الواقع، إن هذه الطريقة تعتمد أيضاً على إمكانية تمثيل المنشأة بنموذج البناء القصي الذي يمكن توصيفه كما يلي:

- تمثيل البناء بجملة من النواض (صلابة الاطارات) و جملة من الكتل المركزة في مستوى الطوابق.
- هيكل التقوية الأفقي عبارة عن بلاطات صلبة.
- لا يرتبط تشوه البناء بالقوى المحورية المطبقة في الأعمدة.
- يملك النموذج درجة حرية واحدة (زلزال أفقي مثلاً).

- النموذج مرتبط بجملة إحداثيات معممة، بالتالي يكون نمط الانتقال الأساسي متعلق بالشروط الطرفية، بمعنى إن تابع التشوهية $\Phi_{i,x}$ يرتبط بعامل الشكل أو النحافة المعرف بالنسبة (H/D) (الشكل 22-2). حيث H : ارتفاع البناء و D : طول قاعدة البناء بالاتجاه المدرس.



الشكل (22-2): تابع التشوهية

ونبين فيما يلي العلاقات التي تعطي قيمة هذا التابع وفقاً لنحافة المبنى:

$$\delta_i = \Phi_i \delta_n$$

$$i = n \Rightarrow x = H \Rightarrow \Phi = 1$$

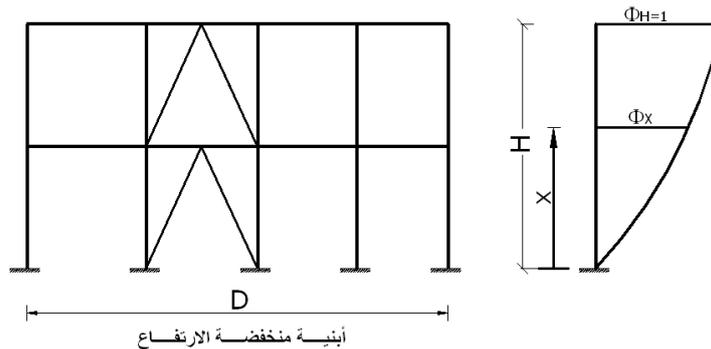
$\Phi_{i,x}$: تابع التشوهية. H : ارتفاع البناء.

وتبين الأشكال (من 23-2 إلى 25-2) أشكال هذا التابع وفقاً لنوع المنشأة المدرسة.

- أبنية منخفضة الارتفاع: $\frac{H}{D} < 1.5 \Rightarrow \Phi_x = \sin\left(\frac{\pi X}{2H}\right)$

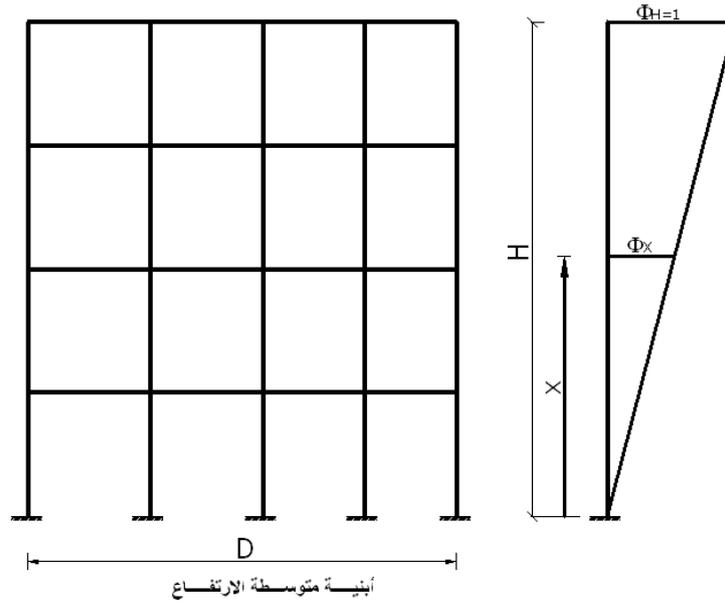
- أبنية متوسطة الارتفاع: $1.5 \leq \frac{H}{D} \leq 3 \Rightarrow \Phi_x = \frac{X}{H}$

- أبنية عالية: $\frac{H}{D} > 3 \Rightarrow \Phi_x = 1 - \cos\left(\frac{\pi X}{2H}\right)$



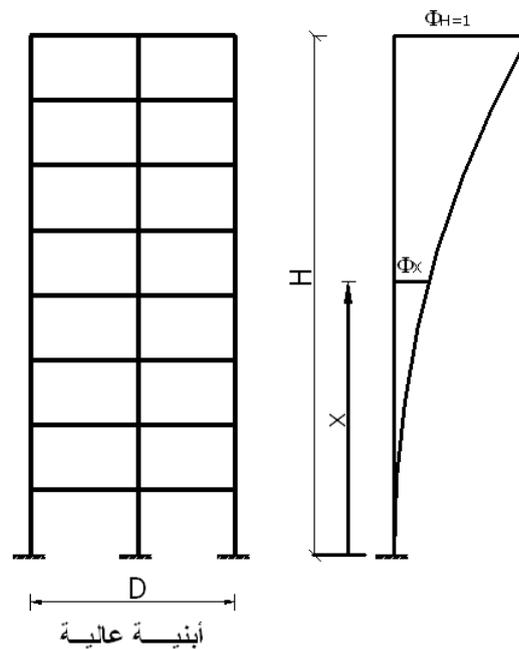
$$\frac{H}{D} < 1.5 \Rightarrow \Phi_x = \sin\left(\frac{\pi X}{2H}\right)$$

الشكل (23-2): تابع التشوهية للأبنية منخفضة الارتفاع



$$1.5 \leq \frac{H}{D} \leq 3 \Rightarrow \Phi_x = \frac{X}{H}$$

الشكل (24-2): تابع التشوهية للأبنية متوسطة الارتفاع



$$\frac{H}{D} > 3 \Rightarrow \Phi_x = 1 - \cos\left(\frac{\pi X}{2H}\right)$$

الشكل (25-2): تابع التشوهية للأبنية العالية

وتحدد قيمة الدور بعد حساب النبض كما يلي:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} (\text{sec})$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k^*}{m^*}} (\text{Rad/sec}) \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}}$$

حيث:

$$m^* = \sum m_i \Phi_i^2 \text{ الكتلة المعممة.}$$

$$k^* = \sum k_i \Delta \Phi_i^2 \text{ الصلابة المعممة.}$$

$$\Delta \Phi_i = \Phi_i - \Phi_{i-1} \text{ الانتقال النسبي بين مستويين متتاليين استناداً للتشوه المفروض } \Phi_{(X)}.$$

ملاحظة هامة: يجب ألا تتجاوز قيمة T المحسوبة بطرائق التحليل الديناميكي الدقيقة أو بطريقة ريليه أكثر من 30% من قيمتها المحسوبة بالطرائق التجريبية في المنطقة الزلزالية (4) ، والمقدار 40% في بقية المناطق الزلزالية، مع الإشارة إلى ضرورة عدم تخفيضها عند حساب الانتقالات. وسوف نبين لاحقاً الخارطة الزلزالية السورية.

4-2-2- ملاحظات حول النموذج الشائع:

نشير إلى ضرورة الانتباه عند استخدام نتائج تحليل النموذج الشائع (نموذج البناء القصي) الموثوق بشكل تام عند القاعدة، خاصة في حالة التربة الضعيفة ذات التشوهية الكبيرة، حيث يمكن أن توصلنا إلى أخطاء حسابية خطيرة. نبين فيما يلي أسباب الأخطاء الحسابية عند اعتماد النموذج الشائع:

- تقدير خاطئ (نقص) لقيمة دور الاهتزاز الأساسي، بالتالي تكون قيمة التسارع المأخوذة من طيف الاستجابة مغلوبة.
- نقص في تقدير قيمة تخامد النموذج المعتمد، حيث إن تخامد التربة أكبر من تخامد المواد المكونة للبناء، بالتالي تقدير خاطئ للاستجابة.
- إن تابع التشوهية محدد بطريقة تقريبية، وهذا يقود إلى خطأ في توزيع التسارعات على كامل ارتفاع البناء.
- اعتبار الحركة متطابقة عند السطح الحر أو القاعدة: هذا المقاربة تبدو مقبولة في حالة الأساسات غير العميقة.

أخيراً، نؤكد على ضرورة إعداد نماذج تكون فيها التربة ممثلة بشكل واضح : بنوابض أو بعناصر منتهية.

5-2-2- تحديد صلابة النابض الجانبية

ترتبط هذه الخاصية بالشروط الطرفية للعنصر المدروس (اتصال العمود بالبلاطة مثلاً...)، وعطالة مقطع العنصر، وطوله، وعامل مرونة المادة المكونة له. ونبين فيما يلي العلاقات التي يمكن استخدامها لحساب الصلابة الجانبية لعنصر ما (الشكل 26-2):

$$أ- عمود موثوق من الطرفين: k = \frac{V}{\Delta} = \frac{12EI}{L^3}$$

$$ب- عمود متمفصل من طرف وموثوق من الطرف الأخر: k = \frac{V}{\Delta} = \frac{3EI}{L^3}$$

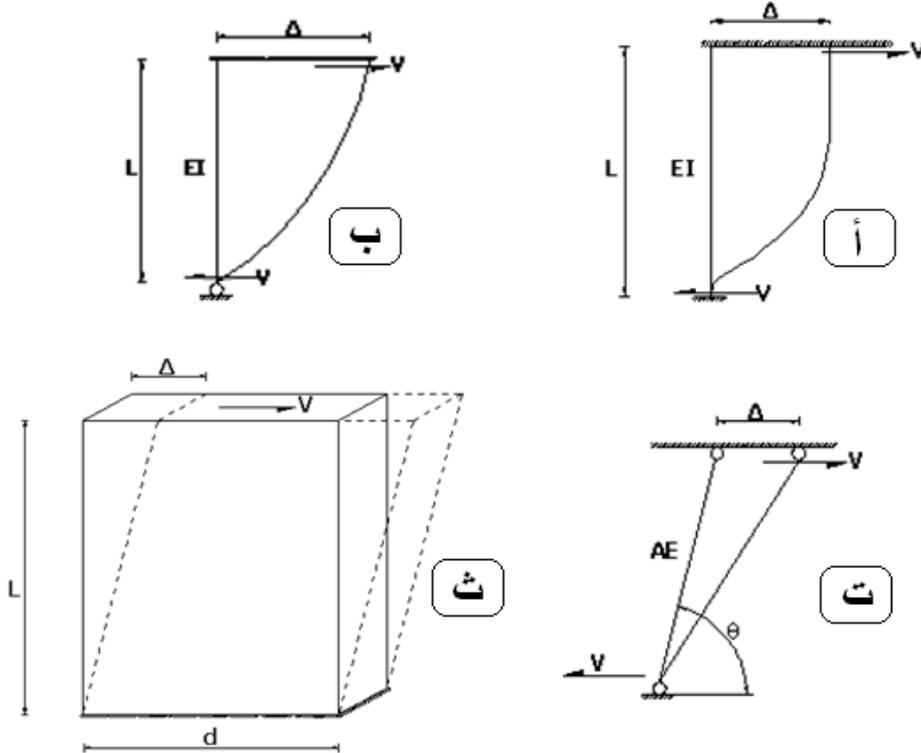
$$ت- عنصر تربيط قطري: k = \frac{V}{\Delta} = \frac{AE}{L} \cos^2 \theta$$

$$ث- جدار ظفري: k = \frac{V}{\Delta} = \frac{3EI}{L^3 \left[1 + 0.6(1 + \nu) \left(\frac{d}{L} \right)^2 \right]}$$

حيث: E : عامل مرونة المادة. I : عزم عطالة المقطع بالاتجاه المدروس.

L : طول العنصر (عادة هو ارتفاع الطابق). A : المقطع العرضي لقضيب التثبيت. d : بعد مقطع الجدار

بالاتجاه المدروس. ν : عامل بواسون.



أ- عمود موثوق من الطرفين، ب- عمود متمفصل من طرف وموثوق من الطرف الآخر

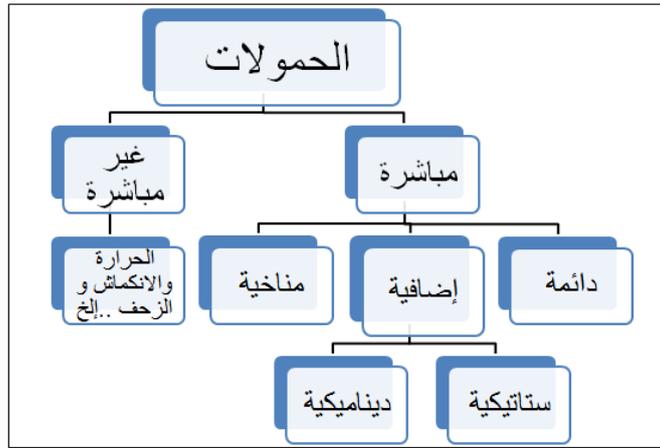
ت- عنصر تربيط قطري، ث- جدار ظفري

الشكل (2-26): نماذج بعض العناصر بهدف تحديد ثابت الصلابة الجانبية

3-2- الحملات الديناميكية

1-3-2- تصنيف الحملات الديناميكية

يوضح المخطط التالي تصنيفاً عاماً للحملات المطبقة على المنشآت الهندسية.



تعرف الحملات الديناميكية بأنها الحملات التابعة للزمن، وهذا يؤدي إلى نشوء اهتزازات في المنشأة بحيث تتشكل قوى عطالة غير موجودة في حالة التحميل الستاتيكي (الأشكال من 2-40 إلى 2-47).

من الناحية التحليلية، يمكن تقسيم الحملات الديناميكية إلى مجموعتين رئيسيتين:

- حملات دورية: وهي حملات متكررة تحافظ على شكلها مع الزمن وذلك لعدد كبير من الدورات، وهي شائعة في الحياة العملية على شكل قوى توافقية تمثل بتوابع جيبيية من مصادر تحريض مختلفة مثل المحركات في مصنع أو في منشأة ما أو بجوارهما، أو مروحة طائرة أو عنفة الباخرة...

- حملات غير دورية: تتمثل بالصدمة الذي يتميز ببعده متحول مع الزمن (تسارع، سرعة، انتقال، أو قوة...)، وهذا النوع من الحملات يتغير بشكل غير توافقي مع زمن صغير نسبياً، بحيث يكون هذا التغير بسيطاً أو معقداً وذلك تبعاً للظاهرة التي تولد الصدمة (سقوط كتلة، دق الأوتاد، انفجار، زلزال...). في الواقع، إن الصدمة هو فعل مختصر ومعقد حيث يمكن أن يكون متكرراً، يولد اهتزازات وإجهادات تكون عادة كبيرة، ويرافق الصدمة نقل طاقة إلى جملة ميكانيكية ما، تابعة لنوعية وشكل المتفجرات أو إلى كتلة وسرعة القذيفة، وذلك حسب نوع الحمولة.

ويجب أن نعرف بأن تأثير الحملات الديناميكية على تربة التأسيس يختلف من حمولة لأخرى، فتلاحظ مثلاً بأن التربة تخضع لتشوّهات كبيرة عند مرور الأمواج الزلزالية وتصل قيمة التشوّهات في حالة الزلازل الكبيرة إلى

(% $10^{-1} \rightarrow 10^{-2}$) ، بينما نلاحظ في حالة أساسات الآلات أن القوى غير المتوازنة الناجمة عن اهتزاز الآلات في المنشآت تنتقل إلى التربة عن طريق الأساس/منشأة، مسببة تشوهات عادة تكون صغيرة ($\sim 10^{-3}\%$).

إن المادة الخاضعة لحمولات ديناميكية هي موطن لانتشار الأمواج المرنة أو اللدنة أو أحياناً اللزجة اللدنة، بالتالي حتى نستطيع تحديد الخواص الديناميكية لمادة ما يجب إجراء دراسة معمقة في نظرية انتشار الأمواج في الأوساط المرنة وقوانين سلوكية هذه المادة و التأثير المتبادل بينهما. ويمكن تصنيف الحمولات أيضاً وفقاً لسرعة التحميل

وذلك كما هو مبين في الجدول (1-2). $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} (N/mm^2 \cdot sec)$

سرعة التحميل $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} (N/mm^2 \cdot sec)$	نوع الحمولة
$\dot{\sigma} < 10^{-3}$	ستاتيكية طويلة الأمد
$10^{-2} < \dot{\sigma} < 1$	ستاتيكية قصيرة الأمد
$\dot{\sigma} > 10$	ديناميكية

الجدول (1-2): تصنيف الحمولات وفقاً لسرعة التحميل

ويعرض الجدول (2-2) تصنيفاً آخراً للحمولات كما هو وارد في المراجع العلمية، بحيث يستند على مفهوم سرعة

تشوهات المادة $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} (S^{-1})$.

سرعة التشوهات $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} (S^{-1})$	نوع الحمولة
$\leq 10^{-7}$	ستاتيكية طويلة الأمد
$10^{-5} \rightarrow 10^{-1}$	شبه ستاتيكية
$10^0 \rightarrow 10^{+1}$	متوسطة
$10^{+2} \rightarrow 10^{+4}$	ديناميكية عالية السرعة
10^{+5}	ديناميكية فائقة السرعة

الجدول (2-2): تصنيف الحمولات وفقاً لسرعة التشوهات

إن العلاقة بين سرعة التشوهات $\dot{\epsilon}$ وسرعة التحميل $\dot{\sigma}$ كتابع لنوع الحمولة ليست معروفة بشكل جيد، ويمكن الاعتماد على الجدول (3-2)، حيث نلاحظ مدى صعوبة الاختيار لبعض أنواع الحمولات الديناميكية.

سرعة التشوهات $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} (S^{-1})$	سرعة التحميل $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} (N/mm^2 \cdot sec)$	نوع الحمولة
10^{-5}	$0.1 \rightarrow 1$	اصطدام بواخر
10^{-4}	$1 \rightarrow 10$	اصطدام سيارات
10^{-4}	$1 \rightarrow 10$	انفجار غاز
$0.03 \rightarrow 1$	$10^2 \rightarrow 3 \times 10^4$	دق الأوتاد
$0.01 \rightarrow 3$	$5 \times 10^2 \rightarrow 10^5$	زلازل

الجدول (3-2): العلاقة بين سرعة التشوهات $\dot{\epsilon}$ وسرعة التحميل $\dot{\sigma}$ كتابع لنوع الحمولة

اقترحت الهيئة الأوروبية العالمية للبيتون (CEB) الجدول (4-2)، الذي يعطينا فكرة مقبولة عن علاقة سرعة التشوهات بنوع الحمولة الديناميكية المطبقة على المنشآت الهندسية من البيتون المسلح.

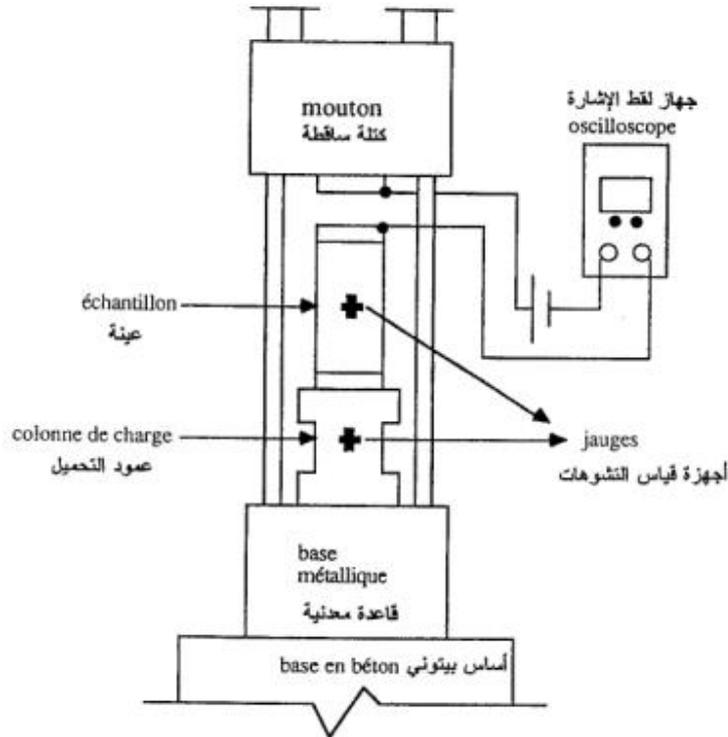
سرعة التشوهات $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} (S^{-1})$	نوع الحمولات
$10^{-6} \rightarrow 10^{-4}$	نقل
$5 \times 10^{-5} \rightarrow 5 \times 10^{-4}$	انفجار غاز
$5 \times 10^{-3} \rightarrow 5 \times 10^{-1}$	زلازل
$10^{-2} \rightarrow 10^0$	دق أوتاد
$5 \times 10^{-2} \rightarrow 2 \times 10^0$	صدم طيارة (صدمة لينة)
$10^0 \rightarrow 5 \times 10^1$	صدم عالي السرعة
$10^2 \rightarrow 10^6$	صدم فائق السرعة

الجدول (4-2): العلاقة بين نوع الحمولات وسرعة التشوهات وفقاً لـ CEB

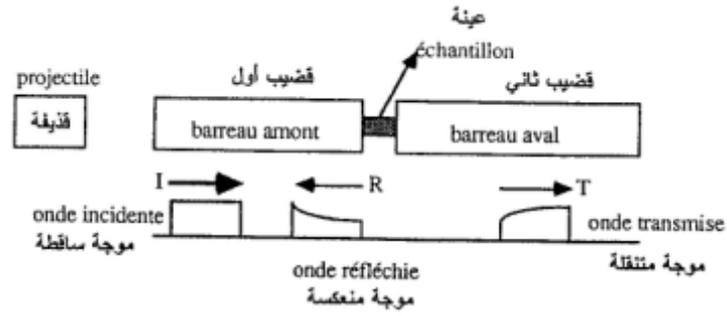
ومن الناحية التجريبية، يمكن الحصول على سرعات تشوه أو تحميل مختلفة باستخدام وسائل وأجهزة اختبار، وذلك كما هو موضح في الجدول (5-2) والأشكال (من 27-2 إلى 32-2).

سرعة التشوهات $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} (S^{-1})$	جهاز الاختبار
$< 10^{-4}$	مكابس هيدروليكية: سيلان (جريان)
$10^{-4} \rightarrow 3$	آلات هيدروليكية - مدافع تعمل على الهواء المضغوط
$3 \rightarrow 10^2$	آلات هيدروليكية غازية - السقوط الحر للكتلة - جهاز شاربي أو غرين أو إزود
$10^2 \rightarrow 10^6$	جهاز هوبكنسون - مدافع تعمل على الغاز صفحة ضد صفيحة - تمدد حلقة عن طريق التفجير

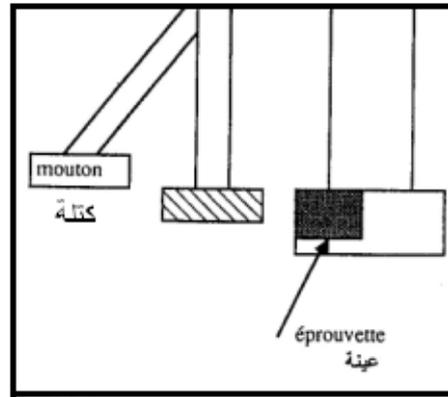
الجدول (5-2): أجهزة الاختبار المطلوبة لتأمين سرعات تشوه مختلفة



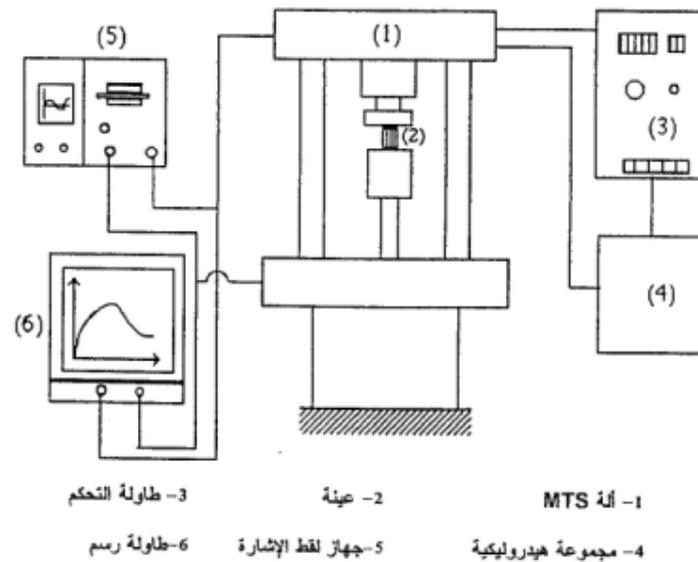
الشكل (27-2): جهاز إسقاط الكتلة (سقوط حر)



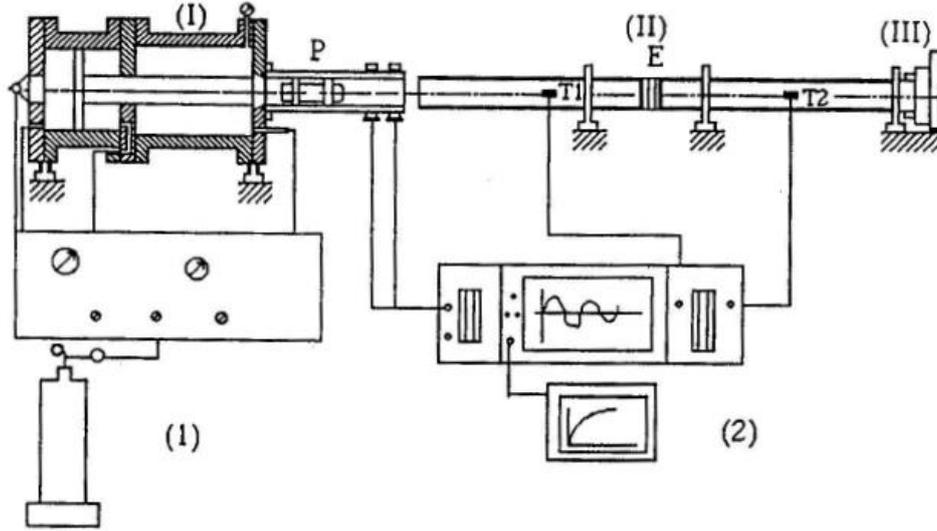
الشكل (28-2): جهاز أو مدفع هوبكنسون



الشكل (29-2): نواس غرين

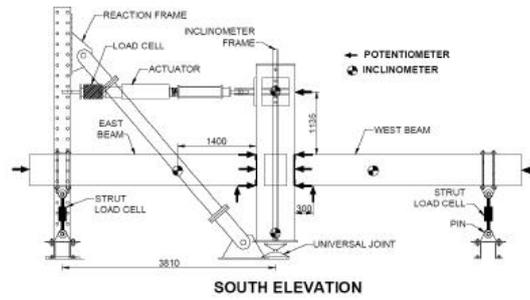


الشكل (30-2): جهاز اختبار هيدروليكي - غازي



1 - قاذف غازي 2 - مجموعة الأجهزة الإلكترونية والمعلوماتية
 1 - طاولة التحكم وجرة الأوت 3 - مخمد الصدم
 II - قضبان هوكسون E - عينة P - قذيفة
 T₁ , T₂ : محطات فيلس التشوه

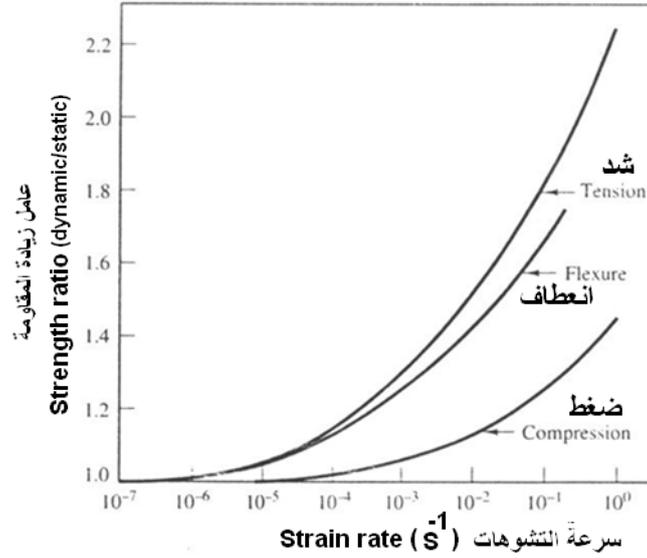
الشكل (31-2): نظام اختبار الضغط الديناميكي



اختبار عقدة وسطية في إطار

الشكل (32-2): اختبار عقدة وسطية في إطار بيتوني (محاكاة فعل زلزالي)

أثبتت الدراسات التجريبية أن السلوك الميكانيكي للمواد الإنشائية الخاضعة لحمولات ديناميكية يتأثر بشكل جوهري مع تغير سرعات التشوه، ويوضح الشكل (33-2) زيادة مقاومات البيتون (على الشد والانعطاف والضغط) مع زيادة سرعة التشوهات.



الشكل (2-33): تطور مقاومة البيتون مع سرعة التشوهات

أخيراً، يمكن الاعتماد على معطيات الجدول (2-6) عند دراسة منشأة بيتونية مسلحة خاضعة لحمولات ديناميكية وفق سرعات تشوه منخفضة ومتوسطة، وذلك في تحديد عامل الزيادة الديناميكي لكل من عامل مرونة البيتون ومقاومته.

عامل التصعيد الديناميكي		سرعة التشوهات $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} (S^{-1})$	نوع الحمولة
المقاومة المميزة	عامل المرونة		
1.00	1.00	$< 10^{-4}$	ستاتيكية: سيلان - مينة - إضافية
1.20	1.45	$\sim 10^{-2}$	انفجار غاز - زلازل
1.40	2.00	~ 1.5	انفجارات - زلازل - دق أوتاد - صدم لين
1.60	2.00 → 3.50	-	صدم قاسي

الجدول (2-6): عوامل التصعيد الديناميكي لخواص البيتون كتابع لنوع الحمولة

2-3-2- أشكال توابع الحمولات الديناميكية

سوف نعرض فيما يلي بعض الصور التي توضح التأثير الكبير لبعض من الحملات الديناميكية الأكثر شيوعاً على المنشآت (زلازل وأمواج بحرية وانفجارات...), الأشكال (من 2-34 إلى 2-39), وكذلك بانوراما سريعة لأنماط توابع الحملات التي تم تبسيطها، الأشكال (من 2-40 إلى 2-47), بالتالي نأخذ فكرة عامة عن طبيعة توابع هذه الحملات وشكلها. وعند إعداد الدراسة التحليلية لتحديد الاستجابة الفعلية للمنشآت، يجب الاعتماد على توابع حمولة حقيقية تمثل جيداً واقع الحمولة الديناميكية المؤثرة وتطورها مع الزمن.



الشكل (2-34): تعرض المنشآت البحرية للأمواج خطيرة (أعاصير فلوريدا الجنوبية)



الشكل (2-35): قوى الأمواج تمثل حملات ديناميكية كبيرة على منصة بحرية (استخراج النفط)



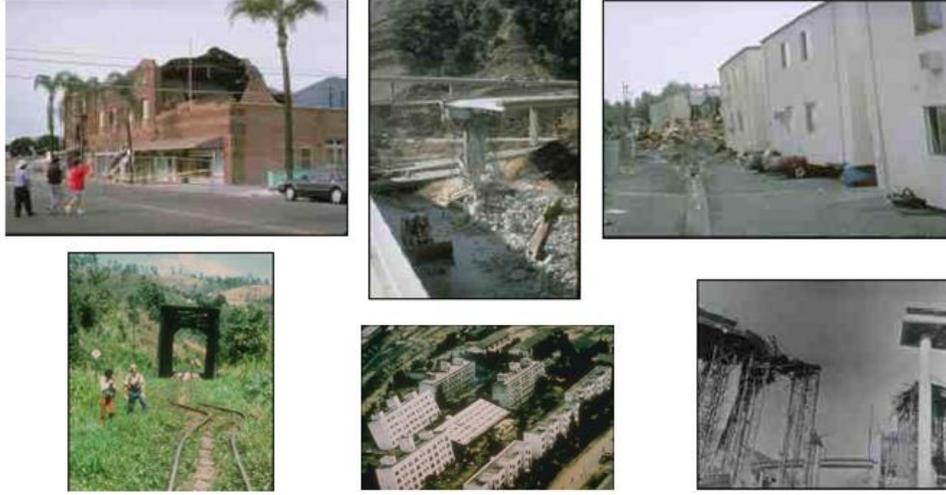
الشكل (2-36): تأثير المركبة الأفقية الكبيرة للزلزال وانهيار جسر الطريق السريع

January 17, 1995 in Kobe, Japan



الشكل (2-37): تأثير المركبة الشاقولية للزلزال وانهيار ركيزة جسر الطريق السريع

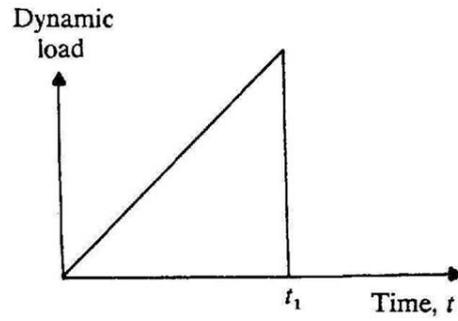
January 17, 1995 in Kobe, Japan



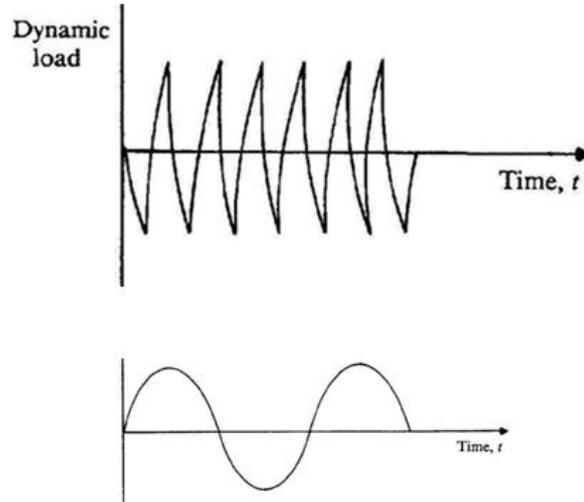
الشكل (2-38): الأضرار الناجمة عن الزلازل (عامة)



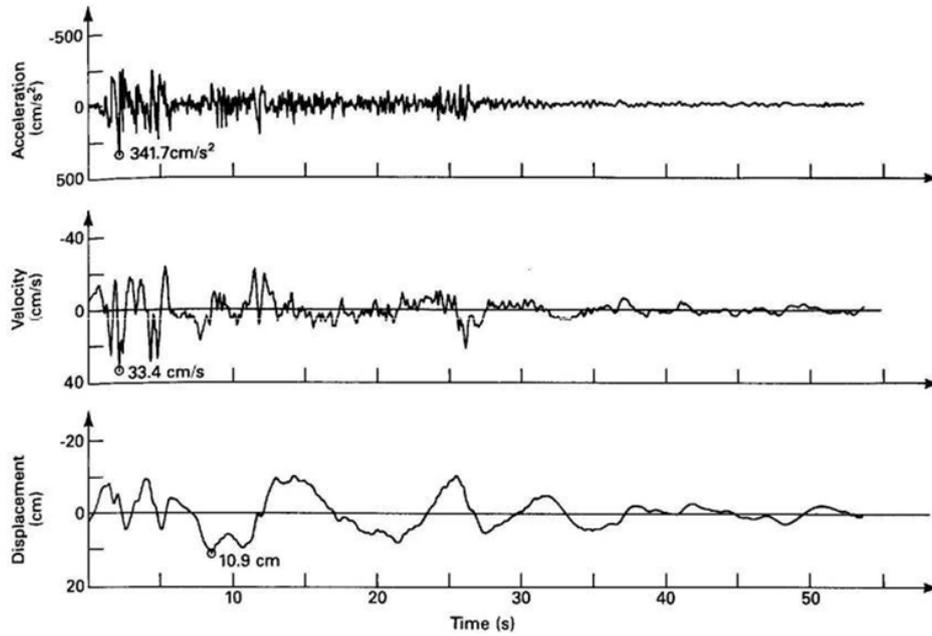
الشكل (2-39): الضرر والدمار الناتج عن الانفجارات التقليدية (حمولات ديناميكية)



الشكل (2-40): مخطط مبسط لصدمة وحيدة من مطرقة على صفيحة (فولاذ)

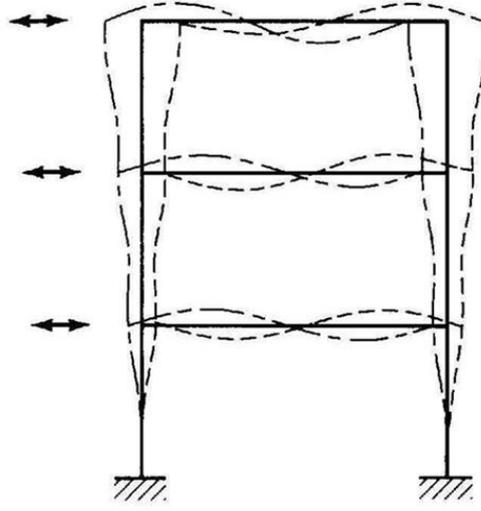


الشكل (2-41): شدة الحمولة مع الزمن لألة منخفضة السرعة فوق أساس
(يمكن تبسيط تابع الحمولة ليصبح جيبياً)

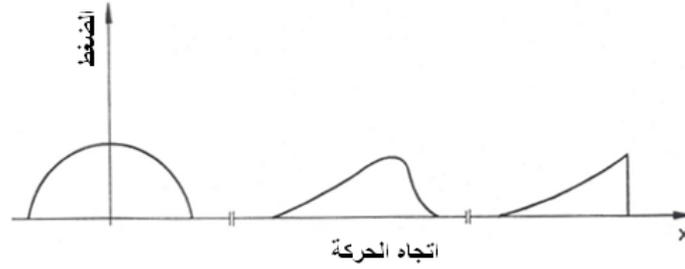


الشكل (2-42): السجل الزمني لزلزال السنترو (تسارع - سرعة - انتقال مع الزمن)

El Centro, California earthquake - 18 May, 1940, N-S axis



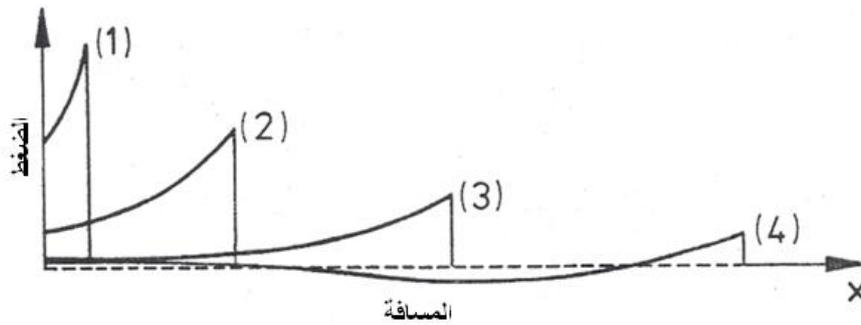
الشكل (43-2): حصول حركات اهتزازية متشابهة لمبنى إطاري خاضع لرياح معتدلة (تراكب الهبات)



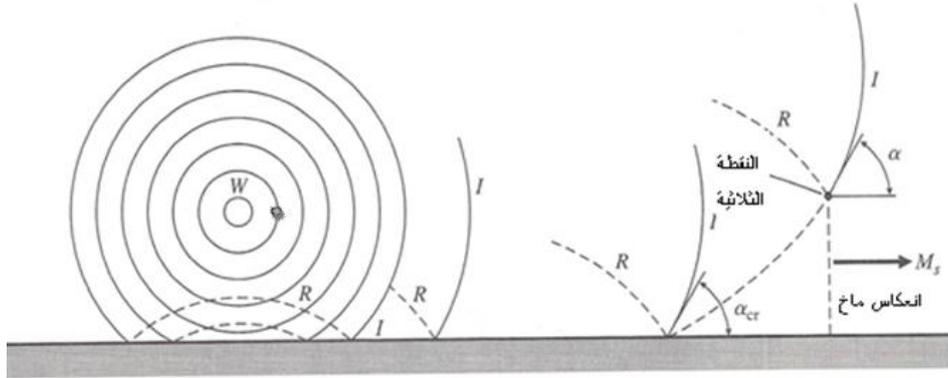
الشكل (44-2): تقدم موجة انفجار (ضعف الموجة وانخفاض في سرعتها)

انفجار تقليدي مثل TNT or NFO

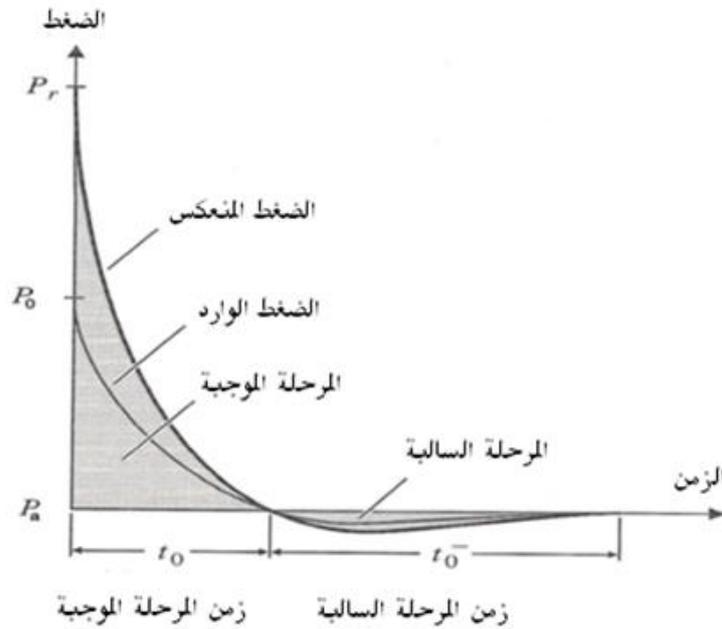
Conventional explosive such as TNT or NFO (ammonium nitrate/fuel oil)



الشكل (45-2): تغير الضغط وانخفاضه مع المسافة (انفجار تقليدي)



الشكل (2-46): انعكاس موجة الانفجار فوق سطح الأرض



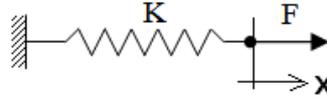
الشكل (2-47): مخطط توضيحي للضغوط الواردة والمنعكسة لموجة الانفجار التقليدي

(اصطدامها بحاجز)

4-2- النماذج الأساسية في تحديد السلوكية

سنعمل على ذكر أهم النماذج الأساسية التي تشكل حجر الأساس للنماذج الرئيسية المهمة (المركبة)، والتي تعمل على شرح سلوكية المواد بدقة مقبولة. إن تجميع هذه النماذج الأساسية يعمل على فهم النماذج المعقدة التي نراها في المراجع العلمية سواءً أكانت تحليلية أم تجريبية.

1-4-2- النابض (الشكل (48-2)):



الشكل (48-2): نابض

إذا طبقنا قوة F على نابض صلابته k فإنه يتولد انتقال مقداره x . يمكن كتابة معادلة النابض على الشكل التالي: $F = kx$. يكون النموذج خطياً عندما تكون صلابة النابض ثابتة، ويمكن أن نحدد قيمة صلابة النابض بالنسبة لعنصر من البيتون المسلح، طوله l ومقطعه العرضي S ، خاضع لقوة محورية (عمود مثلاً)، مع عامل مرونة طولاني E :

$$F = kx = \sigma S ; \sigma = E \varepsilon ; \varepsilon = \frac{x}{l}$$

$$E \frac{x}{l} S = kx \Rightarrow k = \frac{ES}{l}$$

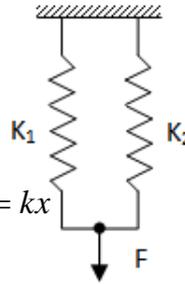
بالتالي تزداد صلابة العمود مع زيادة عامل مرونة المادة، ومقطعه العرضي ونقصان طوله. وعندما يكون النموذج مكوناً من نابضين بالتوازي (الشكل (49-2))، يكون لدينا:

$$x = x_1 = x_2$$

$$F = F_1 + F_2$$

$$F = k_1x + k_2x = kx$$

$$\Rightarrow k = k_1 + k_2$$



الشكل (49-2): نموذج بنابضين بالتوازي

وعندما يكون النموذج مكوناً من نابضين بالتسلسل (الشكل (50-2))،

$$F = kx = F_1 = k_1x_1 = F_2 = k_2x_2$$

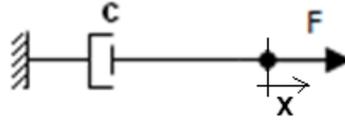
$$x = x_1 + x_2$$

نحصل على:

$$\frac{F}{k} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} \Rightarrow \frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

الشكل (50-2): نموذج بنابضين بالتوازي

2-4-2- المتمد (الشكل (51-2)):



الشكل (51-2): المتمد النج

إذا طبقت القوة F على متمد بتخامد c ، يحصل انتقال بمقدار x . تكتب معادلة هذا المتمد كما يلي:

$$F = c \dot{x}$$

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$$

3-4-2- عنصر احتكاك (مزلقان) (الشكل (52-2)):



الشكل (52-2): نموذج المزلقان (عنصر احتكاك)

حتى تتم حركة المزلقان، يجب أن تطبق قوة تكون أكبر من عتبة الاحتكاك لهذا العنصر (الشكل (53-2))، والتي تسمى بعتبة الانزلاق F_0 ، بالتالي:

$$F < F_0 \text{ الانتقالات معدومة.}$$

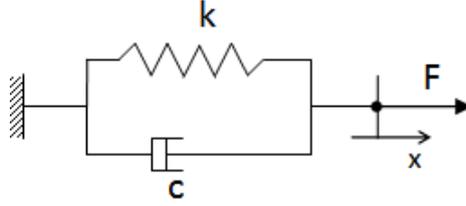
$$F \geq F_0 \text{ يبدأ الانزلاق.}$$



الشكل (53-2)

4-4-2- تجميع النماذج الأساسية:

1- نموذج كلفن – فوا (Kelvin - Voigt):



الشكل (2-54): نموذج كلفن - فوا

تتوزع القوة F في الفرعين، ويمكن كتابة معادلة هذا النموذج كما يلي:

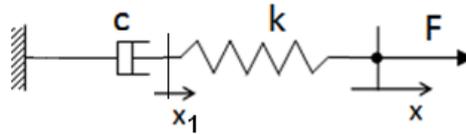
$$F = kx + c\dot{x}$$

إن مثل هذا النموذج يوافق جسماً صلباً مرناً – لزج.

يكتب الحل العام للمعادلة السابقة كما يلي:

$$x_{(t)} = x_0 e^{-\frac{k}{c}(t-t_0)} + \frac{1}{c} \int_{t_0}^t e^{-\frac{k}{c}(t-\tau)} \cdot F_{(\tau)} d\tau$$

2- نموذج ماكسويل (Maxwell):



الشكل (2-55): نموذج ماكسويل

يمكن كتابة معادلة القوة بأحد التعبيرين التاليين:

$$F = k(x - x_1) \dots \dots \dots (1)$$

$$F = c\dot{x}_1 \dots \dots \dots (2)$$

باشتقاق المعادلة الأولى نلاحظ:

$$\frac{dF}{dt} = k \left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) \Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{dx_1}{dt} + \frac{1}{k} \cdot \frac{dF}{dt} = \frac{F}{c} + \frac{1}{k} \cdot \frac{dF}{dt}$$

$$\Rightarrow x_{(t)} = \frac{F}{c}t + \frac{1}{k}F + A$$

ولكن المعادلة الثانية تعطي قيمة القوة بدلالة $\dot{\epsilon}$ والتخامد:

$$F = c \frac{dx_1}{dt} \Rightarrow F = c \left(\frac{dx}{dt} - \frac{1}{k} \cdot \frac{dF}{dt} \right)$$

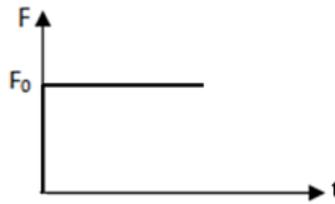
$$\Rightarrow \frac{dF}{dt} = k \frac{dx}{dt} - \frac{k}{c} F$$

الحل العام للمعادلة السابقة:

$$F_{(t)} = F_0 e^{-\frac{k}{c}(t-t_0)} + k \int_{t_0}^t e^{-\frac{k}{c}(t-\tau)} \cdot \frac{dx_{(\tau)}}{d\tau} d\tau$$

5-4-2- تابع التباطؤ (التأخير):

يقصد بتابع التباطؤ استجابة النموذج عندما يخضع لقسط من الحمولة (الشكل 2-56).



الشكل (2-56): تابع التحميل الديناميكي (قسط الحمولة)

1- نموذج كلفن - فوا (Kelvin - Voigt):

في وضع الراحة لدينا: $(t_0 = 0, x_0 = 0)$ ، وبعد التحميل نجد بأن الحل العام لمعادلة هذا النموذج يقتصر على:

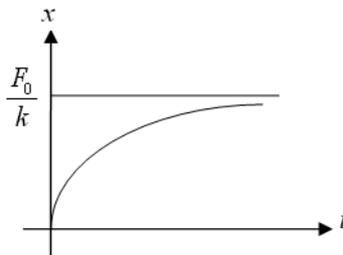
$$x_{(t)} = F_0 \frac{1}{c} \int_0^t e^{-\frac{k}{c}(t-\tau)} \cdot d\tau$$

حيث $F_{(\tau)} = F_0 = cte$ ، تكون الاستجابة بعد التكامل (الشكل 2-57):

$$x_{(t)} = \frac{F_0}{k} (1 - e^{-\frac{k}{c}t})$$

$$t = 0 \Rightarrow x_{(t)} = 0$$

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow x_{(t)} = \frac{F_0}{k}$$



الشكل (2-57): استجابة نموذج كلفن-فوا عند تطبيق حمل ديناميكي

2- نموذج ماكسويل (Maxwell):

في وضع الراحة يكون لدينا: $A=0 \Rightarrow (t_0=0, x_0=0)$ ، إذن تكون الانتقالات مساوية لـ:

$$x_{(t)} = F \left(\frac{1}{k} + \frac{t}{c} \right)$$

وبعد التحميل نرسم الاستجابة (الشكل 2-58):

$$t=0 \Rightarrow x = \frac{F_0}{k}$$

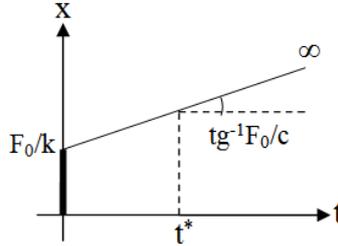
$$t \rightarrow \infty \Rightarrow x \rightarrow \infty$$

$$t=t^* \Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{F_0}{c}$$

نلاحظ بأن هناك:

- انتقال لحظي للناقص

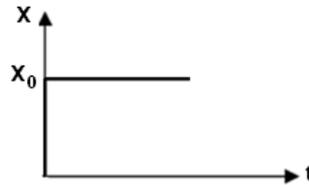
- تغير الانتقال مع الزمن بشكل خطي، ناجم عن المخمد اللزج.



الشكل (2-58): استجابة نموذج ماكسويل عند تطبيق حمل ديناميكي

2-4-6- تابع الاسترخاء:

يقصد بتابع الاسترخاء استجابة النموذج عندما يخضع لقسط من الانتقالات (الشكل 2-59).



الشكل (2-59): تابع التحميل الديناميكي (قسط من الانتقالات المفروضة)

1- نموذج كلفن – فوا (Kelvin - Voigt):

من أجل انتقال لحظي فإنه يتوجب جهد لا متناه، بالتالي ليس بالإمكان تحديد الاستجابة.

2- نموذج ماكسويل (Maxwell):

النايى سىتطاول بالتالى لدينا انتقالاً لحظياً، والذى يبقى من الحل العام لمعادلة نموذج ماكسويل هو:

$$F_{(t)} = F_0 e^{-\frac{k}{c}t}$$

باعتبار أن:

$$t = 0 \quad , \quad x = 0$$

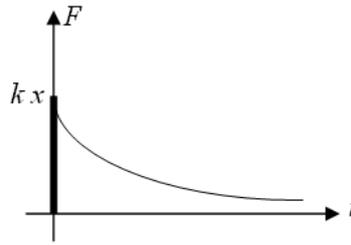
$$x_{(t)} = cte \Rightarrow \frac{dx_{(t)}}{dt} = 0$$

$$F_{(t)} = F_0 = cte$$

لكن ومن أجل النايى لدينا: $F = kx$ ، بالتالى يمكن رسم الاستجابة النهائية لمثل هذا التابع (الشكل 2-60):

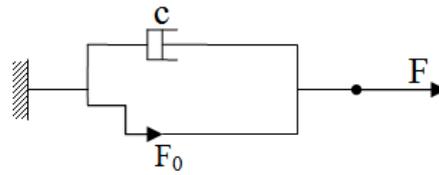
$$t = 0 \Rightarrow F = kx$$

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow F \rightarrow 0$$



الشكل (2-60): استجابة نموذج ماكسويل عند تطبيق قسط من الانتقالات

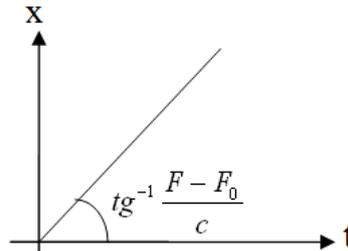
7-4-2- نموذج لىج - لىج:



الشكل (2-61): نموذج لىج - لىج

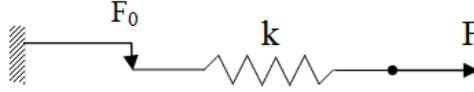
إذا كان $F < F_0$ ، فإن $x = 0$ مهما كان الزمن t حيث لا يتحرك المزلقان.

وعندما يكون $F \geq F_0$ ، يتحرك المزلقان وكل شيء مأخوذ من قبل المخمد. ونرسم الاستجابة (الشكل 2-62):



الشكل (62-2): استجابة النموذج لزوج - لدن عند تطبيق حمل ديناميكي

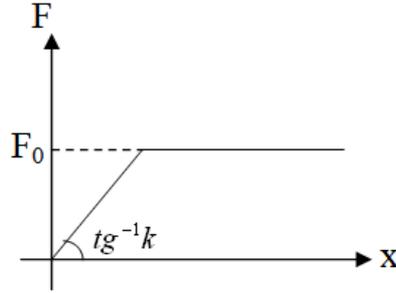
8-4-2- نموذج مرن - لدن (Prandle):



الشكل (63-2): نموذج براندل (مرن - لدن)

إذا كان $F < F_0$ ، فإن النابض وحده يتطاول (الشكل 64-2).

إذا كان $F \geq F_0$ فهناك تحرك للمزلقان وتشكل عتبة (64-2).



الشكل (64-2): سلوك نموذج براندل تحت تأثير حمولة ديناميكية

5-2- الزلازل والهندسة الزلزالية

1-5-2- أولاً- مفاهيم أساسية:

الهندسة الزلزالية هي فرع من فروع الهندسة الإنشائية، وهي الفن والعلم في نمذجة المواد والمنشآت، "التي لا نفهمها تماماً"، إلى أشكال لا نستطيع تحليلها بدقة لتقاوم حمولات وأفعال لا يمكن توقعها بشكل تام، وكل هذا في وسط غالبية الساحقة لا تدرك محدودية المعرفة التي نحيط بها.

إن الهدف الرئيس لأية دراسة زلزالية هو حماية الأرواح وتخفيف الأضرار المادية، وهذا الهدف يتطلب تحديد الأخطار الزلزالية المحتملة مع تطوير الخرائط الزلزالية المناسبة، من أجل تقدير الأفعال الزلزالية وحساب المنشآت لمقاومتها. ليس التصميم الإنشائي القاصر هو المشكلة الوحيدة التي قد تتسبب بانحيار المنشأة، وإنما يجب الانتباه أيضاً إلى نوعية التنفيذ، ومدى الالتزام بتطبيق التصميم على أرض الواقع، فغالباً ما تكون الانهيارات ناتجة إما عن أخطاء تصميمية و/أو تنفيذية.

ويمكننا ذكر أهم الأخطاء التصميمية على النحو التالي:

- عدم الالتزام بمتطلبات الكودات الهندسية،
- سوء تقدير الحمولات،
- خلل في اعتبارات الجمل المقاومة،
- أخطاء في الحسابات... الخ.

أما الأخطاء التنفيذية فتظهر في عدم الالتزام بالاشتراطات التصميمية أو سوء اختيار المواد أو تكنولوجيا التنفيذ القاصرة... الخ.

تنجم الزلازل عن اهتزاز القشرة الأرضية، وتقود في بعض الأحيان إلى كوارث مدمرة من تهديم للمنازل وقتل للناس الأبرياء بالإضافة إلى الآثار النفسية والاقتصادية والسياسية التي تسببها هذه الظاهرة. في الحقيقة، إن الزلزال بحد ذاته هو ظاهرة طبيعية لا يمكن تجنبها، وبالمقابل إن تدمير وخراب المنشآت ليس كذلك، بمعنى إن الزلزال لا يعتبر مشكلة، حيث تظهر المشكلة في المنشآت غير المقاومة لقوى زلزالية، والتي تتحول إلى سلاح مدمر يجلب الخراب والهلاك كما هو مبين أدناه.



ومن أجل أن تكون المنشأة قادرة على الصمود بوجه القوى الزلزالية يجب أن تكون قادرة على امتصاص أو تبديد الطاقة الإضافية المنتشرة في المنشأة أثناء الزلزال. إن فهم مسألة التوازن بين طاقة الدخل المفروضة على المنشأة نتيجة الزلزال وطاقة استجابة هذا المنشأة، كان المدخل الرئيس لتصميم المنشآت المقاومة للزلازل والتي اتخذت ثلاثة اتجاهات رئيسية:

- تصميم المنشآت بحيث تكون عناصرها الإنشائية قادرة على تبديد كمية معتبرة للطاقة المنتشرة في المنشأة من خلال السماح لها بالتشوهات اللامرنة، مع أقل درجة ممكنة من الضرر .
 - العزل الزلزالي للمنشآت، وبالتالي القدرة على التحكم في كمية الطاقة المنقولة إلى المنشأة.
 - استخدام مخمدات خاصة للطاقة من أجل التقليل من الضرر الحاصل في المنشأة.
- الاتجاه الأول في التصميم هو الاتجاه الأكثر شيوعاً ولا يحتاج إلى تكنولوجيا متطورة إضافية في عمليات التشييد بل باستخدام نفس تقنيات التشييد التقليدية في أغلب الأحيان، وبإلحاق بحسابات إضافية بسيطة لكميات وترتيب التسليح في العناصر الإنشائية اعتماداً على كودات زلزالية متخصصة بحيث نحصل على عناصر إنشائية مقاومة للزلازل.
- وبالرغم من التوصل إلى العديد من الطرائق الحديثة لمقاومة أفعال الزلازل يبقى الهيكل البيتوني المؤلف من إطارات وجدران قصبية الوسيلة الأكثر استعمالاً في العالم لمقاومة الزلازل، ويعود هذا إلى سهولة تنفيذ الهيكل البيتوني من ناحية وإلى انخفاض كلفته من ناحية أخرى.

2-5-2- الزلازل:

ينشأ الزلزال عندما يحصل انكسار وانفلاق مفاجئ لكتل وأحجام هائلة في الطبقات الصخرية الأرضية نتيجة عدم قدرتها لتحمل القوى التكتونية المسلطة عليها داخل الغلاف الصخري حيث تتحرر إثر ذلك طاقة حركية ضخمة جداً تنطلق معظمها على شكل اهتزازات تنتقل بسرعات مختلفة في باطن الأرض وعلى سطحها مسببة بذلك الكوارث والدمار للبيئة والإنسان، ونسبي الهزة الأساسية الموافقة للزلزال بالصدمة الرئيسية. وفي بعض الأحيان يسبق الصدمة الرئيسية مجموعة من الاهتزازات الصغيرة تعرف باسم الصدمات السابقة، وفي جميع الأحوال يتبع الصدمة الرئيسية مجموعة كبيرة من الاهتزازات الصغيرة والمتوسطة الحجم والتي تسمى بالصددمات اللاحقة (الارتدادية).

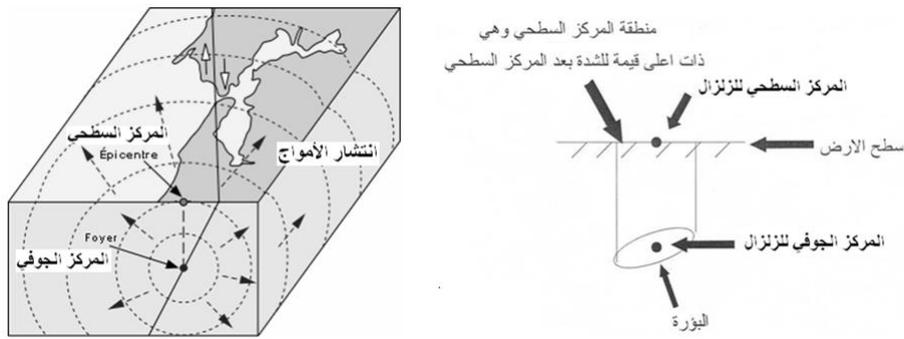
وبشكل عام يمكن أن تنشأ الزلازل عن عدة أسباب نلخصها كما يلي:

أولاً - الزلازل ذات المنشأ الطبيعي:

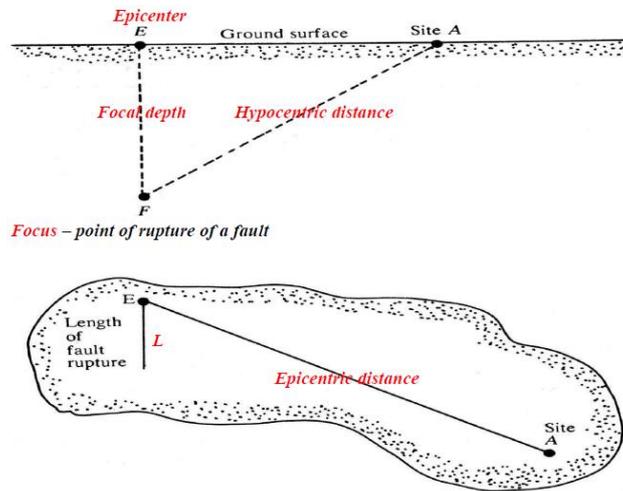
- الزلازل التكتونية:

تنشأ الزلازل التكتونية نتيجة للحركة النسبية للصفائح المشكلة لقشرة الأرض حيث يبدأ تراكم الإجهادات الداخلية في الصخور الواقعة على حدود الصفائح المتحركة وتساهم التشوهات الناتجة عن الانعطاف والشد والضغط والحرارة العالية وكذلك قوى الاحتكاك عبر السطوح الفاصلة بين الصفائح إلى زيادة كبيرة في الإجهادات المتراكمة. وعندما تصبح قيم الإجهادات المتراكمة أكبر من قيم الإجهادات القصوى التي يمكن أن تتحملها الصخور تتشكل الشقوق عبر السطح الضعيف وتتركز الإجهادات العالية مباشرة حول التشققات الأمر الذي يؤدي إلى انتشار هذه التشققات والفوالق والتحرك الفجائي للصخور إلى أماكن توازن جديدة بعد أن تطلق كمية هائلة من الطاقة المتراكمة

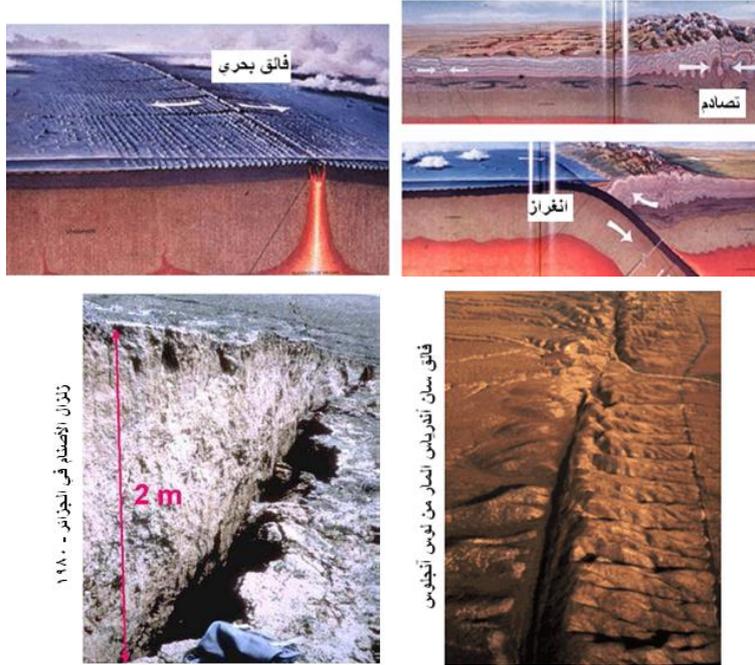
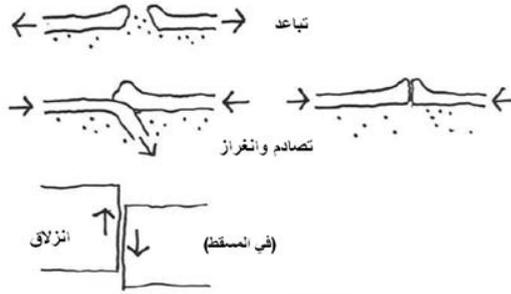
وبشكل فجائي محدثة زلزالاً في المنطقة. وعادة يبدأ تشكل التشقق الأولي في منطقة عميقة من الصخور نسميها بمركز الزلزال الجوفي (بؤرة الزلزال، Hypocenter or Focus)، وتنتشر جبهة هذه التشققات بسرعات كبيرة. ويسمى مسقط مركز الزلزال الجوفي على سطح الأرض بمركز الزلزال السطحي (Epicenter)، حيث تزداد الأضرار ونسبة الدمار في المنطقة بسبب الزلزال كلما اقترب مركز الزلزال الجوفي من سطح الأرض (الشكل 2-65)، هذا ويمكن أن تبلغ الحركة النسبية على جانبي الفالق المنزلق إثر الزلزال عدة أمتار بينما يمكن أن يبلغ طول الفالق ذاته (L) مئات الكيلومترات اعتماداً على كمية الطاقة الزلزالية المتحررة (الشكل 2-66).



الشكل (2-65): المركز الجوفي والسطحي للزلزال - طول الفالق المتصدع - انتشار الأمواج الزلزالية



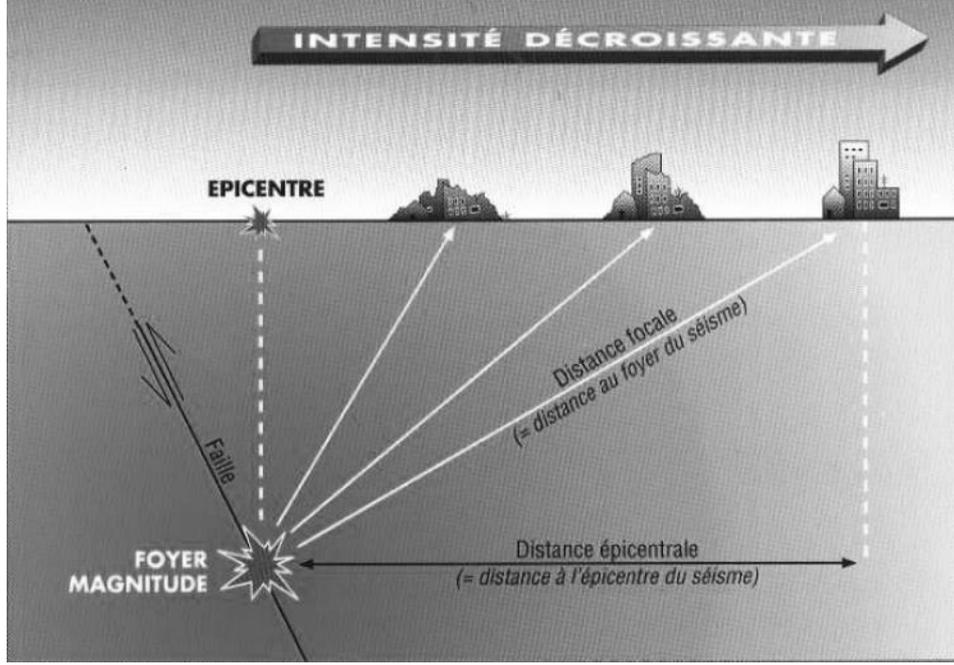
تابع الشكل (2-65): المركز الجوفي والسطحي للزلزال - طول الفالق المتصدع - انتشار الأمواج الزلزالية



زئزان الأصفلة في الجزائر - ١٩٨٠

الشكل (2-66): الحركات النسبية لطبقات الليتوسفير

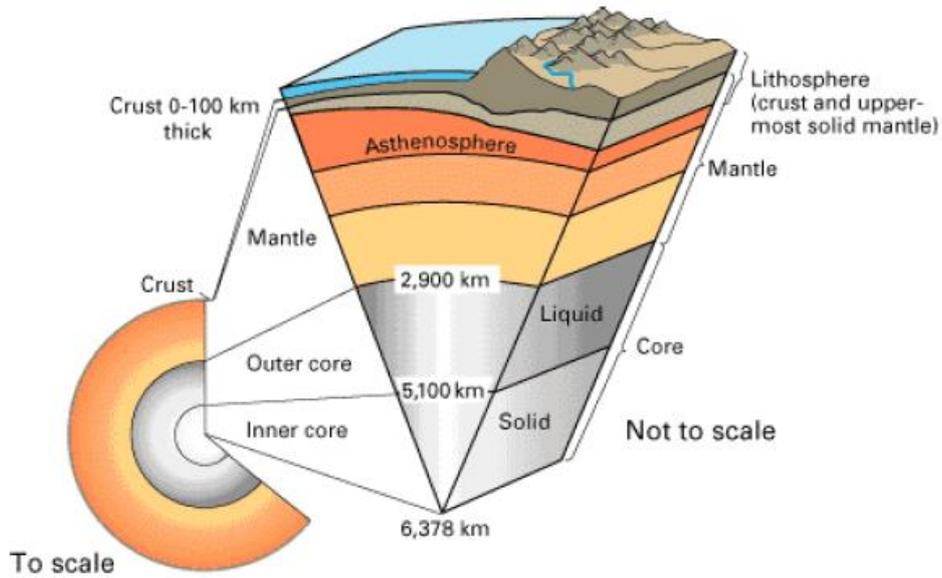
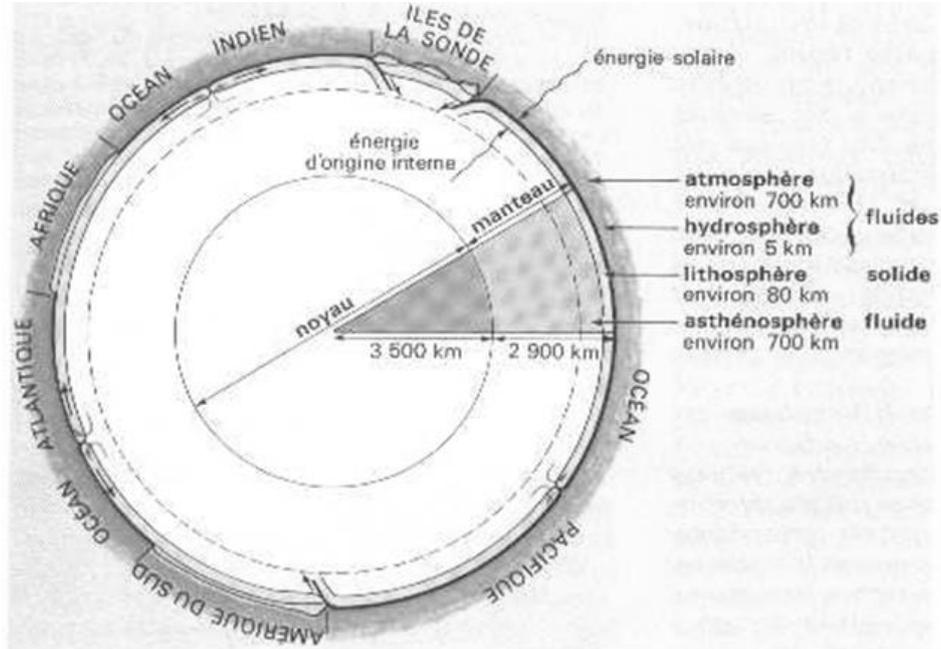
وبين الشكل (2-67) أن درجة تضرر المنشآت تزداد كلما اقتربت من المركز السطحي للزلازل. يوضح الشكل (2-68) مقطع في الأرض والوسط المحيط بها، حيث نلاحظ مناطق انغراز طبقات الليتوسفير البحرية القاسية في القارية، أو تباعدها مشكلة الفوالق والتصدعات في المحيط الأطلسي مثلاً. لتتشكل الزلازل المهمة عند مستويات هذه الصدوع والفوالق الكبيرة وفق آليات مختلفة. وبين الشكل (2-69) توزع هذه الصفائح التكتونية، وأماكن هذه الفوالق الرئيسية على مستوى القشرة الأرضية (طبقات الليتوسفير). أما الشكل (2-70)، فيبين زلزالية الكرة الأرضية (توزع الزلازل). وبشكل عام فإن الزلازل التكتونية تنتشر قرب فوالق الصفائح الرئيسية المشكلة لقشرة الأرض (الليتوسفير).



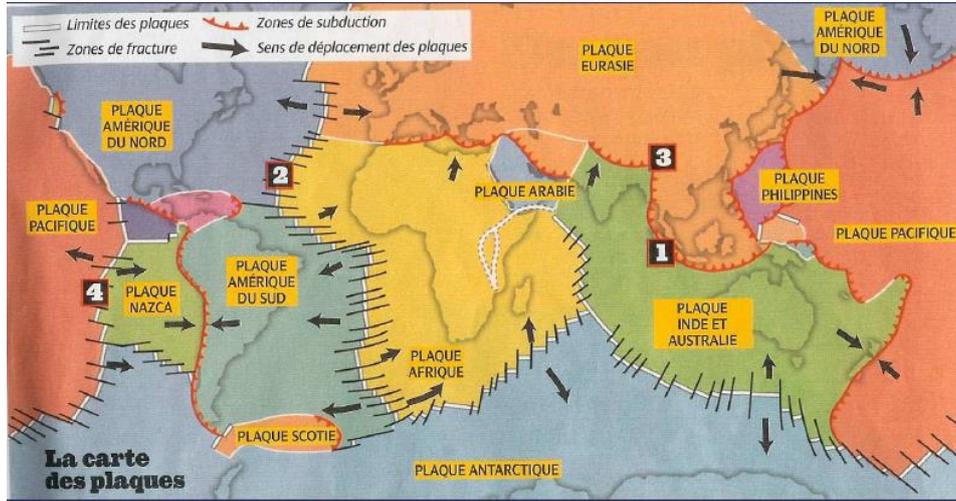
الشكل (2-67): انخفاض الشدة الزلزالية مع البعد عن المركز السطحي للزلزال

وعادة يتم تصنيف هذه الزلازل التكتونية استناداً لعمق مركز الزلزال الجوي (البؤرة)، وفق ما يلي:

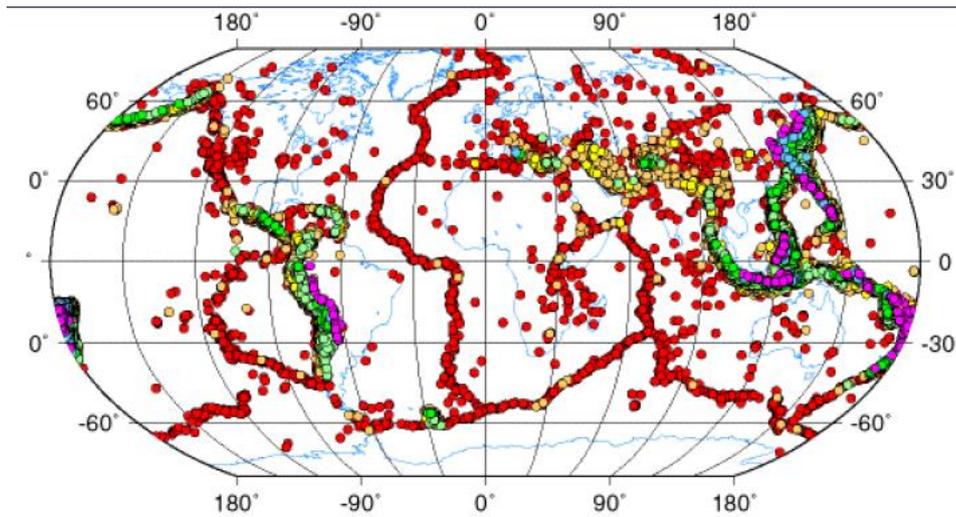
- ✓ زلازل سطحية: يتراوح العمق من 0 to 70 km ، وتشكل هذه الزلازل حوالي 75% من مجمل الزلازل في العالم.
- ✓ زلازل متوسطة العمق: يتراوح العمق من 70 to 300 km ، وتشكل هذه الزلازل حوالي 22% من مجمل الزلازل في العالم.
- ✓ زلازل عميقة: يتراوح العمق من 300 to 700 km ، حوالي 3% من مجمل الزلازل في العالم.



الشكل (2-68): مقطع عرضي في الأرض والوسط المحيط (البنية الداخلية للأرض)



الشكل (2-69): طبقات الليتوسفير - الصفائح التكتونية وجهة حركتها



الشكل (2-70): زلزالية الكرة الأرضية

وفيما يخص سوريا، يظهر الشكل (2-71) الوحدات التكتونية السورية.

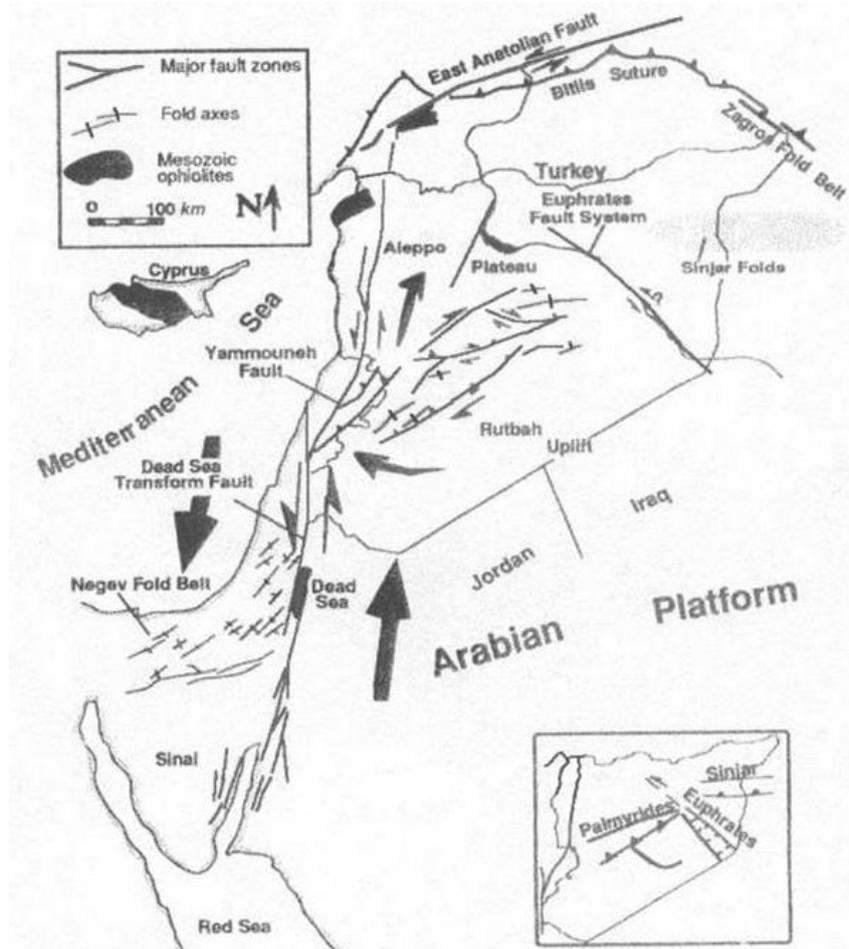
ويظهر الشكل (2-72) الخارطة الزلزالية لسوريا المعتمدة من قبل الكود السوري الأساس (تسارعات التربة الأعظمية:

(Peak Ground Acceleration (PGA)

ويمكن اعتماد القيم الواردة في جدول ملحق الكود (ه)، المبين أدناه، وهي التسارعات (PGA) المحتملة على الطبقة

الصخرية خلال خمسون عاماً مع احتمالية عدم تجاوز 90% مقدرة بالـ (cm/s^2) لبعض المدن والبلدات السورية،

ويوصي الكود السوري على ألا تقل قيمة التسارع الأرضي المعتمد في التصميم عن $0.15g$.



الشكل (2-71): الوحدات التكتونية السورية

الملحق /هـ/ - الكود السوري

المدينة أو البلدة	التسارع الأرضي	المدينة أو البلدة	التسارع الأرضي	المدينة أو البلدة	التسارع الأرضي
أبو قبيس	300-400	خناصر	200	عامودة	75
أبو الشامات	200	خنيفيس	150	عدرا	200
أبو كمال	75	دمشق	250	عشارنة	300-400
اندلب	300-400	درباسية	75	عفرين	300
أريحا	300-400	درعا	250	عين العرب	75
إزرع	250	دير الزور	75	غباغب	250
اعزاز	300	دريكيش	300-400	فرقلس	200
باب الهوى	300-400	دير عطية	200	فيق	300-400
الباب	200	رلجو	300-400	قصير حمص	300
بانباس	300	رأس العين	75	قامشلي	75
بصرى الشام	250	رستن	300	القحطانية	75
بلودان	250	رقة	75	قنموس	300-400
البيصيري	75	رنكوس	250	قريتين	200
تنمر	150	زبداني	250	قصر الحير الغربي	150
تل أبيض	75	زلف	200	قطنا	250
تل شنان	200	سبع بيار	150	قطيفة	250
تلكنخ	300-400	سخنة	150	قلعة الحصن	300-400
تل كوجك (اليعربية)	75	سراقب	300	قرداحة	300-400
التتف	75	سلمية	200	كسب	300-400
جديدة يابوس	250	سويداء	250	كسوة	250
جيلة	300	سد الطبقة	150	اللائقية	300
جبول	200	سلحب	300-400	محرده	300
جديدة الوادي	250	شهباء	250	مسكنة	150
جرابلس	150	شيخ مسكين	250	مسلمية	250
جسر الثغور	300-400	شيخ بدر	300-400	مصيف	300-400
جوسية	300-400	الشحمة	75	معره النعمان	300
جبرود	150	صافيتا	300-400	منج	150
حارم	300-400	صلخد	250	مجادين	75
حسكة	75	صلنفة	300-400	ميدان اكبس	300-400
الحفة	300-400	صنمين	200	المالكية	75
حلب	250	صيندايا	200	المخرم	200
حمام	300-400	الصوانة الشرقية	150	التيك	200
حمام	300	ضمير	200	نوى	250
حمص	250	طرطوس	250	وادي العيون	300-400
خان أرنية	300	عسال الورد	250	يبرود	250
خان شيخون	300	عرنة	300	اليعربية	75

جميع الحقول المدون فيها قيم 300-400 تؤخذ كما يلي:

- جميع المباني والمنشآت 300 ما عدا الواردة أدناه.
- المنشآت الخاصة التي يؤدي دمارها إلى كوارث بشرية وبيئية، يطلب حساب التسارع لها في موقعها وفق دراسات تفصيلية، وقد تزيد قيمها على 300، ويمكن أن تصل إلى حوالي 400

وبين الجدول (7-2) التقسيمات المعتمدة للمناطق الزلزالية السورية بناءً على الأضرار المتوقعة (الكود السوري).

شدة الهزات المتوقعة على مقياس ميركالي المعدل MMI	الأضرار المتوقعة	المنطقة	
حتى V	غير معرضة لزلزال تذكر	0	
حتى VI	أضرار طفيفة	1	
حتى أقل من VII بقليل	أضرار أقل من متوسطة	A	2
حتى VII	أضرار متوسطة	B	
حتى أكبر من VII بقليل	أضرار أكثر من متوسطة	C	
من VIII	أضرار كبيرة	3	
أكبر من VIII	من ضمن المنطقة 3 ولكن قريبة من مواقع الصدوع الرئيسية	4	

الجدول (2-7): المناطق الزلزالية السورية (الكود السوري)

- الزلازل البركانية:

تحدث الزلازل البركانية نتيجة لتراكم ضغوط ودرجات حرارة فائقة بسبب اندفاع الصخور المنطلقة من الأعماق المنصهرة تحت منطقة ضعيفة من القشرة الأرضية، الأمر الذي يؤدي إلى حدوث تصدعات فجائية، كما يؤدي إلى انطلاق المصهورات البركانية بسرعة وضغط هائلين، وغالباً ما ينتج عن ذلك التدفق الداخلي للمصهورات انفجار للغازات البركانية وغيرها.

ثانياً - الزلازل الناجمة عن النشاط البشري:

يمكن أن يؤدي العديد من النشاطات البشرية إلى حدوث الزلازل وبعض هذه النشاطات قابل للسيطرة عليه تماماً كالانفجارات (التقليدية أو النووية)، وبعضها الآخر يمكن أن يؤدي إلى تحريض حدوث الزلازل وبشكل غير قابل للتحكم به كالزلازل الناتجة عن إلقاء السدود، والزلازل الناشئة عن حقن السوائل في بعض أماكن التنقيب أو استخراج النفط وغيرها.

وقد تمكنت أجهزة الرصد الزلزالي من تسجيل هذه الزلازل المحرصة بمقادير مختلفة تصل إلى (5.5) درجة على مقياس ريختر، وذلك في أماكن قريبة من بعض السدود المائية الكبيرة.

2-3-5- الأوج الزلزالية:

يرافق ولادة الزلزال إطلاق طاقة كبيرة في زمن صغير (عدة ثواني أو دقائق)، وذلك بالرغم من أن هذه الطاقة قد تراكمت عبر زمن طويل (ربما مئات أو آلاف السنين) بسبب الحركة النسبية البطيئة للصفائح في المنطقة. وانطلاقاً من بؤرة الزلزال تنتشر الهزات الأرضية على شكل أوج مختلفة، كما هو مبين في الأشكال (2-73 و 2-74):

1. أوج حجمية: أوج طولانية (P) وأوج قص (S)

2. أوج سطحية: أوج ريلية (R) وأوج لوف (L)

وتتصف حركة كل موجة بالخصائص التالية:

1. أوج طولانية (أولية) (P): تتصف هذه الأوج بأنها أسرع الأوج الزلزالية حيث تبلغ سرعة انتشارها

حوالي 6-8 Km/sec ، وهي تنتقل في كافة الأوساط وينجم عن مرورها تغيرات حجمية (ضغط وشد متلاحقين) بحيث يكون اهتزاز دقائق (ذرات) الوسط موازياً لمسار انتشار الموجة.

2. أوج قص عرضانية (ثانوية) (S): تنتقل هذه الأوج بسرعات أقل من الأوج الطولانية بحيث تتراوح

سرعة انتشارها بين 4-5 Km/sec ، وهي لا تنتشر في الأوساط السائلة والغازية، ويرافق انتشارها تشوهات قص دون تغير في الحجم.

3. أوج ريلية (R): عند انتشارها في الوسط ترسم ذرات التربة قطوع ناقصة في المستوي الشاقولي للانتشار،

شبيهة بحركة الأوج البحرية حيث تسبب ضغطاً وشدّاً وكذلك قصاً في التربة.

4. أوج لوف (L): تتحرك نقاط التربة في مستوي مماسي للسطح وبشكل متعامد لاتجاه انتشار هذا النوع

من الأوج، وأوج لوف لا تولد إلا اجهادات قص.

ونشير هنا إلى سرعة انتشار الأوج السطحية تتراوح بين 1.5-5 Km/sec في الترب المرصوفة والصخرية، وبين 0.5-

1.5 Km/sec في الترب الرخوة. وإن هذه الأوج السطحية تنشأ نتيجة اصطدام الأوج الحجمية بسطح الأرض

حيث يبدأ هذا السطح بالاهتزاز إثر انتشار الطاقة الزلزالية السطحية. إذا اعتبرنا أن التربة تمثل وسطاً مرناً ومتجانساً

يملك الخواص التالية: E : عامل مرونة التربة ، ν : عامل بواسون ، ρ : الكتلة الحجمية.

فإنه بالإمكان تحديد سرعة انتشار الموجة الطولانية بالعلاقة التالية: $V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$

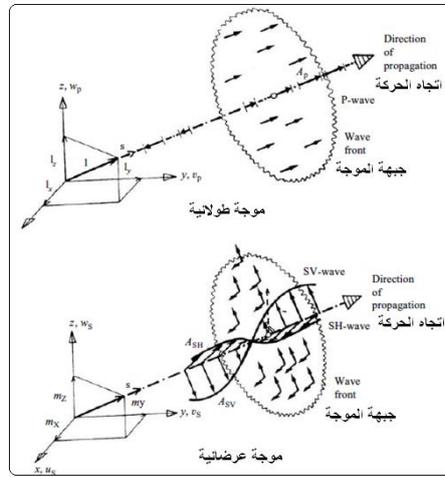
وكذلك سرعة انتشار الموجة العرضانية بالعلاقة التالية: $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad , \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad \text{حيث } (\lambda \text{ \& } G) \text{ هي ثوابت لامييه:}$$

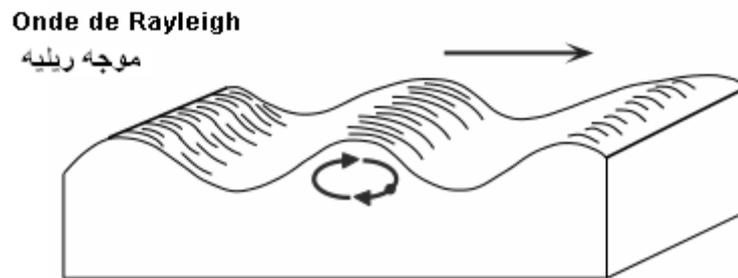
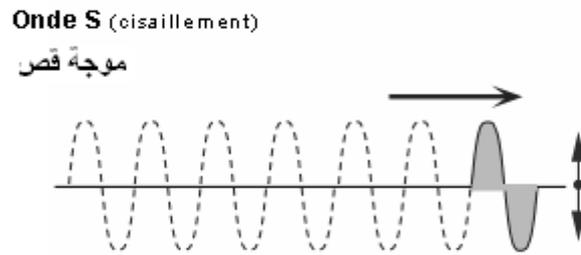
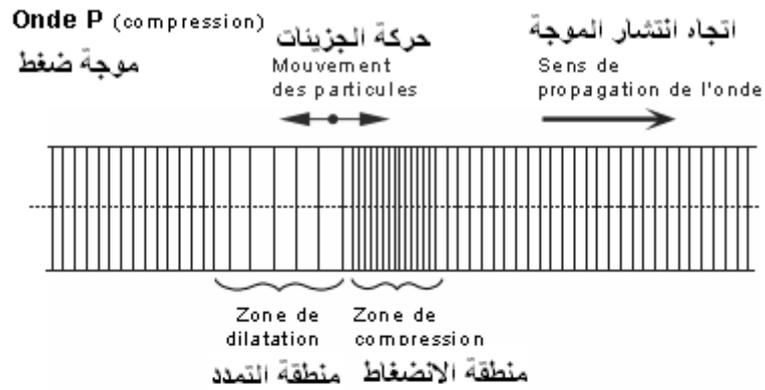
$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad \text{فتكون النسبة بين سرعتين:}$$

$$\frac{V_P}{V_S} = 1.41-1.56-1.71 \quad \text{بالتالي، ومن أجل قيم لعامل بواسون } \nu = 0-0.15-0.25 \text{ ، يكون:}$$

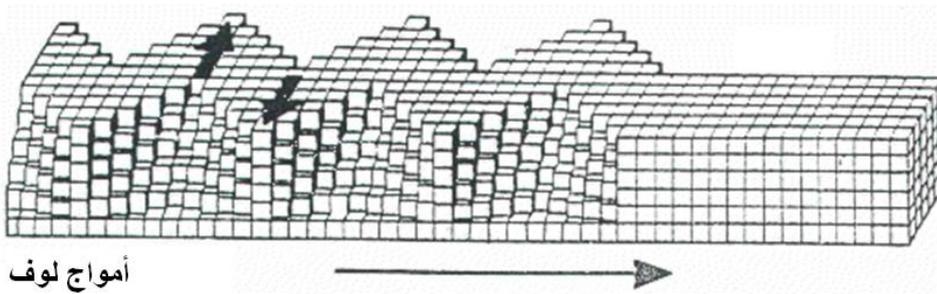
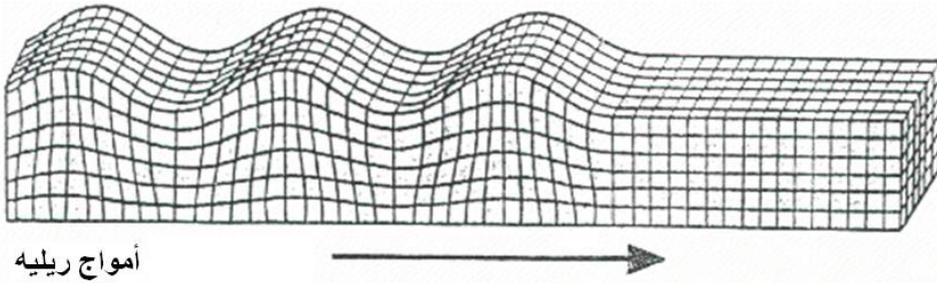
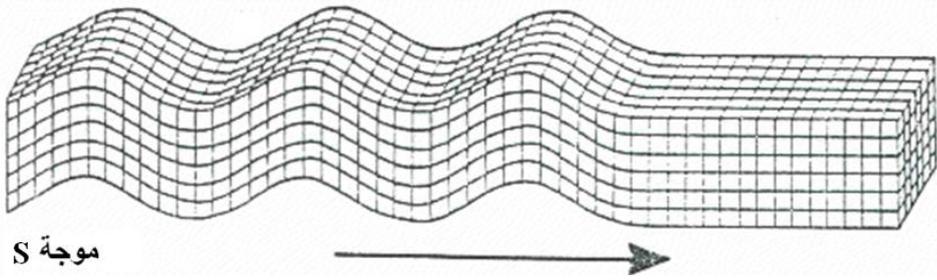
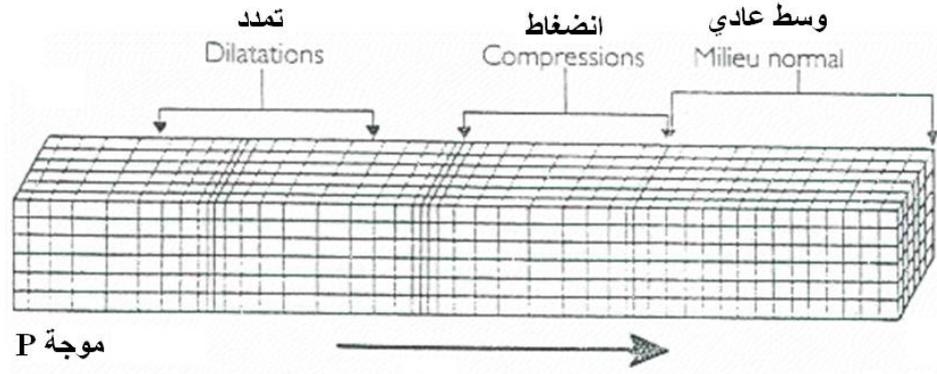
ومنه نلاحظ أن الموجة الطولانية تنتشر بسرعة أكبر بحوالي مرة ونصف من الموجة العرضانية، وهكذا يتم التقاط قطار الأمواج الطولانية P في البداية بواسطة أجهزة الرصد الزلزالي (سيسموغراف).



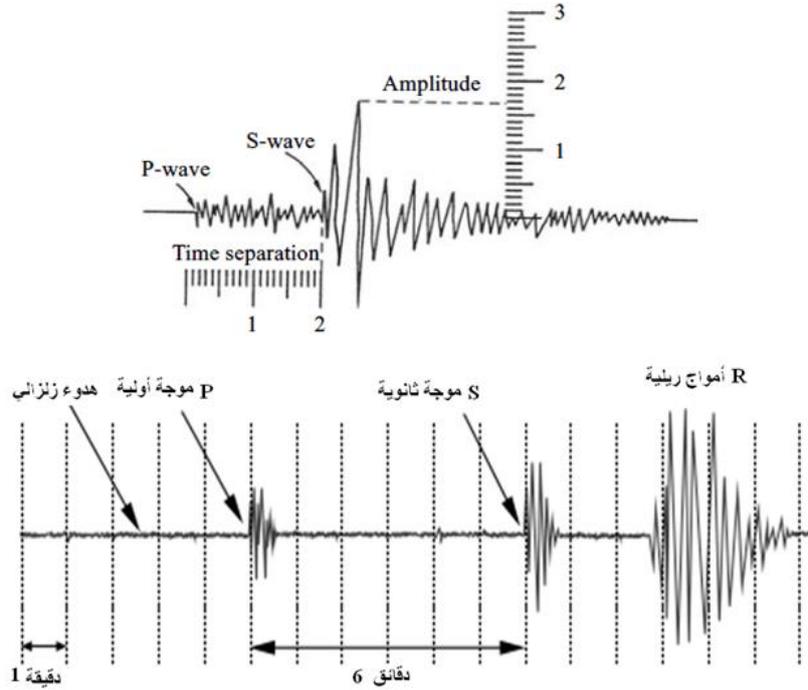
الشكل (2-73): انتشار الأمواج الحجمية



تابع للشكل (73-2): انتشار الأمواج الزلزالية الحجمية والسطحية في وسط ما



تابع للشكل (2-73): خصائص الأمواج الزلزالية ونمط تأثيرها في الوسط المارة به



Typical earthquake record

الشكل (2-74): قطار الأمواج الزلزالية – تسجيلات زلزالية نموذجية

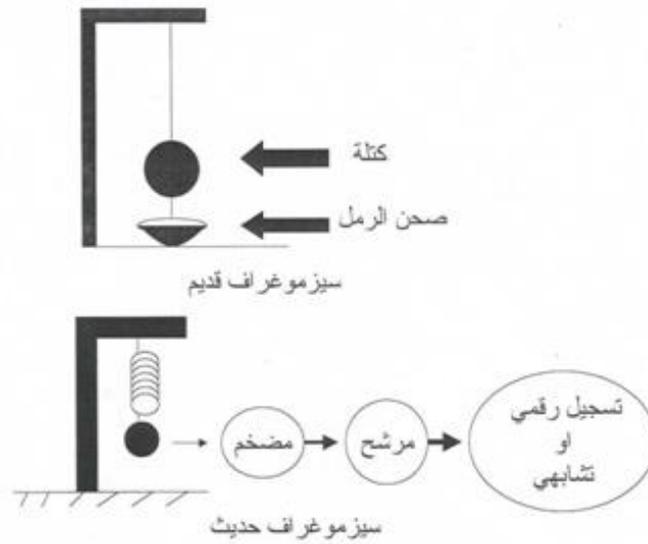
وإذا تم تحديد قيم V_p و V_s وكذلك فرق الزمن لوصول هاتين الموجتين فإننا نستطيع حساب المسافة بين مركز الزلزال الجوفي ونقطة التسجيل (محطة الرصد الزلزالي، السيسموغراف، الشكل (2-75)). ونشير هنا إلى أن الحساب المقام بواسطة معطيات محطة رصد واحدة لا يسمح بتحديد الاتجاه الواقع عليه مركز الزلزال الجوفي، وإنه يلزمنا استخدام معطيات تسجيل لأكثر من ثلاثة محطات لتحديد موقع هذا المركز. ويتم تحديد مركز الزلزال بناءً على تحديد بعده عن ثلاث محطات رصد زلزالية على الأقل وذلك من خلال رسم ثلاث دوائر أنصاف أقطارها تساوي الأبعاد المحسوبة للزلزال عن مراكز الرصد الثلاثة ويكون مركز الزلزال السطحي نقطة التقاء للدوائر الثلاث المرسومة، كما هو مبين في الشكل (2-76).

ومن أجل تحديد درجة الزلزال وفق مقياس ريختر يتم استخدام منحنيات خاصة لهذا الغرض تربط بين سعة الزلزال المقاسة في مركز الرصد الزلزالي ودرجته وفق ريختر وذلك من خلال تحديد بعد ذلك الزلزال عن مركز الرصد المستخدم. ويظهر الجدول (2-8) بعض الفوارق الزمنية لوصول الأمواج الطولية p وأمواج القص S وما يقابل ذلك الزمن من مسافة لمركز الرصد عن مكان الزلزال.

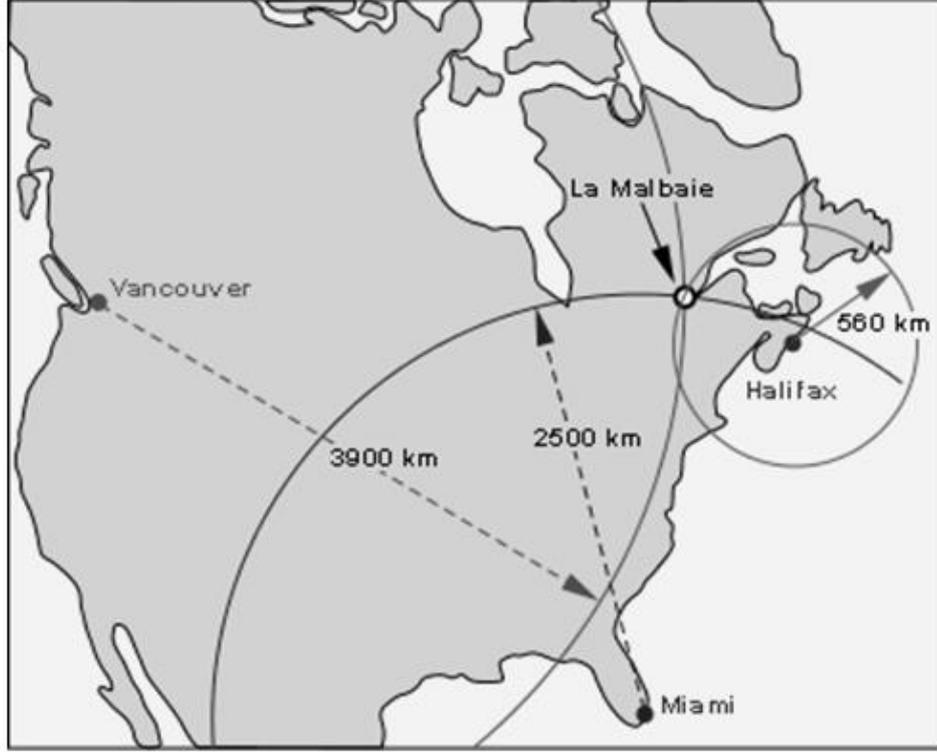
الفترة الزمنية بين وصول موجات s و p

ثانية	دقيقة	المسافة بين مركز الزلزال ومحطة الرصد الزلزالي km
20	0	160
45	2	1600
52	4	3200
30	6	4800
-	8	6400
25	9	8000
44	10	9600
49	11	11200

الجدول (8-2): بعض الفوارق الزمنية لوصول الأمواج الطولانية p و أمواج القص S



الشكل (2-75): مكونات السيسموغراف (جهاز الرصد الزلزالي)



الشكل (2-76): تحديد موقع مركز الزلزال السطحي اعتماداً على ثلاث محطات

أخيراً، نشير إلى أن الأمواج الحجمية والسطحية على حد سواء تتولد عن أي زلزال، غير أن السطحية منها تعتبر مؤشراً فيزيائياً لحجم السطح المتفلق ولذلك فإن معظم الزلازل التي ترصد في تسجيلاتها أمواج لوف وربلي بوضوح وبسعات كبيرة نسبياً هي زلازل ناجمة عن فوالق أو صدوع ذات مساحات شاسعة وبالتالي فهي كبيرة ومدمرة بالعادة. وكمثال على ذلك تحررت طاقة زلزالية سطحية من زلزال عام 1960 في تشيلي، فاقت كميتها الطاقة المتولدة عن أي زلزال مسجل في التاريخ الحديث حيث استمرت محطات الرصد الزلزالي في عموم الكرة الأرضية ترصد أمواج سطحية لمدة تزيد عن ثلاثة أيام مما يعني أن تلك الاهتزازات قد دارت حول محيط الأرض أكثر من 20 مرة.

4-5-2- مقاييس تقييم الزلازل:

نظراً لتعدد العوامل المتعلقة بالزلزال: الشدة وزمن الحدوث وفترة الاهتزاز وأقصى طاقة متحررة.. الخ، يعتبر قياس زلزال ما أو تقييمه بمقياس وحيد أو بطريقة دقيقة تعبر عن كمية الطاقة المتحررة من خلاله أمراً على درجة من الصعوبة. لذلك اقترحت عدة مقاييس لتقييم الزلزال وتحديد مدى التدمير الناتج عنها، ويستخدم حالياً وبشكل واسع اصطلاحان لقياس الزلزال هما اصطلاح الشدة (Intensity)، واصطلاح السعة أو القدر (Magnitude)، وفي حالات أخرى يستخدم اصطلاح العزم الزلزالي (Seismic Moment).

أ- مقياس شدة الزلزال : Intensity scale

يعتبر مقياس الشدة مقياساً وصفيّاً حيث إن شدة الزلزال تتحدد بدرجة الاهتزاز المرتبطة به، وبالتالي بالأضرار الميدانية والإنشائية الحاصلة، ويتم التحري عن ذلك من المعاينات الميدانية للأضرار البيئية والإنشائية الناتجة ومن خلال مشاهدات الأشخاص في المنطقة، حيث يتم رسم الخرائط التي تبين مدى الأضرار التي لحقت بالمنطقة، ويستخدم لهذا الغرض مقياس أطلق عليه مقياس ميركالي المعدل: (Modified Mercali Intensity Scale)

حيث يتدرج من I (الشدة البسيطة) إلى XII (الشدة المدمرة)، للدلالة على مدى الأضرار المتعلقة بالزلزال (يرمز للشدات بأرقام رومانية). ويمكن تلخيص مختلف درجات مقياس ميركالي المعدل (MMI) كما يلي :

- 1) الدرجة I : لا يمكن الإحساس بها من قبل الأشخاص ولكن يتم تسجيلها من خلال أجهزة الرصد الزلزالي الدقيقة.
- 2) الدرجة II : ترتبط هذه الدرجة باهتزازات خفيفة يمكن أن يشعر بها الأشخاص الجالسين بحالة مستقرة وثابتة.
- 3) الدرجة III : يشبه الاهتزاز المرتبط بهذه الدرجة حركة الأرض الناتجة عن مرور شاحنات خفيفة ، تسبب هذه الاهتزازات تأرجح الأشياء المعلقة كالصور المعلقة والمصابيح وغيرها.
- 4) الدرجة IV : يشبه مقدار الاهتزاز على هذه الدرجة اضطراب الأرض الناتج عن مرور شاحنات ثقيلة مما يسبب ارتجاج الأبواب و النوافذ.
- 5) الدرجة V : الاهتزاز على هذه الدرجة يتسبب في إيقاظ الأشخاص من نومهم وتأرجح الأبواب بين الفتح والإغلاق واضطراب السوائل وغير ذلك.
- 6) الدرجة VI : الاهتزاز على هذه الدرجة يؤدي إلى إزعاج معظم الجنس البشري مما يسبب ذعراً شديداً واضطراباً نفسياً يؤدي إلى خروج الأشخاص من المساكن والأبنية العامة إلى الشوارع ويمكن أن يحدث تكسراً للنوافذ الزجاجية وظهور تشققات في الأبنية الحجرية والأبنية البيتونية غير المسلحة.
- 7) الدرجة VII : يسبب الاهتزاز المرتبط بهذه الدرجة صعوبة وقوف الأشخاص وسقوط أجزاء معلقة في المباني كالسقوف المستعارة وغيرها من المعلقات الهندسية الخدمية والمعمارية.
- 8) الدرجة VIII : يسبب الاضطراب المرتبط بهذه الدرجة تكسر أغصان بعض الأشجار وميلان المداخن العالية أو سقوطها، وانهيار الأبنية الحجرية وحدوث التشققات في أبنية البيتون المسلح.
- 9) الدرجة IX : يعم فزع عام في المنطقة وتظهر التصدعات والتشققات في الطرق وتهار الأبنية البيتونية المسلحة غير المصممة لمقاومة الزلازل ويرافق ذلك تعطل في الخدمات العامة (كخطوط الكهرباء والهاتف و أنابيب المياه و مجاري المياه العامة الخ).

- (10) الدرجة X : تهار الأبنية الحجرية ومعظم الأبنية البيتونية المسلحة ويتم إلحاق خسائر جسيمة بالسدود ويرافق ذلك حدوث انهيارات وانزلاقات أرضية مختلفة كما وتتعمل معظم الخدمات العامة.
- (11) الدرجة XI : كارثة شبه شاملة للمنطقة تسبب انهيار معظم الأبنية وتتعمل كامل للخدمات العامة وتصعد وتكسر الطرق المعبدة والتواء خطوط والتواء خطوط السكك الحديدية.
- (12) الدرجة XII : خراب كامل للأبنية والمنشآت مع تدمير شامل للخدمات العامة وتقطع طرق المواصلات مما ينتج عنه خسائر بشرية ومادية وبيئية جسيمة.
- وهناك مقاييس أخرى للشدة الزلزالية، مشابهة لمقياس ميركالي المعدل نذكر منها: (R-F, MSK & JMA)، وبين الشكل (77-2) مقياس (MSK).

DEGRE DE L'ECHELLE DES INTENSITES (M.S.K.)		
I	Secousse non perceptible	اهتزاز لا يحس به الأشخاص
II	Secousse à peine perceptible	محسوسة من قبل الإنسان EFFETS RESSSENTIS PAR L'HOMME
III	Secousse faible ressentie de façon ponctuelle	
IV	Secousse largement ressentie	
V	Réveil des dormeurs	
VI	Frayeur, perte d'équilibre	
VII	Domages aux constructions	تأثيرات على الإنشاءات
VIII	Destruction de bâtiments	EFFETS SUR LES CONSTRUCTIONS
IX	Domages généralisés aux bâtiments	
X	Destruction générale des bâtiments	
XI	Catastrophe	تأثيرات خطيرة على البيئة
XII	Changement des paysages	EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT

الشكل (77-2): مقياس الشدة الزلزالي (M.S.K)

ويمكن تحديد قيمة تسارع التربة الأعظمي ($PGA=a$) بدلالة الشدة الاسمية (ميركالي المعدل MMI)، بشكل تقريبي من العلاقة التالية (انظر الجدول التالي):

$$\log_{10} a (cm/s^2) = \frac{MMI}{3} - \frac{1}{2}$$

$$MMI = III = 3 \Rightarrow a = 3.2 cm/s^2$$

$$MMI = V = 5 \Rightarrow a = 14.7 cm/s^2$$

$$MMI = 9 \Rightarrow a = 316.2 cm/s^2$$

مقارنة مقياس ميركالي المعدل بمقاييس أخرى لشدة الزلزالية

$a, \text{cm/s}^2$	MMI, Modified Mercalli	R-F, Rossi-Forel	MSK, Medvedev-Sponheur- Karnik	JMA, Japan Meteorological Agency
0.7	I	I	I	0
1.5	II	I-II	II	I
3	III	III	III	II
7	IV	IV-V	IV	II-III
15	V	V-VI	V	III
32	VI	VI-VII	VI	IV
68	VII	VIII-	VII	IV-V
147	VIII	VIII+ to IX-	VIII	V
316	IX	IX+	IX	V-VI
681	X	X	X	VI
(1468)*	XI	—	XI	VII
(3162)*	XII	—	XII	

* a values provided for reference only. MMI > X are due more to geologic effects.

قيم مرجعية، حيث يكون التسارع مرتبط بالتأثيرات الجيولوجية عندما $\text{MMI} > X$

ويظهر الجدول (9-2) التسارع الأرضي الموافق للدرجات المختلفة لمقياس ميركالي المعدل وفق تصنيف المنطقة الزلزالية للكود الأمريكي UBC ($g=9.81\text{m/s}^2$).

تصنيف المنطقة وفق UBC	التسارع الأرضي التقريبي	الشدة الزلزالية	
0	0.001g	I	
	0.002g	II	
	0.005g	III	
	0.010g	IV	
1	0.020g	V	
	0.050g	VI	
2	0.100g	VII	
قرب فوالق رئيسية 4	3	0.200g	VIII
		0.500g	IX
قرب فوالق رئيسية 4	3	1.000g	X
		2.000g	XI
		5.000g	XII

الجدول (9-2): التسارع الأرضي الموافق لمقياس ميركالي المعدل

ب- مقياس مقدار أو قوة الزلزال : Magnitude Scale

طور ريختر أسلوب قياس فيزيائي للمقارنة بين الطاقة المتحررة عن زلزال حدثت في ولاية كاليفورنيا حيث يعتمد هذا المقياس على قياس أكبر سرعة لموجة زلزالية مسجلة في السجل الزلزالي لأي زلزال وذلك على مسافة محددة من مركز الزلزال السطحي (Epicenter). ويعرف مقدار الزلزال (M) وفق هذا المقياس (مقياس ريختر) بأنه اللوغاريتم العشري لأقصى سعة اهتزازية مسجلة عن الزلزال يقع على بعد 100km حيث يتم قياس سعة الاهتزاز بالميكرون، وبالرغم من استخدام هذا النظام بشكل شبه عالمي لتعيين درجة الزلزال إلا أنه لا يخلو من نواقص منها : أننا نستطيع تعيين أقصى سعة لموجات الضغط (p-wave) أو أمواج القص (S-Wave) و الأمواج السطحية (Surface Waves) التي تتولد عن زلزال ما مما يجعل تعيين المقدار عملية معقدة يمكن أن ينتج عنها أكثر من تقدير لنفس الحدث. فضلاً عن ذلك، أن معظم معادلات المقدار لا تأخذ فترة الزلزال بعين الاعتبار وبالتالي فإن ميكانيكية وديناميكية التفلق وتحرر الطاقة الزلزالية يبقى غير محتسب.

نتيجة لدراسة عدد كبير من الزلازل توصل ريختر، سنة 1958م، إلى علاقة وصفية بين درجة الزلزال والطاقة الناتجة عنه كما يلي:

$$\log_{10} E = 11.4 + 1.5M$$

حيث أن وحدة قياس الطاقة الناتجة هي الجول (ergs) ودرجة الزلزال وفق ريختر، ونلاحظ من العلاقة هذه الزيادة بمقدار 1 في درجة الزلازل يقابلها زيادة بمقدار 32 ضعف في الطاقة. وقد بلغت أعلى درجة سجلت للزلزال حسب مقياس ريختر بين (8.6) و (8.8). ولا يمكن عملياً أن تتجاوز درجة الزلزال وفق مقياس ريختر الدرجة 9 بسبب استحالة تحمل الصخور لطاقة تتجاوز هذا المقدار، (يرمز للدرجة في هذا السلم بأرقام عربية).

وفي عام 1966، قام باحث بتعديل معادلة ريختر لتصبح:

$$\log_{10} E = 12.24 + 1.44M$$

وكذلك تم تعديلها من قبل توشير (سنة 1958)، بونيلا (سنة 1967) وهوسير (سنة 1969)، لتصبح:

$$\log_{10} L = 1.02M - 5.77$$

حيث L : طول الفالق المتصدع بالكيلومتر.

تطبيق:

$$\log_{10} L = 1.02M - 5.77$$

$$M = 6 \Rightarrow \log_{10} L = 1.02 \times 6 - 5.77 = 0.35$$

$$\therefore L = 2.24 \text{ km}$$

$$M = 7 \Rightarrow L = 23.44 \text{ km}$$

$$M = 8 \Rightarrow L = 245.47 \text{ km}$$

وهنا نلاحظ بأن الزيادة بمقدار 1 في درجة الزلازل يقابلها زيادة بمقدار عشرة أضعاف من الطول. تنخفض كمية الطاقة لموجة زلزالية عندما تنتشر في الصخر، وهذا ما يدعى بالتهوين (Attenuation) (جيومتري وداخلي). تتأثر ظاهرة التهوين بالعوامل التالية:

- خط مسار الموجة.
- طول المسار.
- طبيعة التشكلات الجيولوجية المقطوعة.
- عمق المركز الجوفي للزلزال (البؤرة).
- موقع مركز الزلزال السطحي.

عندما يراد دراسة طبيعة الحركات الأرضية القريبة من السطح، يجب فهم العوامل التالية:

- فترة الزلزال.
- الدور المسيطر للتسارع.
- السعة الأعظمية للحركة.

غالباً ما تكون فترة الزلزال مساوية للزمن اللازم لوصول الفالق إلى التصدع. تحدد سرعة انتشار الفالق تقريباً

$$t = \frac{L(km)}{3.2} \text{ (sec)}$$

بالتالي يمكن تحديد قيمة فترة الزلزال بعد معرفة طول الفالق، بالعلاقة التالية:

إن دور الزلزال يشير إلى الدور المسيطر للموجة الزلزالية، الذي يتم تحديده من تحليل فورييه لأمواله. بالتالي، عند دراسة استجابة منشأة ما على الزلازل يجب معرفة ثلاثة أدوار: الدور الطبيعي أو الأساسي لتربة التأسيس، الدور الطبيعي للمنشأة المدروسة، وأخيراً دور الزلزال. ويحدد الدور الطبيعي للتربة من المعطيات الجيوتكنيكية، وأما للمنشأة فيتم تحديده من خلال تحليلها.

إن الضرر الإنشائي الناجم عن الزلازل يرتبط بالعوامل التالية:

1. تسارع التربة،
2. مدة أو فترة الحركة،
3. المحتوى الترددي (Frequency content)،
4. ظروف تربة الموقع (التأسيس) ودورها الطبيعي،
5. المسافة بين بؤرة الزلزال والمنشأة،
6. التشكلات الجيولوجية وتداخلاتها،

7. الدور الطبيعي للمنشأة وتغامدها.

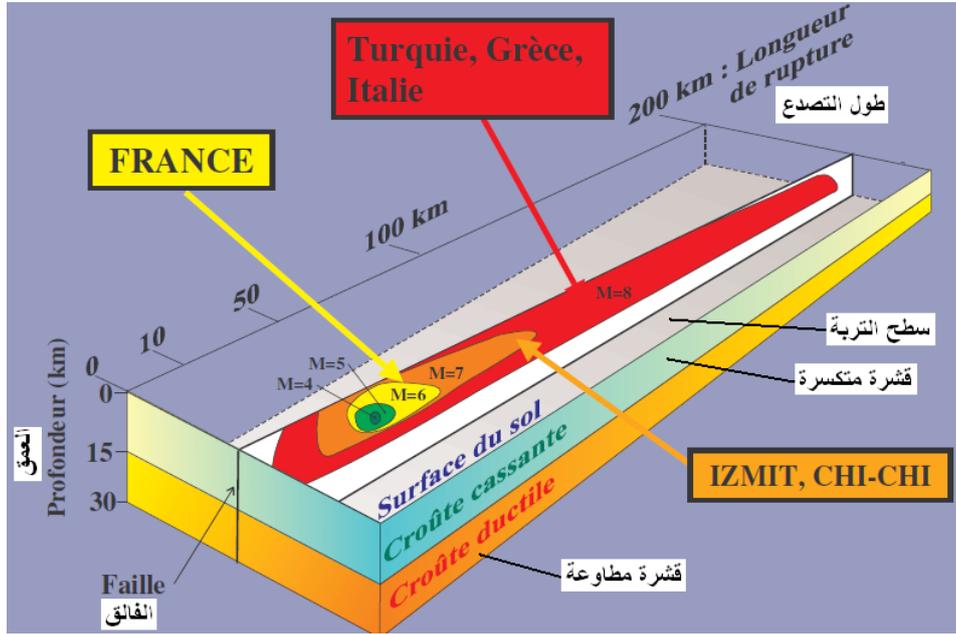
يوجد ظاهرة تسمى "الطنين - Resonance"، يجب أخذها بالحسبان عند إعداد الدراسة الزلزالية، والتي ينجم عنها تضخم في الاستجابة. يحصل الطنين عندما تتقارب قيم كل من أدوار الزلزال وترية الموقع والمنشأة المدروسة من بعضها بعضاً، وكمثال على خطورة هذه الظاهرة ما حصل في زلزال مدينة مكسيكو عام 1985م وتدمير الكثير من أبنيتها، بالرغم من صغر التسارعات وبعد بؤرة الزلزال عن المدينة (حوالي 365 كلم).

يظهر الجدول (2-10) تصنيف الزلازل حسب مقياس ريختر والمعدل السنوي لحدوثها عالمياً .

نوع الزلزال	M الدرجة	معدل الحدوث السنوي عالمياً	الطاقة المتحررة
زلزال شديد التدمير	>8	(1-2)	-
زلزال مدمر إقليمياً	7-8	(15-20)	قوة انفجار قنبلة هيدروجينية (مليون طن ت.ن.ت)
زلزال مدمر محلياً	6-7	(100-150)	قوة انفجار قنبلة ذرية كبيرة (مائة طن ت.ن.ت)
زلزال متوسط	5-6	(750-1000)	قوة انفجار تعادل قنبلة ذرية صغيرة (20 طن ت.ن.ت)
زلزال معتدل	4-5	(5000-7000)	قوة انفجار عدة أطنان من مادة ت.ن.ت

الجدول (2-10): تصنيف الزلازل ومعدل حدوثها السنوي حسب مقياس ريختر

يبين الشكل (2-78) رسماً توضيحياً للعلاقة بين قوة الزلزال وطول التصدع لزلزال مختلفة في العالم (تركيا – اليونان – إيطاليا – فرنسا – ازميت وتشي تشي في تايوان).



الشكل (2-78): قوة الزلزال (M) وطول التصدع (L)

وبين الجدول (2-11) تغير قيم بعض العوامل من طول الفالق المتصدع، الانزلاق الوسطي، فترة التصدع وتباعد السطوح عند مستوى الفالق، كتابع للقوة المعرفة أعلاه.

القدر (القوة) Magnitude	طول الفالق	الانزلاق الوسطي	فترة التصدع	تباعد السطوح
4	1 km	1 cm	0.2-0.4 s	0
5	2-4 km	3-8 cm	0.5-2 s	0
6	10-20 km	10-30 cm	2-5 s	0-30 cm
7	40-80 km	0.5-2 m	8-20 s	0-2 m
8	150-300 km	3-7 m	40-80 s	0-5 m
9	500-1000 km	10-20 m	200-300 s	0-15 m

الجدول (2-11): قوة الزلزال وحركة الفالق المتصدع

ونشير إلى أنه لا يوجد علاقة بين قوة زلزال وكل من التسارع أو المدة (فترة الزلزال)، وعلى سبيل المثال نذكر:

- زلزال لوما بريتا في منطقة سان فرانسيسكو، عام 1989م، كانت قوته $M=7.1$ ، وتم تسجيل تسارع تربة أعظمي مقداره $PGA=0.65g$.
- زلزال نورثريدج في منطقة لوس أنجلوس، عام 1994م، كانت قوته $M=6.7$ ، وتم تسجيل تسارع تربة أعظمي مقداره $PGA=0.1.80g$.
- زلزال سان فيرناردو، عام 1971م، كانت قوته $M=6.6$ ، واستمر لمدة 7 sec .
- زلزال إلسينترو، عام 1940م، كانت قوته $M=6.4$ ، واستمر لمدة 16 sec .

في الحقيقة، إن كل من تواتر الموجة الزلزالية ومدتها، وتسارع حركة التربة تؤثر جميعها على كمية ونوعية الضرر الإنشائي.

ومن ناحية أخرى، يؤثر الزلزال على الأداء الإنشائي لتربة التأسيس من خلال تشكل ظاهرة الإسالة أو التميع (Liquefaction) عند مرور الأمواج عبر الترب الحبيبية الناعمة والمغمورة، وتعرف هذه الظاهرة الخطيرة بالانخفاض الفجائي والدراماتيكي لمقاومة التربة للقص (الشكل 2-79)، حيث يحصل زيادة كبيرة في الضغط المائي المسامي، و فقدان كامل لقدرة التحمل مع انخفاض الاجهادات الفعالة للتربة.

أن طبقات الغضار الناعم تميل إلى زيادة سعة الحركات الأرضية، وذلك بمقدار أكبر من حالة الترب الحبيبية.



الشكل (2-79): الإسالة (التميع) في تربة التأسيس تسبب انهيار الأبنية (نيكاتا - اليابان)

كما ذكرنا سابقاً، إن مقياس ميركالي يعتمد على توصيف شدة الأضرار الناتجة عن الزلزال، بينما يعتمد نظام ريختر على قياس سعة أقصى موجة زلزالية موافقة للزلزال، بالتالي ليس هنالك أية أسس منطقية لربط هذين المقياسين معاً وبشكل علمي. ونشير هنا إلى وجود محاولات ودراسات كثيرة حول هذا الموضوع، التي اعتمدت على مقارنة زلازل فعلية في مناطق محددة، إلا أن هذه المحاولات تعطي فروقاً كبيرة إذا ما طبقت في مناطق مختلفة مما يجعل الاعتماد

عليها غير مستند إلى أي أساس علمي مقبول. كما أن هنالك مصادر أخرى أوردت علاقة تقريبية بين مقياس ميركالي المعدل ومقياس ريختر والتسارع الأرضي التقريبي الموافق لهما كما هو مبين في الجدول (2-12):

تسارع التربة التقريبي	مقياس MMI الشدة وفق ميركالي المعدل	مقياس M الدرجة وفق ريختر
0.001g-0.002g	I-II	2
0.005g	III	3
0.02g	V	4
0.05g-0.1g	VI-VII	5
0.1g-0.2g	VII-VIII	6
0.5g-g	IX-X	7
2g-5g	XII-XII	8

الجدول (2-12): العلاقات بين مقياس ميركالي المعدل ومقياس ريختر والتسارع التقريبي للتربة

2-5-5-5- الرقائق الأساسية للتصميم المقاوم للزلازل:

قبل أن نعالج بعض المسائل الهامة في الهندسة الزلزالية، نرى ضرورة تذكير الدارس بأهم الرقائق الأساسية الواجب معالجتها بعمق للحصول على منشأة مقاومة للزلازل، والتي يمكن تلخيصها بالنقاط الخمس التالية:

2-5-5-1- اختيار الموقع:

يمكن أن يحصل تضخيم للموجة الزلزالية عند مرورها في تربة الموقع أو نتيجة الفعل المتبادل بين التربة والمنشأة، ويحصل تضخيم اهتزازات التربة في المرتفعات وفي أعلى المنحدرات الواقعة بين التربة الصخرية والرخوة. في حالة الترب الضعيفة، من الأفضل إقامة المنشآت ذات النظام الإنشائي الصلب، وفي حالة الترب الجيدة والصخرية يستحسن تنفيذ منشآت مطاوعة.

في حالة الموقع غير المستقر أو التربة القابلة للانزلاق أو في حالة وجود فوالق، فإن المنشآت الهندسية المصممة بأفضل الطرق لا تستطيع أن تدوم تحت تأثير الهزة.

2-5-5-2- التصميم المعماري المناسب:

يتأثر سلوك المنشآت المعرضة للزلازل بشكلها المعماري، حيث إن بعض التكوينات المعمارية تعمل على تضخيم الاهتزازات الناجمة عن الزلازل وبالتالي نشوء ظروف سلبية لمقاومة الزلازل. ونبين فيما يلي الخيارات الأفضل لتأمين الظروف الجيدة للمقاومة:

- التناظر في المسقط بالاتجاهين.

- التقليل من الفتل، والعمل على تطابق كل من مركزي الصلابة والكتلة.
- تأمين نظام تقوية لكل من الاتجاهين الأفقيين الرئيسيين.

2-5-3- احترام القواعد الزلزالية (الترتيبات الإنشائية والأبعاد):

وفقاً للنظام الإنشائي المعتمد (الهيكل الحامل)، فإن بنائين لهما شكل واحد، ومشادين على تربة تأسيس واحدة، يمكن أن تسلكا سلوكين مختلفين تماماً.

في الواقع يمكننا تلخيص المتطلبات الأساسية لبناء مقاوم للزلازل، وفق النحو التالي:
تأمين المقاومة: قدرة المادة على تحمل الجهود دون انهيارها.

تأمين المطاوعة: امتصاص ونشر الطاقة.

تأمين الصلابة: خاصية الحد من الانتقالات الأفقية الطابقية الناجمة الأفعال الأفقية (سلامة العناصر غير الإنشائية من قواطع وغيرها، الحد من الفعل $P-\Delta$).

2-5-4- تنفيذ نوعي:

مواد بنوعية جيدة، الحماية من الحريق، تنفيذ الوصلات والعقد بشكل صحيح ومدروس، والاهتمام بتنفيذ وسلامة العناصر غير الإنشائية.

2-5-5- الصيانة الدورية للمنشآت:

يهدف الحفاظ على الخواص الديناميكية للمنشآت، يجب إجراء فحص وصيانة دورية لكافة العناصر.

2-5-6- الانعطابية (Vulnerability) والتضرر الناجم عن الزلازل:

إن مفهوم الحماية الزلزالية يهدف إلى الحفاظ على الحياة البشرية، بالتالي حماية الهيكل الحامل للبناء أولاً، وتأتي سلامة العناصر غير الإنشائية بالدرجة الثانية. وعند حصول زلزال قدره عالياً نسبياً فإنه يمكن أن يسلم هيكل البناء دون حصول أضرار تذكر، بينما نلاحظ انهيار شبه كامل للعناصر غير الإنشائية. وانطلاقاً من أن هذه العناصر غالية جداً، وانهيارها أيضاً يتم إيقاف مؤقت لاستثمار البناء الذي بدوره يسبب خسائر مادية وحيوية وخاصة للمؤسسات الحيوية سواء كانت خدمية أم إنتاجية فإنه أمر جوهري الاهتمام بهذه العناصر وحسابها مع الالتزام بتطبيق كافة الاشتراطات والترتيبات الخاصة التي تنص عليها الكودات الناظمة بهدف تقليل الأضرار والخسائر. في الواقع، لا يمكن للقواعد أو الكودات الزلزالية العالمية أن تضمن منع حصول التضررات الكبيرة عند تعرض المنشآت لزلزال مدمرة.

يوضح الشكل (2-80) بعض المنشآت المتضررة والمتهارة نتيجة تعرضها لزلزال مدمرة بالرغم من أنها مدروسة ومحققة لكافة متطلبات الكودات الزلزالية.

يمكن أن نعرف الإنعطابية بأنها النسبة بين تكلفة الأضرار المتوقعة والسعر الرائج للبناء، وذلك عند حصول زلزال بشدة اسمية معينة، ويعبر عن الإنعطابية بنسبة مئوية أو برقم يتراوح بين 0 و 1 .
في الواقع، إن الإنعطابية الزلزالية تعبر عن درجة تضرر المنشآت الخاضعة لأفعال زلزالية.



الشكل (2-80): منشآت منهارة بالرغم من أنها مدروسة وفقاً لقواعد وكودات زلزالية

ويمكننا تصنيف الإنعطابية وفق ثلاثة مستويات رئيسية (الجدول 2-13):

- انعطابية عالية (High Vulnerability - A): توافق درجة تضرر كبيرة بحيث يكون الأداء الزلزالي للمنشأة ضعيفاً جداً.
- انعطابية متوسطة (Medium Vulnerability - C): توافق درجة تضرر متوسطة.
- انعطابية منخفضة (Low Vulnerability - F): توافق درجة تضرر صغيرة جداً، ويكون الأداء الزلزالي للمنشأة ممتازاً.

يقابل التصنيف المذكور أعلاه تصنيف للتضرر وفق خمس درجات (1,2,3,4 & 5)، ويمكن بيان ذلك من خلال الأشكال (من 2-81 حتى 2-85).

Seismic Vulnerability Class	High Vulnerability = Very Poor Seismic Performance A	B	Medium Vulnerability C	D	E	Low Vulnerability = Excellent Seismic Performance F
	-	-	●	-		

Notes:

- = Expected seismic vulnerability class
- | = Probable vulnerability range –lower bound
- | = Probable vulnerability range-upper bound

الجدول (2-13): تصنيف الإنعطابية الزلزالية

مبنى طيني	الزلزال/الموقع East Kazakhstan 1990/Saisan	درجة الضرر				
		1	2	3	4	5
				●		



الشقوق الكبيرة الموجودة في معظم الجدران تشير إلى ضرر من الدرجة 3

الشكل (2-81)

مبنى حجري (غشيم)	الزلازل/الموقع North peloponissos,Greece 1995/aegion	درجة الضرر				
		1	2	3	4	5
					•	



- الانهيار الهام للجدران في هذا المثال يدل على ضرر من الدرجة 4
- الإنعطابية الكبيرة للبناء ناجمة عن النوعية السيئة للملاط وعدم فعالية العناصر البيتونية.

الشكل (82-2)

مبنى بيتوني مسلح	الزلازل/الموقع Great Japan · Hanshin 1995/Kobe	درجة الضرر				
		1	2	3	4	5
				•		

- الشقوق تركزت في الأعمدة القصيرة للواجهة الخارجية.
- الحالة العامة للمبنى بأكمله غير متضررة.
- تقدر درجة الضرر بـ: 3



الشكل (83-2)

الزلزال/الموقع	درجة الضرر				
	1	2	3	4	5
مبنى إطارى من البيتون المسلح	Italy, Irpinia - Basilicata 1987/ Saint Angelo dei Lombardi				
				•	

- انهيار جدران المأ بالكامل،
- وهذا ضرر غير انشائي خطير .
- تشققات في بعض العقد،
- وهذا ضرر من الدرجة 4



الشكل (84-2)

الزلزال/الموقع	درجة الضرر				
	1	2	3	4	5
مبنى بيتونى مسلح	Great Japan, Hanshin 1995/Kobe				
					•

- انهيار الطابق الأرضي بشكل كامل
- ضرر من الدرجة 5.



الشكل (85-2)

نبين فيما يلى العوامل الرئيسة المؤثرة على الإنعطابية الزلزالية:

- التصميم المعماري (التكوين والتفاصيل)،

- النظام الإنشائي،

- الترتيبات الإنشائية،

- الصيانة والاصلاح،

- الفعل المتبادل مع الوسط المحيط،

- الفعل المتبادل بين المنشأة والموقع.

2-5-6-1- التصميم المعماري (التكوين والتفاصيل):

- أضرار ناجمة عن اهتزازات غير متزامنة لكتل مختلفة من المنشأة (الشكل 2-86).



El Asnam, Algérie 1980



San Fernando, Californie 1971

الشكل (2-86)

- أضرار ناجمة عن قتل المنشآت (الشكل 2-87).



Mexico 1985



Philippines 1976

الشكل (2-87)

- منشآت معرضة لقتل المجموعة (الشكل 2-88).



Martinique



Grèce

الشكل (88-2)

- أضرار ناجمة عن وجود الطوابق القصيرة (الشكل 89-2).



Kobé, Japon 1995



Boumerdès, Algérie 2003

الشكل (89-2)

- أضرار ناجمة عن وجود الأعمدة القصيرة (الشكل 90-2).



Chi-Chi, Taïwan 1999



El Asnam, Algérie 1980

الشكل (90-2)

2-6-5-2- الإنعطابية المرتبطة بالنظام الإنشائي (الهيكل الحامل):

- أضرار ناجمة عن تقوية غير كافية (الشكل 91-2).



San Fernando, Californie 1971



Izmit, Turquie 1999



الشكل (2-91)

- أضرار ناجمة عن انهيار وتشظي جدران الملاء المستخدمة في المباني الهيكلية (الشكل 2-92).



Boumerdès, Algérie 2003



Caracas, Venezuela 1967

الشكل (2-92)

3-6-5-2- الإنعطابية المرتبطة بالترتيبات الإنشائية:

- أضرار ناجمة عن غياب التطويق في المباني الحجرية (الشكل 2-93).



San Giuliano, Italie 2002, M = 5,7



Guadeloupe 2004, M = 6,3

الشكل (2-93)

- أضرار ناجمة عن غياب تطويق أعمدة المنشآت البيتونية المسلحة، أو نقص في التسليح العرضي وتحنيب التسليح الطولي (الشكل 2-94).



San Fernando, Californie 1971



Kobé, Japon 1995

الشكل (2-94)

- انهيار كامل للمنشآت البيتونية المسلحة نتيجة غياب تطويق الأعمدة والجدران والعقد (الشكل 2-95).



Boumerdès, Algérie 2003



Mexico 1985

الشكل (2-95)

2-5-6-4- الإنعطابية المرتبطة بالإصلاح والصيانة:

يبين الشكل (2-96) خياراً خاطئاً عند عملية الإصلاح لمبنى قائم في منطقة زلزالية بشدة عالية.



Erevan, Arménie
zone de forte sismicité

الشكل (2-96)

2-5-6-5-5- الإنعطابية المرتبطة بالفعل المتبادل مع الوسط المحيط:

- أضرار ناجمة عن ظاهرة الطرق للمباني المتجاورة بسبب عدم كفاية عرض الفاصل (الشكل 2-97).



Izmit, Turquie 1999



Kobé, Japon 1995

الشكل (2-97)

- أضرار ناجمة عن انهيار وتساقط عناصر من منشأة مجاورة (2-98).



Ceyhan-Misis, Turquie 1998

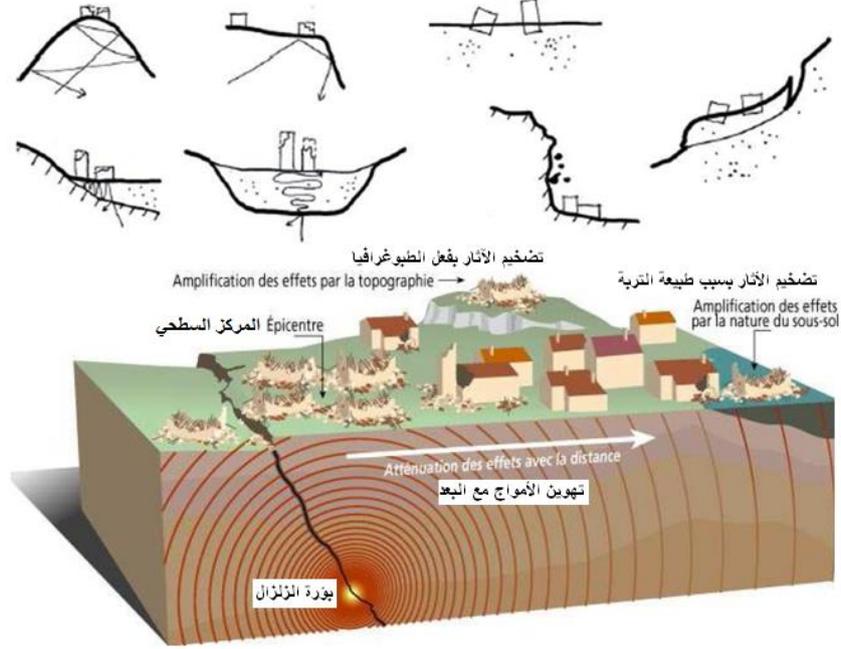


Chi-Chi, Taiwan 1999

الشكل (2-98)

2-5-6-6- الإنعطابية المرتبطة بالموقع:

يوضح الشكل (2-99) كافة الحالات التي تعمل على تضخيم الآثار الناجمة عن انتشار الأمواج الزلزالية في الموقع وتغير خواصها، والتي قد تسبب أضراراً وانهيارات غير محمودة وغير مرغوبة في المنشآت الهندسية، وسنبين لاحقاً هذه الحالات.



الشكل (99-2)

- انهيارات نتيجة نشوء ظاهرة الطنين بين المنشأة والتربة (الشكل 100-2).



Mexico 1985



Kobé, Japon 1995

الشكل (100-2)

- انهيار مبنى بسبب خضوعه لاهتزازات تم تضخيمها بسبب أو بحكم الموقع الطبوغرافي (الشكل 101-2).



الشكل (101-2)

- أضرار وانهيارات لمباني مشادة على ترب قابلة للتميع (إسالة) (الشكل 102-2).



Niigata, Japan 1964



Caracas, Venezuela 1967



Izmit, Turquie 1999

الشكل (102-2)

- احتمال خطر سقوط كتل صخرية، ومنشأة متضررة بسبب انزلاق التربة (الشكل 103-2).



Anchorage, Alaska 1964

Californie, USA 1971



Kobé, Japon 1995

الشكل (2-103)

- انهيار وتضرر المنشآت القريبة من الفوالق الزلزالية (الشكل 2-104).



Séisme de Chi-Chi, Taïwan 1999

الشكل (2-104)

2-5-7- الزلازل والدفاع المدني السوري (من مصادر الدفاع المدني في سوريا):

ما هو الزلزال:

- الزلزال ظاهرة طبيعية كثيراً ما تحدث في مختلف بقاع الأرض، ورغم أن معظمها يكون ضعيفاً لا يشعر به الإنسان إلا أن لبعضها آثاراً مدمرة لا زالت شواهدا ماثلة في قطرنا حتى اليوم.
- وتنتج الزلازل عن حركة الصخور الموجودة في القشرة الأرضية من تباعد وتقارب أو انزلاق، بالتالي تفرغ فجائي للطاقة المخزنة في باطن الأرض.
- قد تدوم الهزة الناجمة عن الزلزال بضع ثوان وقد تطول حتى بضع دقائق، وقد تعقب الهزة الرئيسية الأولى هزات ثانوية لاحقة أضعف منها (ارتدادية).

- رغم تقدم العلم في ميدان التنبؤ بالزلازل، إلا أنه من المتعذر حتى الآن، التحديد الدقيق لقوة زلزال محتمل ومكان وقوعه وزمانه، لذا كان لا بد لنا من أن نتعلم مواجهة هذا الاحتمال المائل على الدوام.

أسباب الخسائر والأضرار الناجمة عن الزلازل:

- انهيار المباني كلياً أو جزئياً.
- ردود الفعل البشرية المتهورة نتيجة الدعر.
- الحرائق المتفاقمة بسبب نقص مياه الإطفاء وصعوبة الوصول إلى مواقع الحريق.
- الأثاث المتساقط، والثريات أو الأغراض الأخرى.
- انهيار كابلات الطاقة الكهربائية.

ما يجب أن نفعله قبل وقوع الزلزال:

1. التعرف على أسباب الزلزال وآثارها.
2. ونهئ في متناول اليد:
 - مصباح يدوي يعمل بالبطارية.
 - جهاز راдио يعمل بالبطارية.
 - جهاز إطفاء يدوي (2 أو 6 كغ يعمل بالبودرة).
 - حقيبة إسعاف أولي (يضاف إلى محتوياتها الأدوية).
- (التأكد الدوري من وجود وجاهزية وصلاحية هذه الأغراض للاستخدام).
3. الاحتفاظ بكمية من الماء الصالح للشرب في وعاء بلاستيكي محكم السد (10 لترات).
4. ترتيب المكان وقطع الأثاث فيه بشكل يسمح بسهولة وحرية الحركة والتنقل، ولا تشغل الممرات بالعلب و الصناديق وسواها...
5. استكشاف أكثر الأماكن توفيراً للحماية في المنزل أو في مكان العمل وتعريف جميع الأفراد بها.
6. تثبيت الرفوف، المزهريات، أواني الزينة، وحتى الخزن بشكل جيد يحول دون انقلابها إذا ما اهتزت الأرض.
7. وضع الأغراض ذات الحجم الكبير والثقيلة على الأرض، أو على الرفوف السفلى من الخزن إذا لزم الأمر.
8. التعريف على أماكن المفاتيح الرئيسية لمصادر الطاقة المنزل، والتدريب على كيفية استعمالها في فصل التيار الكهربائي وإغلاق شبكة المياه وأسطوانة الغاز في حالات الطوارئ.

ما يجب أن نفعله أثناء الزلزال:

1. احتفظ بهدوئك وقم بتهدئة الآخرين.

2. إذا كنت في المنزل أو داخل بناء:

- ✓ لا تندفع هارباً نحو الأبواب و مخارج النجاة.
- ✓ لا تستخدم المصاعد.
- ✓ ابتعد عن النوافذ والمرايا والمداخن والثريات والرفوف المعلقة على الجدران والخزن غير المثبتة.
- ✓ وفر الحماية لنفسك: بالوقوف أو البقاء تحت عتبة باب داخلي أو في زاوية الغرفة، أو تحت طاولة متينة أو حتى سرير.

3. إذا كنت في الشارع :

- ✓ اتجه نحو أي مكان مكشوف ، ساحة مثلاً أو حديقة، بهدوء ورياطة جأش.
- ✓ لا تركض ولا تتسكع في الشوارع.
- ✓ لا تحاول العودة إلى منزلك إلى أن تنتهي الهزة.
- ✓ ابتعد عن المباني وخاصة القديم منها، والمباني العالية.
- ✓ ابتعد عن أبراج التوتر العالي وعن المنحدرات والجدران العالية المعرضة للانزلاق.

4. إذا كنت في حافلة أو تقود سيارة:

- ✓ أوقف العربة بعيداً عن المباني، والجدران والمنحدرات، والجسور، والأنفاق، وأبراج التوتر العالي، وكابلات الكهرباء.
- ✓ ابق في العربة ولا تغادرها حتى انتهاء الهزة .

ما يجب أن نفعله في الدقائق الأولى عقب الزلزال:

- اهدأ وحافظ على هدوئك وطمئن الآخرين، وتوقع حدوث هزات ثانوية لاحقة.
- افتح الراديو واتبع الإرشادات التي تبثها الجهات المعنية.
- افصل مصادر الطاقة: الماء والكهرباء واحكم إغلاق أسطوانات الغاز.
- تفقد المتواجدين معك وتأكد من سلامتهم.
- لا تدخن ولا تستعمل الولاعات ولا تشعل أعواد الثقاب فقد يكون الجو مشبعاً بالغاز القابل للانفجار.
- لا تستخدم المفاتيح و المآخذ الكهربائية لنفس السبب وتحسباً من وجود ماس كهربائي.
- استخدام البطاريات الجافة (البيل) في الإنارة.

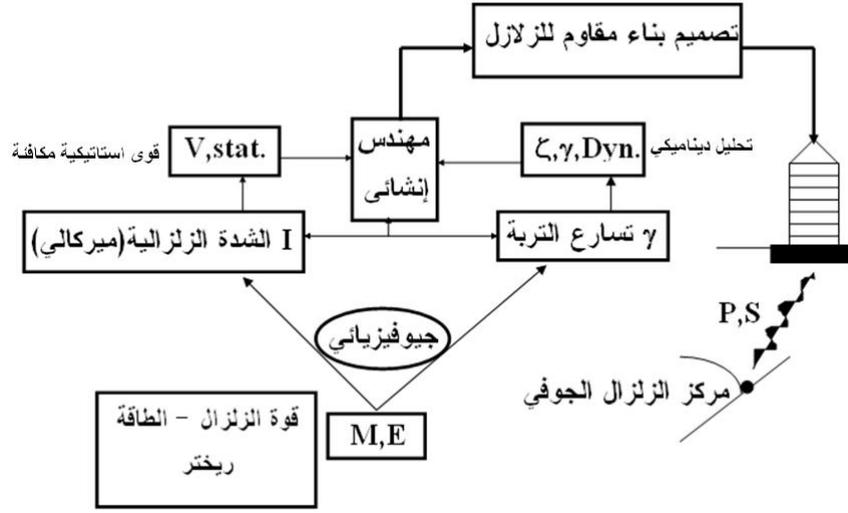
- لا تتنقل عاري القدمين، والبس حذاء واحم رأسك ووجهك بمعطف عند اللزوم أو حرام، أو خوذة أو أي غرض صلب. واستحضر ثياباً تبعث الدفء إذا كان الطقس يتطلب ذلك.
- نظف المواد المنسكبة القابلة للاشتعال فوراً كالكحول و المواد البترولية و الدهان وسواها.
- أخمد بدايات الحريق فوراً، وإذا كان الحريق كبيراً اتصل بفوج الإطفاء قبل التعامل معه.
- لا تحرك المصابين بإصابات بليغة ما لم تكن حياتهم مهددة بخطر داهم.
- أطلق الحيوانات الأليفة فهي ستدبر أمرها بنفسها.
- إذا كنت في العراء أو في السيارة، ابتعد عن شاطئ البحر و ضفاف البحيرات و الأنهار فقد تضرب الشاطئ أمواج المد الناجمة عن الزلزال، وقد تنهار ضفاف الأنهار.

ما يجب أن نفعله خلال الساعات اللاحقة للزلزال:

- اتبع التعليمات التي تبثها الإذاعة و نفذ إرشاداتها بدقة.
- كن جاهزاً للتعامل مع مزيد من الهزات الثانوية اللاحقة.
- اعلم فرق الإنقاذ عن الأشخاص الذين تعرف أنهم محصورون أو مدفونون تحت الأنقاض.
- لا تصخب و لا تباليغ في وصف حالك أو حال الآخرين و المصابين.
- لا تقترب من الأماكن التي توجد فيها أسلاك كهربائية متدلية، ولا تلمس أي جسم معدني على تماس بها.
- لا تشرب الماء من الأوعية أو الحاويات المكشوفة قبل فحصها و تصفيتها (ترشيحها) باستخدام مصفاة مناسبة أو مرشحة أو أي قطعة قماش عادية.
- تناول شيئاً من الطعام فإن ذلك سيحسن من وضعك و ستكون أكثر قدرة على مساعدة الآخرين.
- في حال تعرض منزلك لأضرار جسيمة قد يكون لزاماً عليك مغادرته : اصطحب معك أوعية الماء و المواد الغذائية و الأدوية العادية و الخاصة (لمرضى القلب و السكري) و الوثائق الشخصية.
- لا تعاود دخول المباني المتصدعة و لا تقترب من المنشآت المصابة بأضرار.
- لا تتسكع في الشوارع لمشاهدة ما قد حصل و ابتعد عنها، لتتمكن آليات الإنقاذ من العبور.

8-5-2- العلاقة بين علم الزلازل والهندسة الزلزالية:

يبين المخطط التالي (الشكل 2-105) العلاقة بين علم الزلازل الذي يعنى به الجيوفيزيائي، و علم الهندسة الزلزالية المعنى من قبل المعماري والمهندس الإنشائي. وبالتالي يجب التعمق بهذين الاختصاصين من أجل تأمين نظام حماية فعال إزاء الأفعال الزلزالية يتمثل بتصميم المباني والمنشآت المقاومة للزلازل.



الشكل (2-105): رسم توضيحي للعلاقة بين علم الزلازل والهندسة الزلزالية

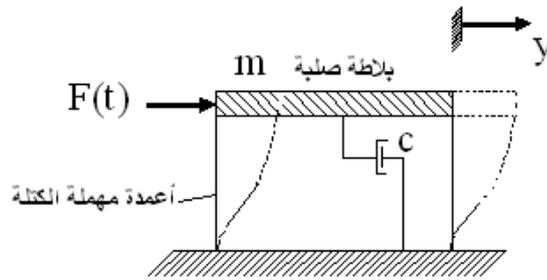
6-2- المنشآت المنمذجة كنظم وحيدة درجة الحرية

6-2-1- مقدمة:

بشكل عام، إن تحليل وتصميم الأبنية والمنشآت الأخرى لمقاومة الآثار الناتجة عن الزلازل يتطلب استخدام مفاهيم مثالية للمعالجة والقيام ببعض التبسيطات التي تمكننا من تمثيل النظام الفيزيائي بنظام آخر يعرف بالنموذج الرياضي.

من حيث المبدأ، المنشآت التي تبدو كنظم مستمرة لها عدد غير متناه من درجات الحرية، ولكن عملية وضع النموذج المثالي تسمح لنا بتخفيض عدد درجات الحرية إلى عدد مميز (قليل)، وفي بعض الحالات إلى درجة حرية واحدة فقط. يبين الشكل (2-106) مبنى بطابق واحد يمكن نمذجته مع درجة حرية واحدة، والنموذج الممثل في هذا الشكل يحتوي على العناصر التالية:

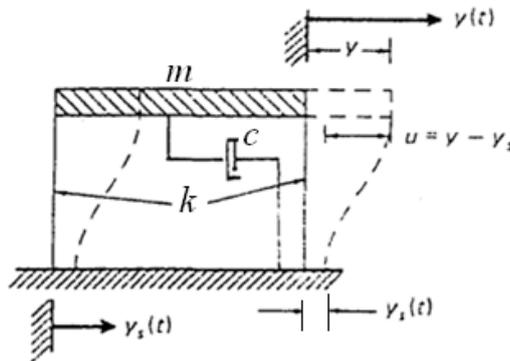
1. الكتلة المركزة m .
 2. الصلابة الجانبية المعرفة بالعامل k .
 3. التخامد في النظام الممثل بالعامل c .
 4. القوة الخارجية كتابع للزمن $F(t)$.
- يشار للاستجابة بالانتقال الجانبي للكتلة بـ $y(t)$.



الشكل (106-2) نموذج رياضي لمنشأة بطابق واحد محرضة بقوة خارجية

يتم تحريض النموذج الإنشائي الموضح في الشكل (107-2) بالتسارع الأفقي $\ddot{y}_s(t)$ عند قاعدته، ويعبر عن الاستجابة في هذه الحالة بالانتقال النسبي $u(t)$ بين انتقال الكتلة $y(t)$ وانتقال القاعدة $y_s(t)$:

$$u(t) = y(t) - y_s(t) \quad (1-2)$$

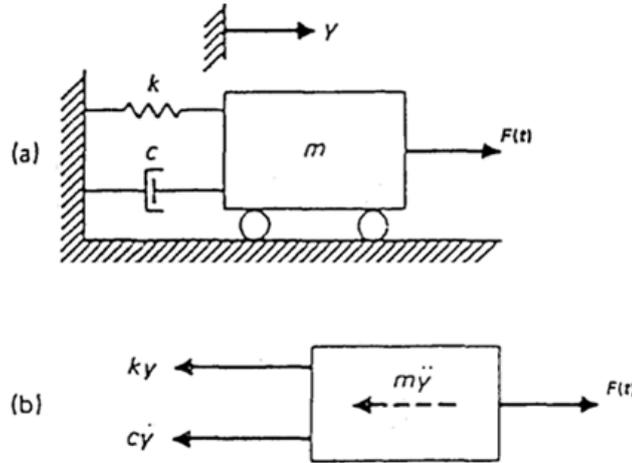


الشكل (107-2) نموذج رياضي لمنشأة بطابق واحد محرضة عند القاعدة

2-6-2- نظام ذو درجة حرية واحدة :

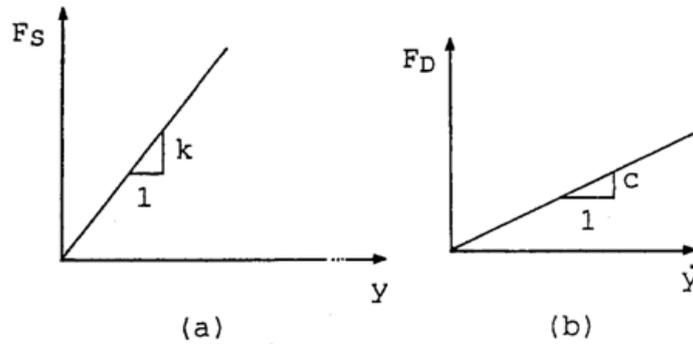
يمكن أن يوصف النظام ذو درجة الحرية الواحدة (المنشأة المبينة في الشكل 2-106)، بهزاز بسيط (الشكل 2-108) مؤلف من العناصر التالية:

1. عنصر الكتلة m ، يمثل خواص العطالة والكتلة للمنشأة.
2. عنصر النابض k ، يمثل قوى الإرجاع المرنة والطاقة الكامنة للمنشأة.
3. عنصر التخماد c ، يعبر عن خصائص الاحتكاك وفقدان الطاقة في المنشأة.
4. قوة التحريض كتابع للزمن $F(t)$ ، وهي القوى الخارجية المؤثرة على المنشأة.



الشكل (108-2): (a) هزاز بسيط محرض بقوة خارجية، (b) مخطط الجسم الحر

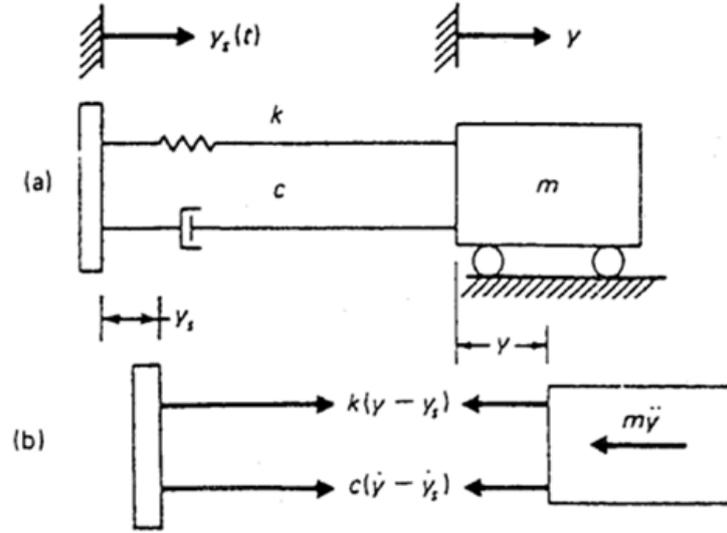
باعتقاد النموذج الموضح في الشكل (108-2)، وبافتراض أن النظام خطي تكون العلاقة (قوة - انتقال) لقوة الإرجاع في النابض F_s ، والعلاقة (قوة - سرعة) لقوة المخمد F_D ، على شكل توابع خطية للانتقال y وللسرعة \dot{y} على الترتيب، كما هو مبين في الشكل (109-2).



الشكل (109-2): (a) العلاقة الخطية (قوة-انتقال) في النابض

(b) العلاقة الخطية بين قوة التخميد والسرعة في المخمد

وبشكل مماثل، يمكن أن يستخدم أيضاً الهزاز البسيط لتمثيل منشأة محرضة عن طريق حركة ما عند قاعدتها. يوضح الشكل (110-2) هزاز محرض عند قاعدته عبر تابع انتقال $y_s(t)$ ، وكذلك استجابته المحددة بالانتقال النسبي للكتلة $u(t)$.



الشكل (2-110): (a) هزاز بسيط محرض عند قاعدته، (b) مخطط الجسم الحر

إن معادلات الحركة من أجل نظام بدرجة حرية واحدة الممثل بهزاز بسيط (الشكل 2-108 أو 2-110) يمكن الحصول عليها بتطبيق قانون نيوتن وذلك بشكل مبسط عبر مساواة الصفر بمجموع القوى بما فيها قوة العطالة $m\ddot{y}$ ، وبما يتوافق مع مخطط الجسم الحر المبين في الأشكال المذكورة أعلاه. من الشكل (2-108) يمكن أن نكتب:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t) \quad (2-2)$$

ومن الشكل (2-110)، نكتب معادلة توازن القوى:

$$m\ddot{y} + c(\dot{y} - \dot{y}_s) + k(y - y_s) = 0 \quad (3-2)$$

وبالتبديل في المعادلة (2-2) حيث: $u = y - y_s$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_{eff}(t) \quad (4-2)$$

حيث: $F_{eff}(t) = -m\ddot{y}_s(t)$ قوى التحريض الفعالة.

من الواضح أن المعادلتين (2-2) و(4-2) متكافئتان رياضياً.

المعادلة (2-2) تعطي استجابة النظام تحت تأثير قوة خارجية $F(t)$ وذلك من خلال القيمة المطلقة للانتقال $y(t)$ ، بينما المعادلة (4-2) تعطي الاستجابة من خلال الانتقال النسبي بين الكتلة والقاعدة $u(t)$ ، حيث إن التحريض ناتج عن حركة مطبقة في قاعدة النظام.

2-6-3- الاهتزاز الحر (Free Vibration):

نعرض في هذه الفقرة حل المعادلة التفاضلية للحركة في حالة الاهتزاز الحر، حيث إنه في هذه الحالة تهتز المنشأة بحرية تحت تأثير الشروط الأولية من دون محرضات خارجية مطبقة على النظام. وسندرس كلاً من الاهتزازات الحرة غير المتخامدة والاهتزازات الحرة المتخامدة.

2-3-6-1- الاهتزاز الحر غير المتخامد (Undamped Free Vibration):

المعادلة التفاضلية:

$$m\ddot{y} + ky = 0 \quad (5-2)$$

الحل:

$$y = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t \quad (6-2)$$

حيث إن : $\omega = \sqrt{k/m}$ التواتر الطبيعي الدوراني (النبض) مقدراً ب rad/sec ، وكذلك C_1, C_2 ثوابت التكامل تحدد اعتماداً على معرفة الشروط الأولية، مثال: الانتقال الأولي y_0 والسرعة الأولية v_0 في الزمن $t = 0$. بتعويض الشروط الأولية في المعادلة (6-2):

$$y = y_0 \cos \omega t + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t \quad (7-2)$$

والتي يمكن أن تكتب بشكل آخر:

$$y = C \sin(\omega t + \alpha) \quad (8-2)$$

أو:

$$y = C \cos(\omega t - \beta) \quad (9-2)$$

حيث إن :

$$C = \sqrt{y_0^2 + (v_0/\omega)^2} \quad (10-2)$$

(سعة الحركة)

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{y_0}{v_0/\omega}, \quad \beta = \tan^{-1} \frac{v_0/\omega}{y_0} \quad (11-2)$$

(الطور)

2-3-6-2- الاهتزاز الحر المتخامد (الشكل 2-111):

(Damped Free Vibration)

المعادلة التفاضلية:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = 0 \quad (12-2)$$

الحل:

$$y = e^{-\xi\omega t} [C_1 \cos \omega_D t + C_2 \sin \omega_D t] \quad (13-2)$$

والشكل الآخر (البديل):

$$y = C e^{-\xi\omega t} \cos(\omega_D t - \alpha) \quad (14-2)$$

حيث :

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad (15-2)$$

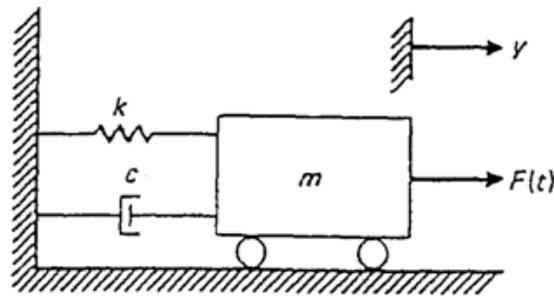
$$c_{cr} = 2\sqrt{km} \quad (16-2)$$

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (17-2)$$

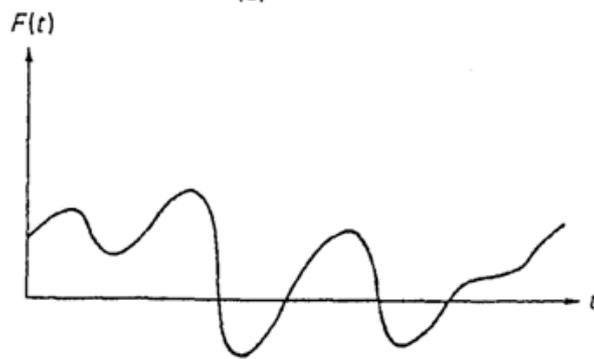
يتم تقويم ثوابت التكامل C & α من الشروط الأولية، على النحو التالي:

$$C = \sqrt{y_0^2 + \left(\frac{v_0 + y_0 \xi \omega}{\omega_D}\right)^2} \quad (18-2)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{v_0 + y_0 \xi \omega}{\omega_D y_0}\right) \quad (19-2)$$



(a)



(b)

الشكل (111-2): هزاز محرض بقوة خارجية $F(t)$

(a) النموذج الرياضي، (b) تابع الحمولة

وبشكل آخر، إن ثوابت التكامل في المعادلة (2-13) يمكن تحديدها من الشروط الأولية وإدخالها في نفس المعادلة، لتصبح:

$$y(t) = e^{-\xi\omega t} \left(y_0 \cos \omega_D t + \frac{v_0 + y_0 \xi \omega}{\omega_D} \sin \omega_D t \right) \quad (20-2)$$

يهتز النظام الإنشائي بحركة نواسية عندما يحدث اضطراب أولي وذلك إذا كانت قيمة عامل تخامده أقل من قيمة التخماد الحرج $c_{cr} = 2\sqrt{km}$ ، حيث إن نسبة التخماد: $\xi = \frac{c}{c_{cr}} < 1$.

بشكل عام إن المنشآت تملك قيمة نسبة تخامد أقل بشكل واضح من القيمة المحددة $\xi = 1$. اعتماداً على المادة المستعملة وطريقة الإنشاء لأية منشأة فإن قيمة نسبة التخماد في النظام الإنشائي يتراوح بين (20-2) % من التخماد الحرج.

يبين الجدول (2-14) موجزاً عن القيم التي ينصح باستخدامها في تحديد التخماد، من أجل أنواع مختلفة من المنشآت ومستويات مختلفة للإجهادات.

النسبة المئوية للتخماد	نوع وظروف المنشأة	مستوي الإجهاد (إجهاد التشغيل)
1-2	الأنابيب الرئيسية	أصغر من نصف نقطة الخضوع أو تساويه
2-3	الفولاذ الملحوم، البيتون مسبق الاجهاد، البيتون المسلح (تشققات سطحية)	
3-5	البيتون المسلح (تشققات هامة)	
5-7	منشآت خشبية أو فولاذية (براشيم أو براغي) مع وصلات ذات براغي أو مسامير	
2-3	الأنابيب الرئيسية	تماماً تحت نقطة الخضوع
5-7	فولاذ ملحوم، بيتون مسبق الاجهاد (دون ضياع كامل للإجهاد المسبق)	
7-10	المسبق الاجهاد (بدون اجهاد متبقي)	
7-10	البيتون المسلح	
10-15	منشآت خشبية أو فولاذية (براشيم أو براغي) مع وصلات ذات براغي أو مسامير	
15-20	المنشأ الخشبي مع وصلات مسامير	

الجدول (14-2): قيم التخامد التي ينصح بها من قبل Newmark and Hall (1973)

4-6-2- الاستجابة باستخدام التكامل المباشر:

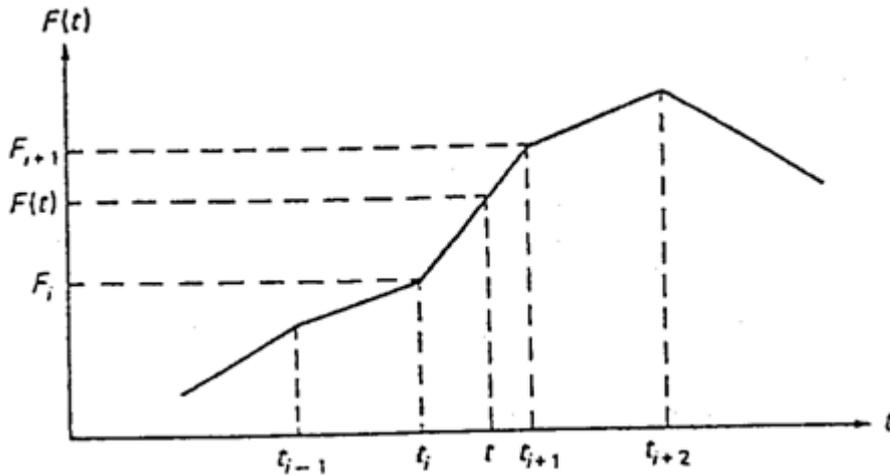
(Response by Direct Integration)

يمكن حل المعادلات التفاضلية للحركة لمنشأة ما من نمذجة كهزاز بسيط لبعض توابع التحريض البسيطة، ومن أجل توابع التحريض العامة (المعقدة)، من الضروري اللجوء إلى الطرائق العددية في التكامل، وغالباً ما تتطلب هذه الطرائق العددية استخدام تبسيطات لإيجاد الحل.

إن طريقة حل المعادلات التفاضلية للحركة المعروضة في هذه الفقرة هي دقيقة من أجل تابع تحريض موصف بأجزاء خطية بين النقاط المعرفة لتابع التحريض (قطع مستقيمة). إن تابع التحريض محسوب في فترات زمنية متساوية Δt مع توليد خطي بين النقاط المحددة للتحريض، وهكذا فإن الفترة الزمنية للتحريض، المتضمنة امتداد ما للوقت بعد توقيف التحريض (امتداد مرغوب)، تقسم إلى N مجال زمني متساوي. لكل مجال Δt ، تحسب الاستجابة باعتبار الشروط الأولية في بداية الوقت لتلك المجال الزمني وكذلك التحريض الخطي ضمن هذا المجال، وفي هذه الحالة فإن الشروط الأولية هي الانتقال والسرعة عند نهاية المجال الزمني السابق.

عندما يكون تابع التحريض $F(t)$ منكسر كما في الشكل (2-112)، يمكن التعبير عنه كما يلي:

$$F(t) = \left(1 - \frac{t-t_1}{\Delta t}\right)F_i + \left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right)F_{i+1} \quad t_i \leq t \leq t_{i+1} \quad (21-2)$$



الشكل (2-112): تابع التحريض الخطي المنكسر (قطع مستقيمة)

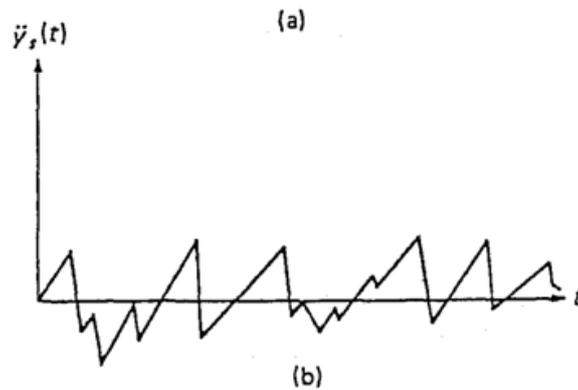
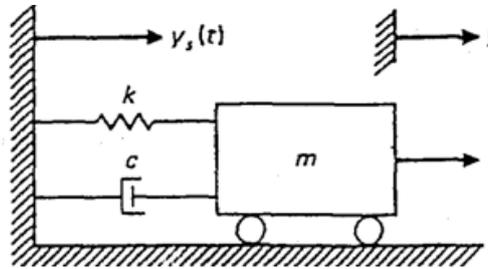
في أي جزء $t_i = i \cdot \Delta t$ وذلك من أجل مجالات متساوية للفترة Δt ، من أجل $i = 1, 2, 3, \dots, N-1$. بالتالي يمكن كتابة المعادلة العامة لحركة النظام الميّن في الشكل (2-113)، بالاعتماد على المعادلة (4-2)، على النحو التالي:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = \left(1 - \frac{t-t_1}{\Delta t}\right)F_i + \left(\frac{t-t_i}{\Delta t}\right)F_{i+1} \quad t_i \leq t \leq t_{i+1} \quad (22-2)$$

حيث: F_i هي القوة الفعالة $-m\ddot{y}_s(t_i)$ ، المقيمة عند الزمن t_i . إن حل هذه المعادلة بدلالة الانتقالات والسرعة يعطى

$$u = e^{-\xi\omega(t-t_i)} \left[C_i \cos \omega_D(t-t_i) + D_i \sin \omega_D(t-t_i) \right] + B_i + A_i(t-t_i) \quad (23-2)$$

$$\dot{u} = e^{-\xi\omega(t-t_i)} \left[(\omega_D D_i - \xi\omega C_i) \cos \omega_D(t-t_i) - (\omega_D C_i + \xi\omega D_i) \sin \omega_D(t-t_i) \right] + A_i \quad (24-2)$$



الشكل (2-113): هزاز محرض بحركة مسند ذو تسارع $\ddot{y}_s(t)$

حيث:

$$\omega_D = \omega\sqrt{1-\xi^2}, \quad \xi = c/c_{cr}, \quad \omega = \sqrt{k/m}, \quad c_{cr} = 2\sqrt{km}$$

والثوابت A_i, B_i, C_i, D_i هي ثوابت التكامل .

$$A_i = \frac{F_{i+1} - F_i}{k\Delta t} \quad (25-2)$$

$$B_i = \frac{F_i - cA_i}{k} \quad (26-2)$$

بمعرفة الانتقالات u_i والسرعة \dot{u}_i في بداية المجال i ، يمكن حساب C_i, D_i بعد تبديل $t = t_i$ في المعادلتين (2-2) و (23-2):

$$C_i = u_i - B_i \quad (27-2)$$

$$D_i = \frac{\dot{u}_i - A_i + \xi \omega C_i}{\omega_D} \quad (28-2)$$

إن تقويم المعادلتين (23-2) و (24-2) عند الزمن $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ يعطي الانتقالات والسرعة في الزمن t_{i+1} :

$$u_{i+1} = e^{-\xi \omega_D \Delta t} [c_i \cos \omega_D \Delta t + D_i \sin \omega_D \Delta t] + B_i + A_i \Delta t \quad (29-2)$$

$$\dot{u}_{i+1} = e^{-\xi \omega_D \Delta t} [D_i (\omega_D \cos \omega_D \Delta t - \xi \omega \sin \omega_D \Delta t) - C_i (\xi \omega \cos \omega_D \Delta t + \omega_D \sin \omega_D \Delta t)] + A_i \quad (30-2)$$

وأخيراً، التسارع في الزمن $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ يمكن أن يحسب مباشرة بعد تبديل u_{i+1} و \dot{u}_{i+1} من المعادلتين (29-2) و (30-2) في المعادلة التفاضلية (22-2)، مع $t = t_i + \Delta t$:

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{m} (F_{i+1} - c\dot{u}_{i+1} - ku_{i+1}) \quad (31-2)$$

2-6-5- الاستجابة باستخدام تكامل ديوهامل:

(Response by Duhamel's Integral)

يمكن الحصول على الاستجابة الزلزالية للمنشآت المنمذجة كنظم بدرجة حرية وحيدة، مباشرة عن طريق تكامل ديوهامل.

يبين الشكل (2-114) هزازاً بسيطاً كتلته m محرض بتابع تسارع $\ddot{y}_s(\tau)$ عند قاعدته.

تعطى المعادلة التفاضلية لحركة هذا الهزاز البسيط بدلالة الانتقالات النسبية، $u = y - y_s$ ، كما يلي:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_{eff}(\tau) \quad (32-2)$$

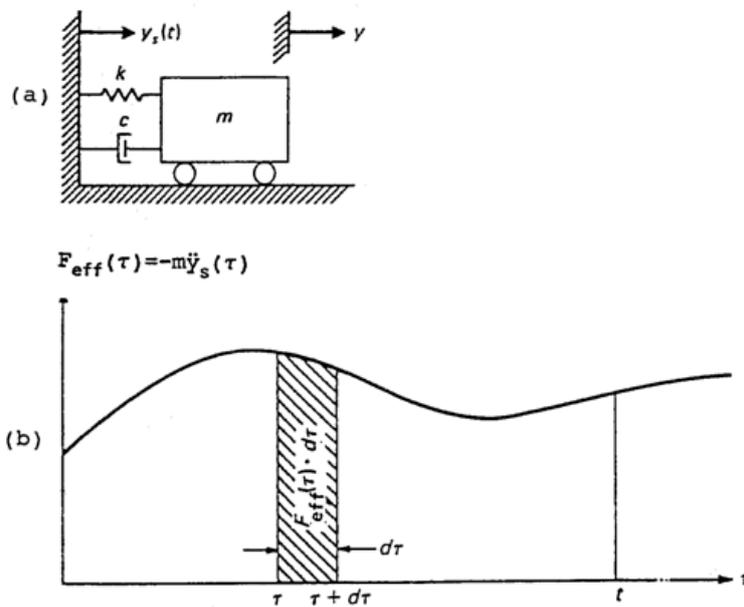
تكون القوة المؤثرة على هذا الهزاز $F_{eff} = -m\ddot{y}_s(\tau)$. تولد القوة النبضية $F_{eff}(\tau)d\tau$ عند الزمن τ المطبقة على

كتلة الهزاز تغير في السرعة dv ، وهذا التغير يمكن تحديده من قانون نيوتن للحركة: $m \frac{dv}{d\tau} = F_{eff}(\tau)$ ، بالتالي:

$$dv = \frac{F_{eff} d\tau}{m} \quad (33-2)$$

ويمكن اعتبار التغير في السرعة dv كأنه سرعة أولية للكتلة في الزمن τ ، بالتالي يمكن إدخاله في المعادلة (2-20)، كسرعة أولية v_0 مع الانتقالات الأولية $u_0 = 0$ عند الزمن τ ناتجاً تغير انتقال $du(t)$ ، في زمن لاحق t ، يعطى كما يلي:

$$du(t) = e^{-\omega(t-\tau)} \frac{F_{eff}(\tau)d\tau}{m\omega_D} \sin \omega_D(t-\tau) \quad (34-2)$$



الشكل (2-114): هزاز محرض عند مسنده

(a) النموذج الرياضي (b) التحريض كقوة مؤثرة $F_{eff} = -m\ddot{y}_s(\tau)$

يمكن النظر إلى تابع التحريض $F_{eff}(\tau)$ كسلسلة من النبضات القصيرة في أوقات متتالية ومتزايدة $d\tau$. ويحدد الانتقال الكلي $u(t)$ عند الزمن t ، الناجم عن الفعل المستمر للقوة المؤثرة $F_{eff}(\tau)$ ، كنتاج جمع أو تكامل الانتقالات التفاضلية من اللحظة τ إلى اللحظة t ، وهذا ما يعرف بتكامل ديوهامل:

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t F_{eff}(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (35-2)$$

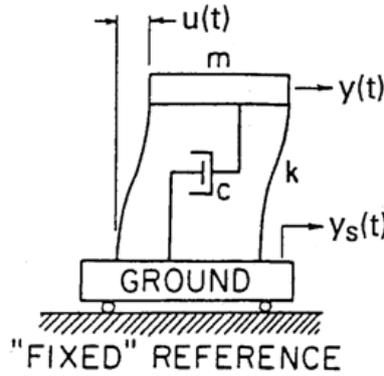
أخيراً، نشير إلى أن توابع التحريض الخاصة بالحركة الزلزالية هي توابع معرفة من خلال معطيات مسجلة تجريبياً، ويجب تقييم الاستجابة بالطريقة العددية.

7-2- أطياف الاستجابة وأطياف التصميم

يعتبر التحليل باستخدام أطياف الاستجابة إحدى طرائق التحليل الديناميكي الأكثر استخداماً ومعاصرة عند دراسة الأبنية الخاضعة لحمولات زلزالية، ومن الأسباب الرئيسة للانتشار الواسع في استخدام هذه الطريقة: بساطتها النسبية، محافظتها المتأصلة، وإمكانية تطبيقها في التحليل المرن للأنظمة المعقدة.

2-7-1- الكينونة الطيفية (Spectral Entities):

لقد بينا سابقاً أنه بالإمكان الحصول على استجابة نظام ذو درجة حرية واحدة (SDOF)، خاضع لتابع تحريض عام، من خلال تطبيق تكامل ديوهاميل .



إحداثيات مرجعية لنظام SDOF نموذجي

يمكن كتابة معادلة الحركة للكتلة كما يلي:

$$\ddot{u} + 2\omega\xi\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{y}_s(t) \quad (36-2)$$

حيث:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{: التواتر الطبيعي الدوراني غير المتخامد للنظام.}$$

$$\xi = \frac{c}{2m\omega} \quad \text{: نسبة التخماد.}$$

إذا بدأ النظام من وضعية الراحة ($\dot{u}_0 = u_0 = 0$) ، يمكن أن نحدد الاستجابة من تكامل ديوهامل:

$$u(t) = \frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{y}_s e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (37-2)$$

حيث : $\omega_D = \omega\sqrt{1-\xi^2}$ هو التواتر الطبيعي المتخامد ، و $F_{eff} = -m\ddot{y}_s$ هي القوة المؤثرة.

يمكن الحصول على تعابير مشابهة من أجل السرعة والتسارع باستخدام القاعدة التفاضلية التالية:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^t f(\tau, t) d\tau \right] = \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} f(\tau, t) d\tau + [f(\tau, t)]_{\tau=t} \quad (38-2)$$

إن التعابير النهائية للسرعة النسبية والتسارع المطلق هي:

$$\begin{aligned} \dot{u}(t) = & - \int_0^t \ddot{y}_s(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos \omega_D(t-\tau) d\tau \\ & + \int_0^t \frac{\ddot{y}_s(\tau) \xi}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \end{aligned} \quad (39-2)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) = & 2\xi\omega \int_0^t \ddot{y}_s(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos \omega_D(t-\tau) d\tau \\ & + \int_0^t \frac{\ddot{y}_s(\tau) \omega(1-2\xi^2)}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \end{aligned} \quad (40-2)$$

يجب ملاحظة أن المعادلتين (37-2) و (39-2) تعطيان على التوالي الانتقال النسبي والسرعة النسبية للكتلة بالنسبة للأساس، بينما تعطي المعادلة (40-2) التسارع المطلق للكتلة. إن هذه الكميات الثلاثة: التسارع المطلق الانتقال النسبي والسرعة النسبية كميات مهمة.

إن قوى العطالة متناسبة مع التسارع المطلق وفقاً لقانون نيوتن الثاني. وإن القوى في عنصر ما متناسبة مع الانتقالات النسبية للعنصر، من قانون هوك. وإن قوى التخامد متناسبة بشكل مباشر مع السرعة النسبية، من أجل النظم المتخامدة اللزجة.

إن نسبة التخامد ξ للنظم الإنشائية صغيرة عادة ($\xi \ll 1$)، وبناءً على ذلك يكون لدينا:

$$\omega_D \approx \omega \quad \text{و} \quad 1 - \zeta^2 \approx 1, \quad \sqrt{1 - 2\xi^2} \approx 1$$

في هذه الحالة، الجزء الثاني من المعادلة (39-2) والجزء الأول من المعادلة (40-2) متناسبان مباشرة مع نسبة التخامد ξ ، بالتالي يكونان صغيرين ويمكن إهمالهما.

ونتيجة لذلك، مع التخامد الصغير كفرضية للتبسيط فقط، يمكن كتابة المعادلات (39-2) و (40-2) على الشكل التالي:

$$\dot{u}(t) = - \int_0^t \ddot{y}_s(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (41-2)$$

$$\ddot{y}(t) = + \omega \int_0^t \ddot{y}_s(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (42-2)$$

بالنظر للمعادلتين (37-2) و(42-2) نجد أنه في حال عدم وجود تخامد، يكون التسارع المطلق $\ddot{z}(t)$ مساوياً لـ $-\omega^2 u(t)$ ، وتكون القيمة المطلقة لهذا المقدار مساوية لـ $|\omega^2 u(t)|$ وهو تقريب جيد للتسارع المطلق عندما يكون التخامد صغيراً، ويدعى هذا بالتسارع الزائف (Pseudo-acceleration). وإذا احتوت المعادلة (41-2) على تعبير الجيب بدلاً من التجيب $\cos \omega_d(t - \tau)$ ، وباستدلال مشابه حول السرعة يمكن أن نحدد السرعة النسبية الزائفة بالعلاقة $|\omega u(t)|$ (Relative Pseudo-velocity).

تعرف القيم المطلقة للاستجابات العظمى بالقيم الطيفية، وذلك على النحو التالي:

$$\begin{aligned} S_D &= |u(t)|_{\max} && \text{الانتقال الطيفي (الانتقال النسبي الأعظمي)} \\ S_V &= |\dot{u}(t)|_{\max} && \text{السرعة الطيفية (السرعة النسبية الأعظمية)} \\ S_A &= |\ddot{y}(t)|_{\max} && \text{التسارع الطيفي (التسارع المطلق الأعظمي)} \end{aligned}$$

ولتسهيل الأمر، يتم تمثيل كل من التسارع الطيفي S_A والسرعة الطيفية S_V ، بنظائرها: التسارع الزائف S_{PA} والسرعة الزائفة S_{PV} ، وفق النحو التالي:

$$- \text{السرعة الطيفية الزائفة } S_{PV}:$$

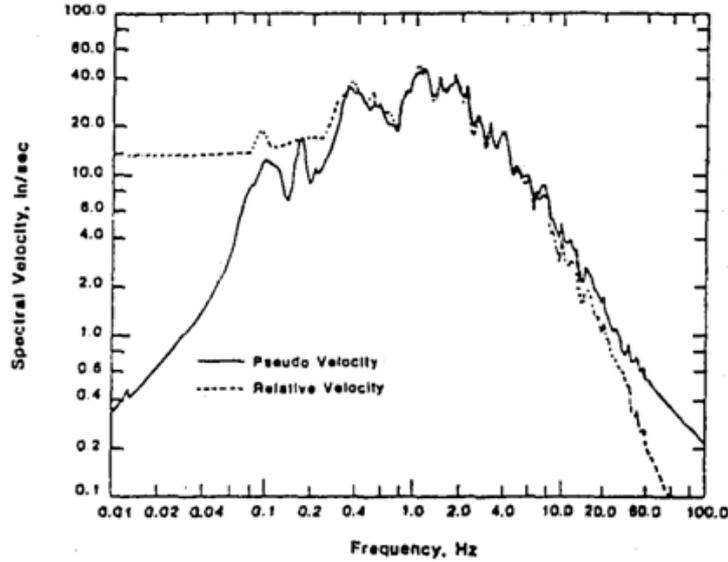
$$S_{PV} = \omega S_D = \frac{2\pi}{T} S_D \quad (43-2)$$

$$- \text{التسارع الطيفي الزائف } S_{PA}:$$

$$S_{PA} = \omega S_{PV} = \omega^2 S_D = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 S_D \quad (44-2)$$

من خلال ما تقدم، يمكن أن نلاحظ بأن التسارع الطيفي الزائف S_{PA} هو تقريب جيد للتسارع الطيفي S_A ، لكن السرعة الطيفية الزائفة S_{PV} ليست تقريباً دقيقاً للسرعة الطيفية S_V ، ولكن في كل الأحوال ومن أجل قيم صغيرة للتخامد، عادة ما تكون S_{PV} مقبولة كتقريب لـ S_V .

يبين الشكل (2-115) مقارنة بين التابعين الطيفيين لزلزال نموذجي (السرعة الطيفية)، حيث يمكن أن نلاحظ وجود فارق كبير بين التابعين عند التواترات المنخفضة (أدوار كبيرة)، حصول خطأ كبير عند استخدام S_{PV} بدلاً من S_V .

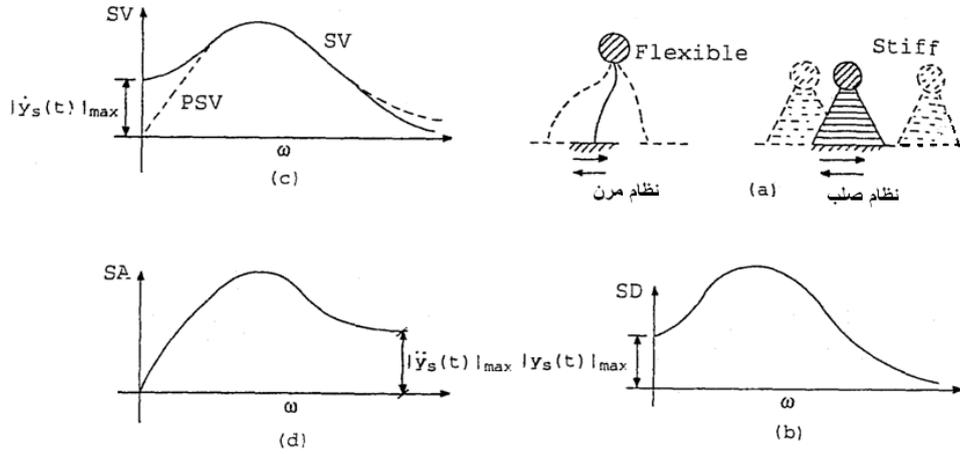


الشكل (2-115): مقارنة بين S_{PV} و S_V لزلزال نموذجي

تبين القراءة الدقيقة للتوابع الطيفية من أجل القيم القصوى للتواتر، ما يلي:

- من أجل القيم المنخفضة للتواتر، بمعنى $\omega \rightarrow 0$ (or $T \rightarrow \infty$)، يكون النظام مرناً جداً وتبقى الكتلة ساكنة، بينما تهتز القاعدة كما هو موضح في الشكل (2-116-a)، ولذلك فالانتقال النسبي الأقصى أو الانتقال الطيفي S_D سيساوي الحد الأقصى للانتقال الأرضي المطلق $|y_s(t)|_{\max}$. وأيضاً إن السرعة النسبية القصوى أو السرعة الطيفية S_V ستصل إلى الحد الأعظمي للسرعة الأرضية $|\dot{y}_s(t)|_{\max}$ على أية حال، إن السرعة الطيفية الزائفة S_{PV} تتناسب مع ω وستساوي الصفر وليس $|\dot{y}_s(t)|_{\max}$ كما هو موضح في الشكل (2-116-c). من ناحية أخرى فإن التسارع المطلق الأعظمي S_A لهذه الكتلة الساكنة عملياً سيكون صفراً. ونظراً لتناسب التسارع الزائف مع ω^2 فإنه سيكون معدوماً مع $\omega = 0$ كما هو موضح في الشكل (2-116-d). لذا في الحالة المحددة عندما $\omega \rightarrow 0$ فالتسارع الطيفي الزائف والتسارع الطيفي يتجهان لنفس القيمة المحددة.

- عندما يكون تواتر النظام كبيراً $\omega \rightarrow \infty$ (or $T \rightarrow 0$)، فهذا يعني أن النظام صلب جداً ويميل للتحرك مع الأرض كما هو مخطط في الشكل (2-116-a). إن الانتقال النسبي S_D والسرعة النسبية S_V تتجهان نحو الصفر، وأيضاً تميل السرعة الطيفية الزائفة S_{PV} نحو الصفر كنتيجة لتناسبها مع S_D . في هذه الحالة عندما $\omega \rightarrow \infty$ ، التسارع الطيفي و التسارع الطيفي الزائف يصلان لحد التسارع الأرضي الأعظمي $|\ddot{y}_s(t)|_{\max}$ كما هو مشار إليه في الشكل (2-116-d).



الشكل (2-116): الحالات المحددة للكينونة الطيفية

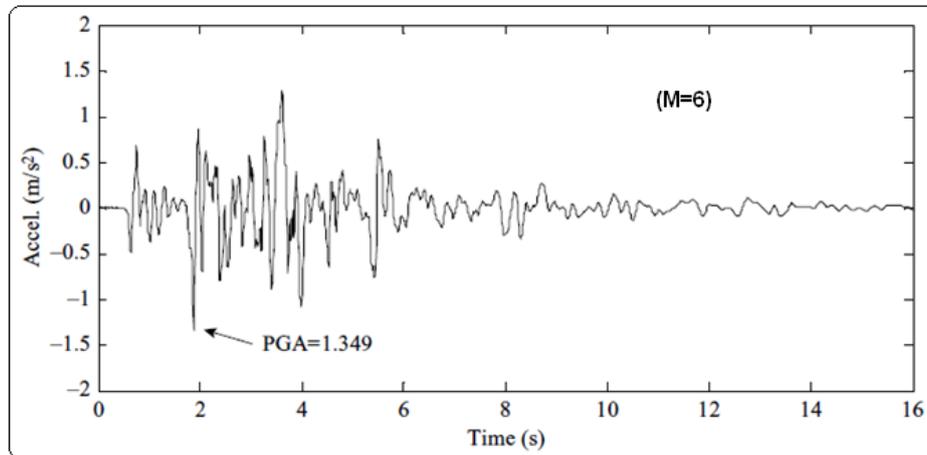
أخيراً، يجب الإشارة إلى أن المعنى الحرفي "اللغوي" للبادئة 'pseudo' هو "زائف" ، وإن استخدام هذا المعنى الحرفي ليس ملائماً كوننا نتعامل مع التعابير والعلاقات الطيفية التقريبية، بمعنى إننا نتعامل مع التقريبات أكثر من المفاهيم، وهكذا يشعر الفرد بأن استخدامه للمعنى الحرفي هو تضليل للإحساس، بالتالي يمكن أن يشار لاحقاً بكلمة تقريبي بدلاً من زائف، مثلاً:

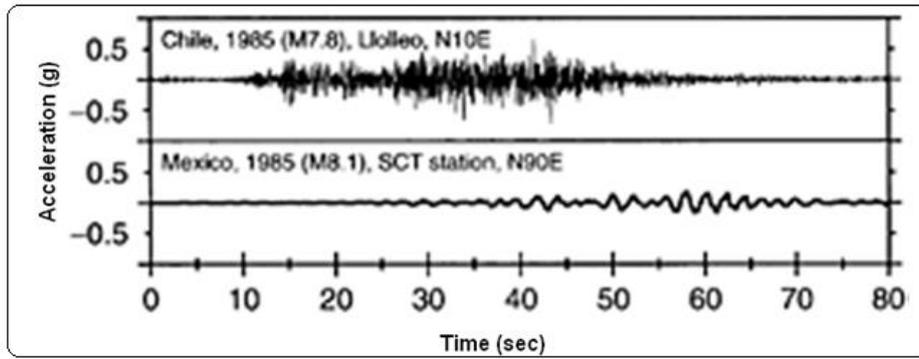
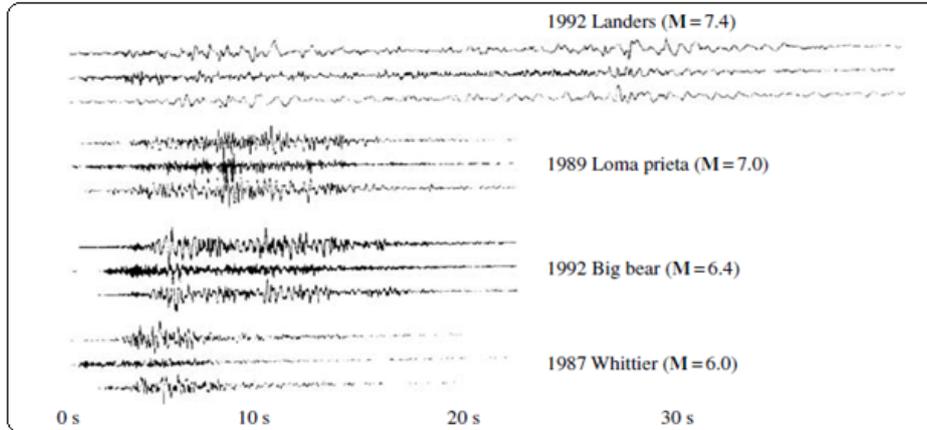
- السرعة الطيفية التقريبية S_{PV}

- التسارع الطيفي التقريبي S_{PA}

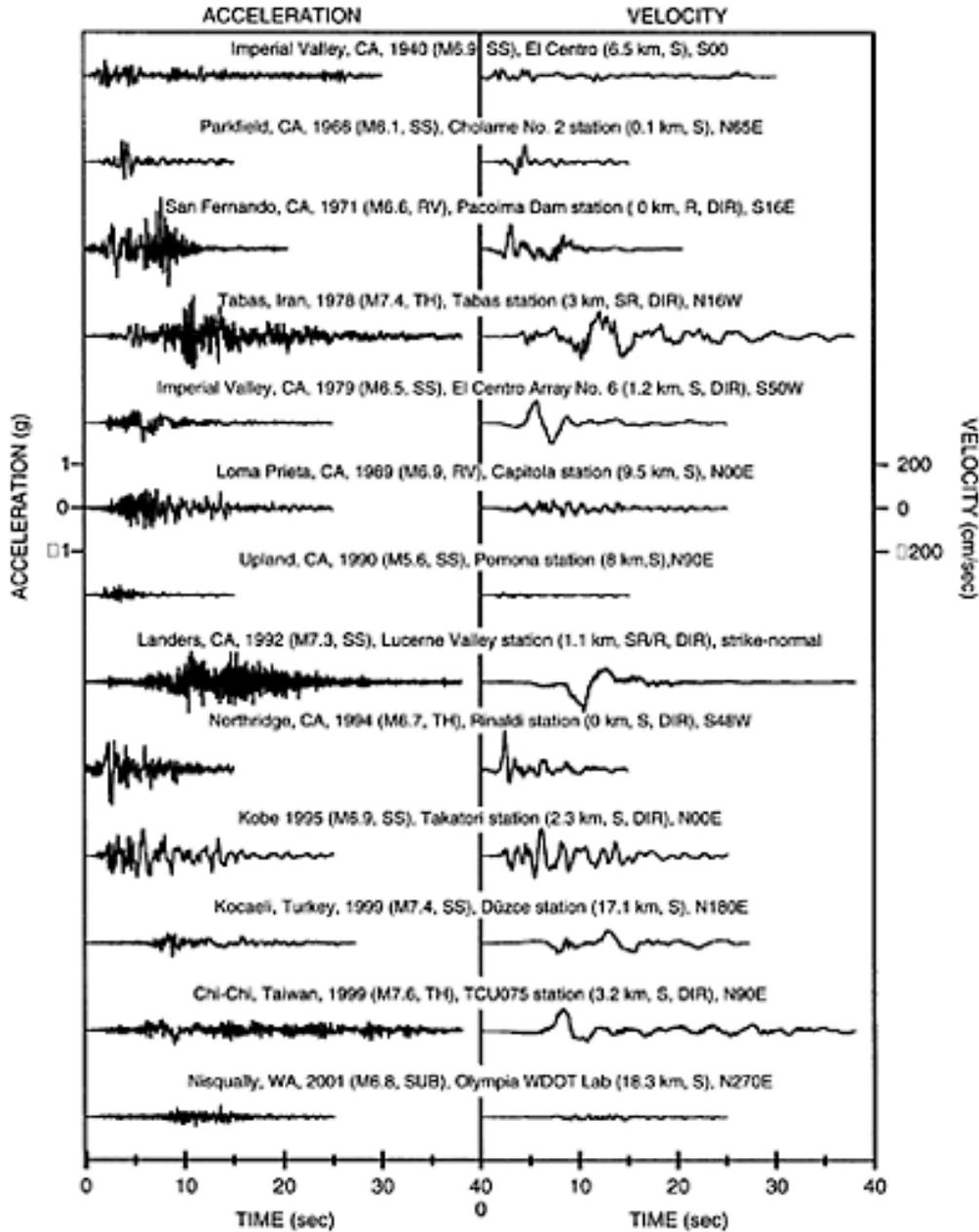
2-7-2- السجل الزمني (Time History):

بدأ استخدام أجهزة قياس الحركات الزلزالية منذ عام 1930 م ، ويبين الشكل (2-117) بعض التسجيلات الزلزالية التي تبين علاقة كل من الانتقال والسرعة والتسارع لحركة الموقع مع الزمن.





الشكل (2-117): السجلات الزلزالية النموذجية لبعض الزلازل



تابع للشكل (2-117): السجلات الزلزالية النموذجية لبعض الزلازل

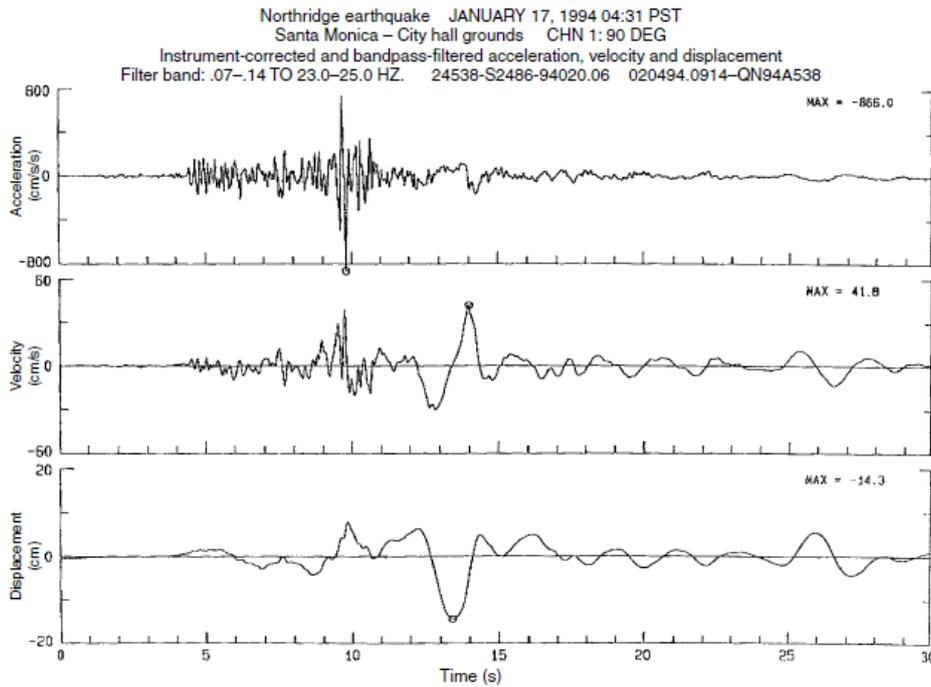
تسمى تسجيلات الحركات الأرضية باليسيموغراف أو بالسجلات الزمنية، وكانت تعطى على شكل أفلام فوتوغرافية (التسجيلات القديمة)، وفي الآونة الأخيرة أصبحت تعطى بصيغة رقمية تستخدم مباشرة في الدراسات، وهي لا تحتاج إلى معالجات وتصحيحات خاصة مرتبطة بتشوهات أدوات التسجيل.

إن السجلات الزمنية تحتوي نظرياً على معلومات كاملة للحركة في أماكن أجهزة الرصد الزلزالي: ثلاثة مخططات (تسجيلين أفقيين وواحد شاقولي). ويمكن أن تختلف السجلات الزمنية للحركة الزلزالية (المدة ومحتوى التواتر

والسعة) في مواقع مختلفة بشكل مثير نتيجة عوامل مختلفة، نذكر منها: قوة الزلزال، آلية التصدع، البعد بين موقع التسجيل وبؤرة الزلزال، ظروف الموقع المحلية، عمق الرسوبيات، ومدة الزلزال.

تسمى السعة الأعظمية للتسارع المسجل بالتسارع الأعظمي للتربة (PGA)، وتسمى السعة الأعظمية للسرعة المسجلة بالسرعة الأعظمية للتربة (PGV)، والسعة الأعظمية للانتقال المسجل تدعى بالانتقال الأعظمي للتربة (PGD). يتم تسجيل التسارع بشكل نظامي ليصار إلى تحديد السرعة والتسارع بالتكامل. يعبر عن التسارع بـ (cm/s²) وغالباً ما يكون كنسبة مئوية من تسارع الجاذبية الأرضية (g). ويبين الشكل (2-118) قيم السعات الأعظمية المذكورة أعلاه والمحددة على السجل الزمني للمركبة الأفقية (شرق - غرب) لزلزال نورثريدج المأخوذ من محطة في سانتا مونيكا.

$$(PGA=866 \text{ cm/s}^2, PGV=41.8 \text{ cm/s}, PGD=14.3 \text{ cm})$$

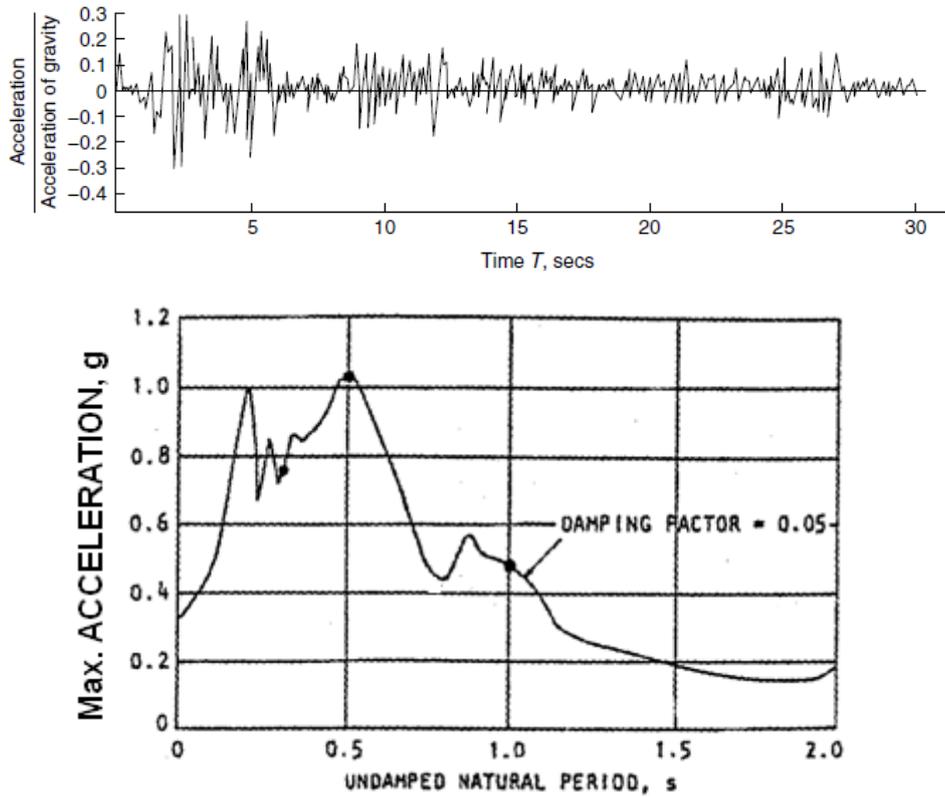


الشكل (2-118): السجل الزمني لزلزال نورثريدج - محطة في سانتا مونيكا (أفقي شرق-غرب)

3-7-2- أطياف الاستجابة (Response Spectra):

اعتماداً على ما ورد في الفقرات السابقة، يمكن التعبير عن الاستجابة القسوى لنظام SDOF معرض عند قاعدته، ببارامترين اثنين: التواتر الطبيعي للنظام ω ، وكمية التخميد ζ . يمكن إعداد المخططات موضحاً فيها قيم الاستجابة القسوى لأي نظام SDOF من خلال التواتر (أو الدور) المسيطر، ويسمى كل واحد من هذه المخططات بطيف الاستجابة، وكمثال على مثل ذلك، مخطط السرعة الطيفية الموضح في الشكل (2-115).

وبين الشكل (119-2) مخطط التسارع الطيفي مع نسبة تخامد مقدارها $\xi = 0.05$ ، المستخرج من المركبة شمال - جنوب للسجل الزمني لزلزال السنترو عام 1949. وهكذا نستطيع تحديد التسارع الأعظمي مباشرة من هذا المخطط بدلالة قيم الأدوار الطبيعية للمنشآت المدروسة (مع قيمة ثابتة للتخامد $\xi = 0.05$)، فنلاحظ من أجل ثلاث منشآت بأدوار مختلفة مساوية لـ 0.3sec, 0.5sec & 1.0sec، يمكننا الحصول مباشرة على قيم التسارعات الأعظمية المقابلة، وهي بالترتيب: 0.75g, 1.02g & 0.48g.



الشكل (119-2): تطبيقات طيف استجابة التسارعات لزلزال السنترو ($\xi = 0.05$)

عملياً، يتم إعداد المخططات الطيفية كعائلة من المنحنيات وفقاً لتخامدات مختلفة، كما هو مبين في الشكل (2-120) بحيث يمكن أن ترسم هذا المخططات بدلالة التواتر أو الدور.

العلاقات بين ما أسميناه الكينونة الطيفية ($S_D, S_{PV} & S_{PA}$)، تسمح بتمثيل هذه القيم الطيفية الثلاث على مخطط وحيد باستخدام مقياس لوغاريتمي، وتسمى هذه المخططات أطراف الاستجابة اللوغاريتمية الثلاثية. وبين الشكل (2-121) مثلاً لهذه المخططات اللوغاريتمية (الاستجابة بدلالة الدور).

أما الشكل (2-122) فيبين نفس المخططات اللوغاريتمية الثلاثية، ولكن تعطى الاستجابة بدلالة التواتر الطبيعي. ولتوضيح عملية إنشاء مثل هذا المخطط الثلاثي، نكتب معادلة السرعة الطيفية التقريبية S_{PV} (المعادلة 2-43) بدلالة التواتر الطبيعي $f(Hz)$.

$$S_{PV} = \omega S_D = \frac{2\pi}{T} S_D = 2\pi f S_D$$

ومن ثم نأخذ اللوغاريتم:

$$\log S_{PV} = \log f + \log(2\pi S_D) \quad (45-2)$$

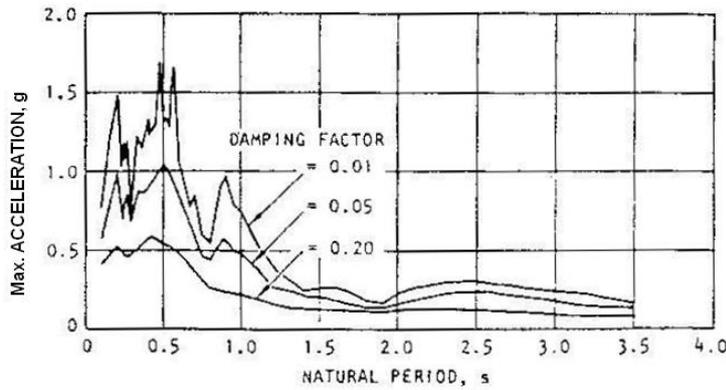
من أجل قيم ثابتة لـ S_D ، تكون المعادلة السابقة معادلة خط مستقيم لـ $\log S_{PV}$ بدلالة $\log f$ مع ميل يعادل $.45^\circ$.

وبشكل مماثل نعالج موضوع التسارع الطيفي التقريبي (المعادلة 2-44):

$$S_{PV} = \frac{S_{PA}}{w} = \frac{S_{PA}}{2\pi f}$$

$$\log S_{PV} = -\log f + \log \frac{S_{PA}}{2\pi} \quad (46-2)$$

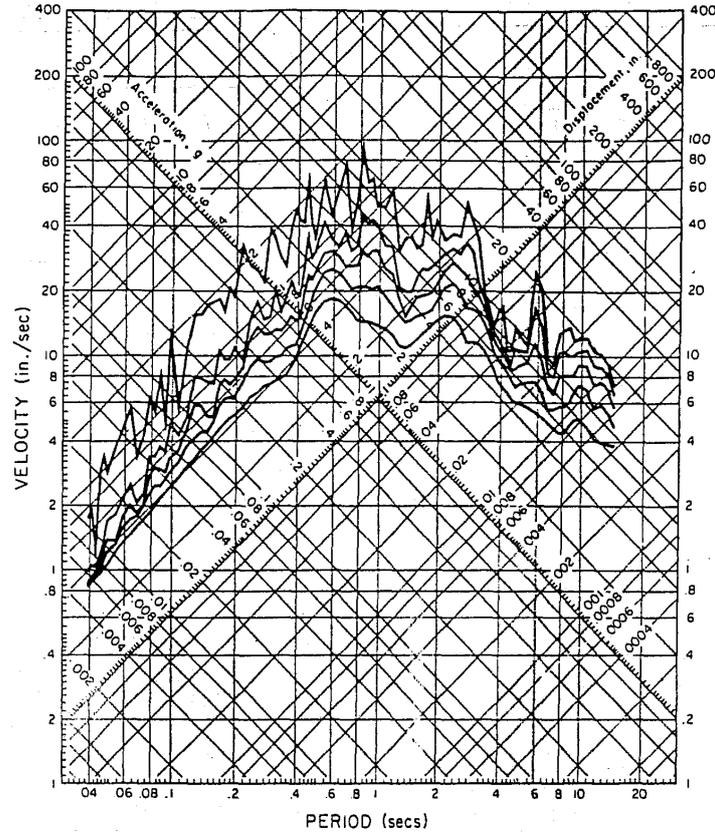
من أجل قيم ثابتة لـ S_{PA} ، تكون المعادلة السابقة معادلة خط مستقيم لـ $\log S_{PV}$ بدلالة $\log f$ مع ميل يعادل



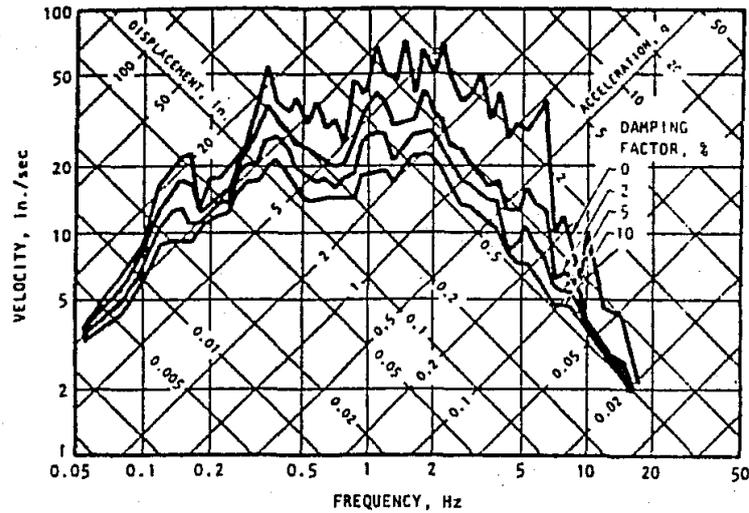
.135°

الشكل (2-120): طيف استجابة التسارعات لزلزال السينترو

(تخامدات مختلفة 20% & 1,5% ξ)



الشكل (121-2): طيف الاستجابة اللوغاريتمي الثلاثي لزلزال السينترو كتابع للدور
(تخامدات مختلفة $\xi = 0, 2, 5, 10$ و 20%)



الشكل (122-2): طيف الاستجابة اللوغاريتمي الثلاثي لزلزال السينترو كتابع للتواتر
(تخامدات مختلفة $\xi = 0, 2, 5$ و 10%)

4-7-2- أطياف التصميم المرنة (Elastic Design Spectra):

كما رأينا سابقاً، أنه بالإمكان إنشاء مخطط طيف الاستجابة وذلك استناداً للسجل الزمني للزلازل ما. في الواقع، إن الزلازل تبدي عدة ميزات مشتركة ولكن كل هزة تبدي صفات استثنائية.

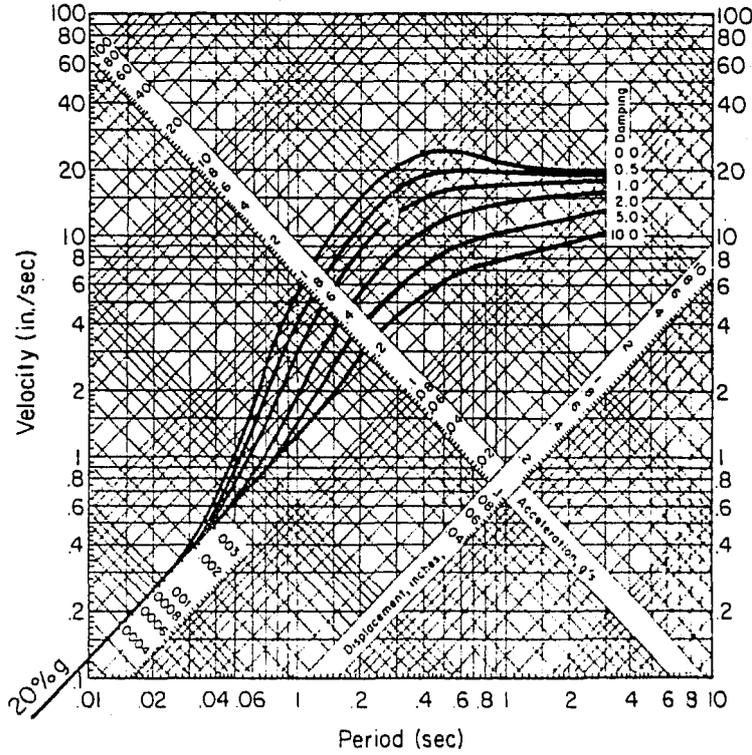
إن أطياف الاستجابة للتسجيلات الزلزالية تحوي عدة ذرا حادة وانخفاضات كالمبينة في الشكل (2-121)، وإنه ليس من المعقول أن نتوقع أن أطياف الزلازل المستقبلية ستظهر نفس الذرا والانخفاضات تماماً، بالإضافة إلى هذا، إن الأدوار الطبيعية وأشكال أنماط اهتزاز المنشآت لا يمكن أن تكون معروفة تماماً. هذا وتظهر عدة أشياء غامضة عند تصميم المنشآت لمقاومة الزلازل، نذكر منها:

- التغيرات المحتومة في الكتلة وخصائص الصلابة في المبنى عن تلك المستخدمة في التصميم.
- الصعوبات المتضمنة في تعيين قيم البارامترات المثلثة لظروف تربة الموقع.
- الاستجابة غير المرنة التي تعمل على إطالة الدور الطبيعي للمنشأة.

ولهذه الأسباب المذكورة أعلاه فإنه من المنطقي، ولأغراض التصميم، استخدام المنحنيات الوسطية التي نحصل عليها من عدة تسجيلات زلزالية. هذه المنحنيات الوسطية، التي لا تظهر الذرا الحادة والانخفاضات للتسجيلات المستقلة)، معروفة أيضاً كأطياف استجابة سلسلة (معالجة)، أو بدقة أكثر معروفة تحت اسم "أطياف التصميم". في الحقيقة إن الأطياف التصميمية تعكس جملة محددة من المعايير الخاصة بالتحليل والتصميم الإنشائي.

إن عملية إنشاء طيف تصميمي لمشروع ما، هي مسألة معقدة، فعلى سبيل المثال تطلب تطوير الطيف التصميمي لموقع نموذجي في منطقة لوس أنجلوس تقييماً مفصلاً للحالة الزلزالية الممكنة على أكثر من 100 صدع ناشط و نصف ناشط، بالإضافة إلى الدراسة التاريخية للنشاط الزلزالي المحلي خلال مائتي سنة منصرمة.

قام الباحث هاوسنر (Housner) (من عام 1959 إلى 1970) بوضع وتطوير أو طيف تصميمي في أمريكا، وذلك اعتماداً على المركبات الأفقية لثلاثة زلازل: اثنان منهما في ولاية كاليفورنيا و الثالث في ولاية واشنطن، وقد تم رسم مخططات هذا الطيف بمقياس يعادل 20% من تسارع الجاذبية الأرضية g أي الموصف بـ $0.20g$ / كما هو مبين في الشكل (2-123).



الشكل (2-123): الطيف التصميمي لهستر بمقاس 0.2g عند قيمة للدور تساوي الصفر
(أو عند تسارع أرضي أعظمي 0.2g)

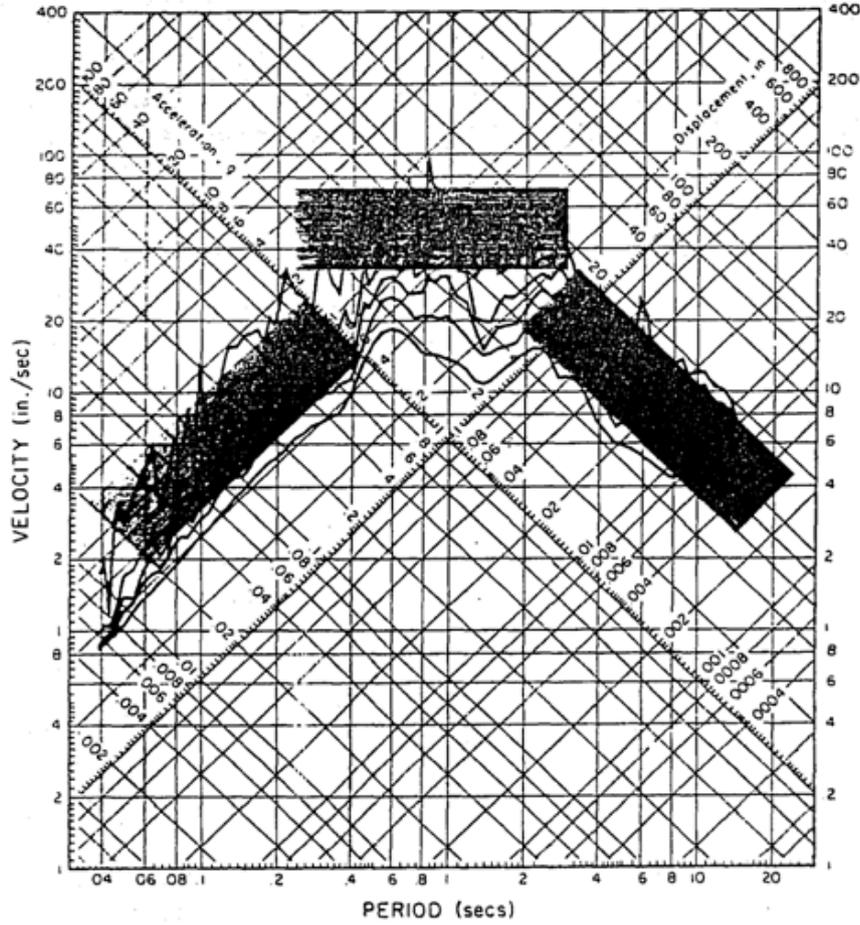
ومن الممكن الحصول على رسوم بيانية طيفية من أجل قيم أخرى للتسارع الأرضي الأعظمي، عن طريق ضرب الإحداثيات الرأسية الطيفية في الشكل (2-123) بنسبة التسارع الأرضي الموصف بـ /0.20g.

ويظهر الشكل (2-124) طيف استجابة نموذجي على مخطط بياني ثلاثي، ويمكن أن نلاحظ وجود ثلاث مناطق بارزة:

- مجال الدور المنخفض الذي يظهر تسارعا ثابتاً إلى حد ما.
- مجال الدور المتوسط الذي يظهر سرعة ثابتة إلى حد ما.
- مجال الدور الطويل الذي يظهر انتقالاً ثابتاً إلى حد ما.

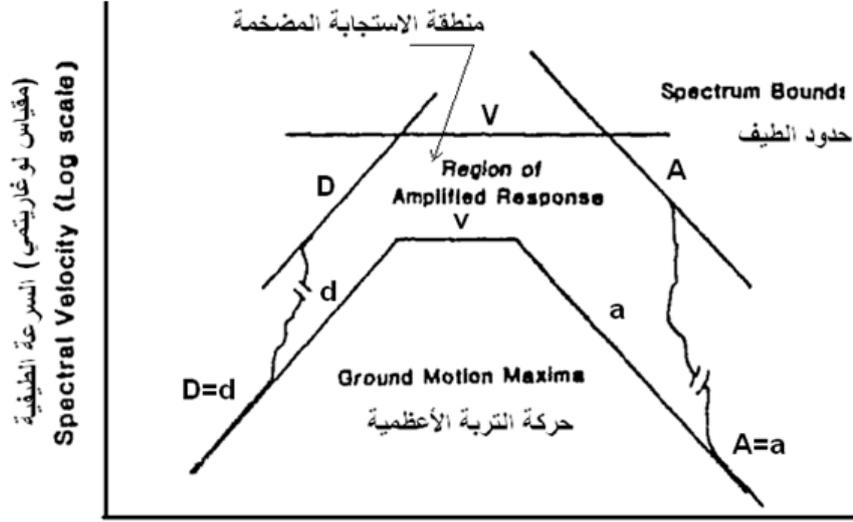
ويشار إلى هذه الحقول الثلاثة بشكل عام كحقول التسارع و السرعة و الانتقال لطيف الاستجابة على التوالي، وقد

قادت هذه الملاحظات الباحثين إلى اقتراح شكل ثلاثي خطي معدل لأطياف التصميم.



الشكل (2-124): معالجة ثلاثية الخطية لأطياف الاستجابة

قام نيومارك و هول (Newmark and Hall 1973-1982) بتصميم طيف الاستجابة لحركة الأرض بعد معالجتها من خلال تضخيم هذه الحركة بواسطة عوامل معتمدة على التخامد في النظام، وبشكل عام ولأي موقع ما، يجب تقدير حركة التربة الأعظمية: تسارع التربة الأعظمي، سرعة التربة الأعظمية وانتقالات التربة الأعظمية، وبين الشكل (2-125) الخطوط الممثلة لتلك القيم الأعظمية المرسومة على ورقة لوغاريتمية ثلاثية.

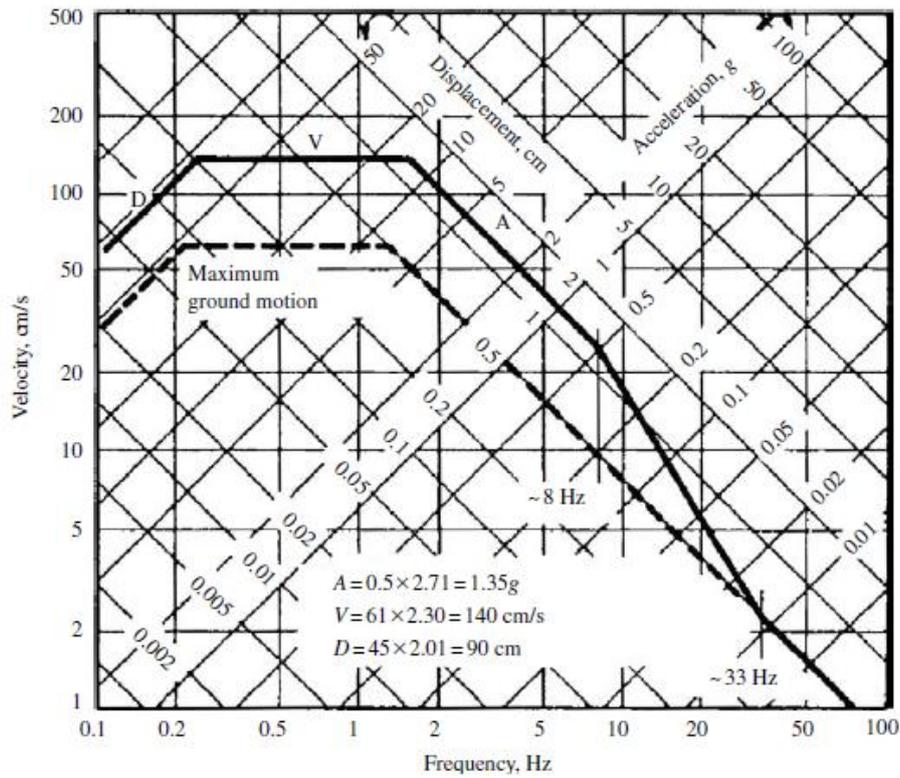


الشكل (2-125): الشكل العام لطيف الاستجابة ثلاثي الخطية المعدل

وبين الشكل (2-126) مثلاً يبين طريقة إنشاء طيف استجابة من معالج وفق عوامل تضخيم لحركة التربة الأعظمية (PGA=0.50g). وذلك لنظام بتخامد حرج 5% .

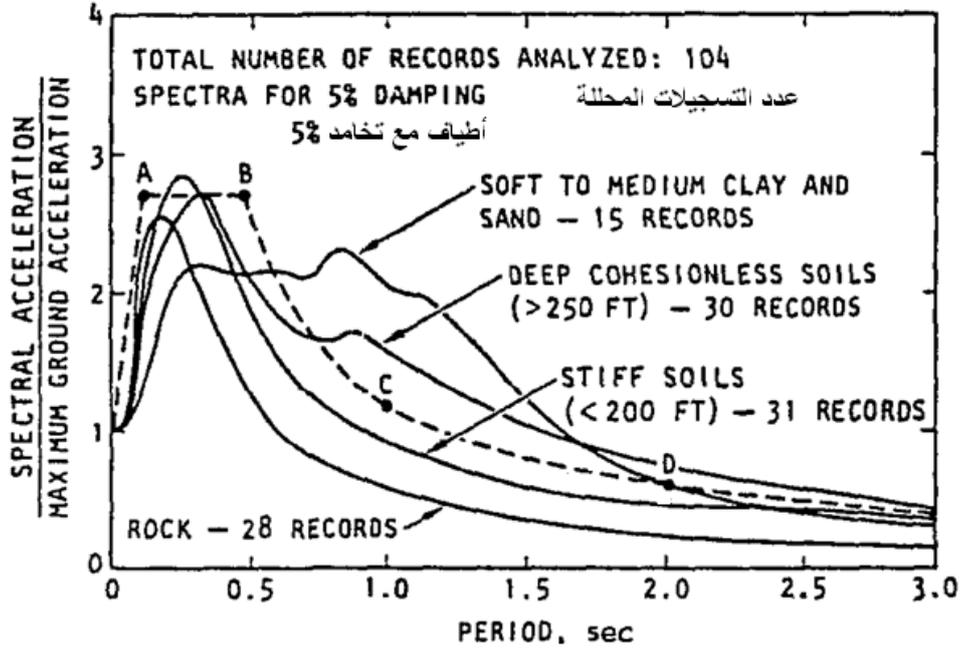
تأثير ظروف التربة المحلية:

قبل زلزال سان فرناندو عام 1971 كانت السجلات الزمنية للزلازل محدودة العدد، وكان معظمها قد سجل على الطمي، ولذلك كان من الطبيعي أن يعتمد التصميم الطيفي على تلك المعطيات كذلك المقترحة من قبل هاوسنر (1959) و نيومارك وهول (1973). ومنذ عام 1973 كانت مجموع المعلومات الحاصل عليها من الزلازل حول العالم و من الدراسات اللاحقة، قد أظهرت التأثيرات المهمة لظروف الموقع المحلي على الأشكال الطيفية، وتبين الأشكال (2-127 و 2-128) تأثير ظروف التربة المحلية على أطياف الاستجابة.

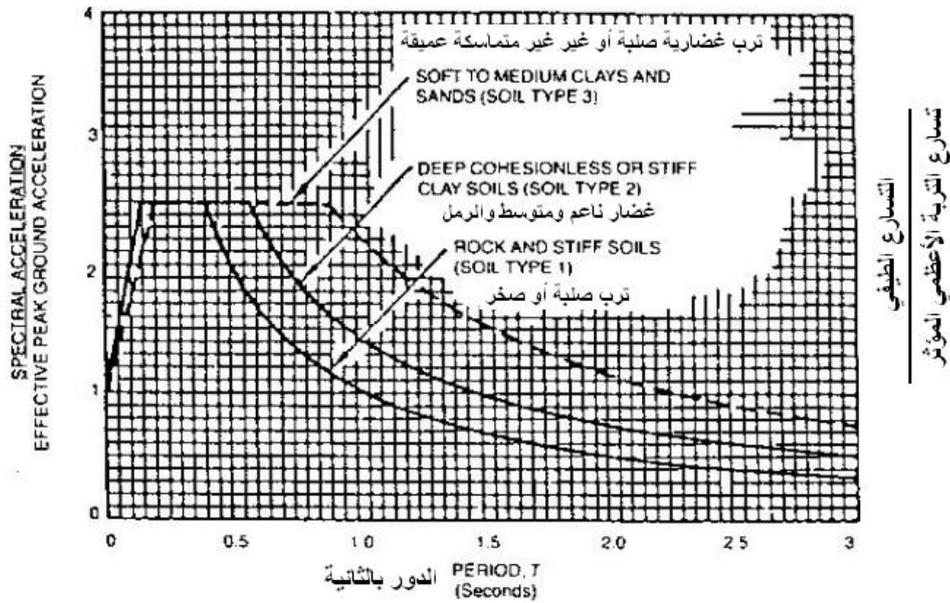


الشكل (2-126): طيف استجابة مرن معالج مع تخامد حرج 5%

يوضح الشكل (2-127) كيفية إنشاء طيف تصميمي محافظ من خلال الأشكال الطيفية، حيث يظهر أربعة منحنيات طيفية للتسارع تمثل متوسط القيم الطيفية القاعدية والتي تتوافق مع عدة مجموعات من التسجيلات الزلزالية و المسجلة لأربع أنواع من التربة، والخط المنقط بين النقط A, B, C, D يحدد طيف تصميمي لموقعي تربة صلبة و صخرية. وأشكال أطراف التصميم القاعدية، كهذه الموجودة في الطبقات الجديدة في كود البناء المنتظم (UBC)، تعتمد على مثل هذه التبسيطات. إن الأشكال الطيفية الموجودة في هذا الكود (UBC) تصبح ثلاثية الخطية عندما ترسم على مخطط لوغاريتمي ثلاثي .



الشكل (2-127): أطياف التسارع المتوسطة لظروف تربة مختلفة



الشكل (2-128): أشكال أطياف التصميم القاعدية (UBC)

5-7-2- أطياف الاستجابة لنظم غير مرنة:

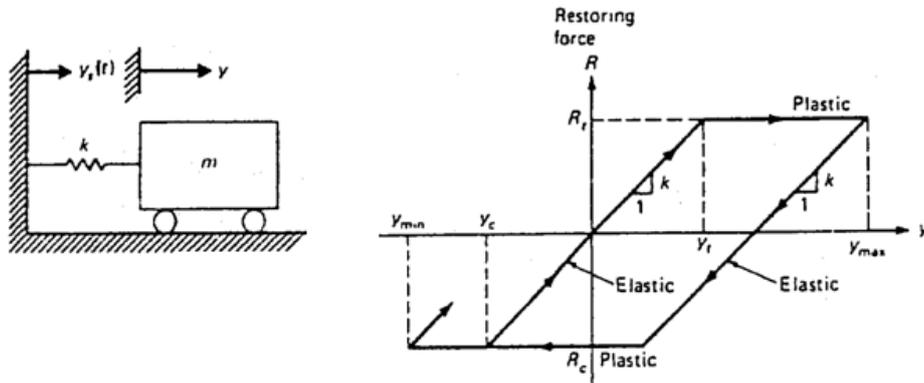
(Response Spectra for Inelastic Systems)

في الواقع، إن معايير التصميم الزلزالي لا تعتمد على أن الجمل الإنشائية للمنشآت تبقى مرنة خلال أغلب الهزات الأرضية، وإن التصميم الأكثر شيوعاً يصاغ على مستويين من مفاهيم التصميم الزلزالي (ACT; FEMA; SEAOC; ICBO):

- 1- يجب أن تقاوم المباني بشكل رئيس الهزات المعتدلة بدون أضرار إنشائية (تعني السلوك المرن بشكل رئيس).
- 2- يجب أن تقاوم المباني الزلازل الكبيرة (شدة زلزالية عالية) مع بعض الأضرار الإنشائية، ولكن بدون انهيار وخسائر كبيرة أو ضحايا (استجابة مرنة بحدود مقبولة).

إن إعداد طيف الاستجابة غير المرن هو محاولة لتوسيع تطبيق التحليل الطيفي إلى ما بعد مجال المرونة الخطي، وغالباً ما يتم استخدام نموذج مرن - لدن، لتوصيف العلاقة بين القوة والانتقال كما هو مبين في الشكل (2-129). هذا التمثيل "مرن - لدن" يفرض أن المادة ستراجع على طول خط التحميل، عندما تفرغ الحمولة قبل حدوث الخضوع.

على أية حال عندما يحدث الخضوع عند الانتقال y_i تبقى قوة الإرجاع ثابتة بمقدار R_i ، وإذا كانت الانتقالات غير معكوسة فيمكن أن تصل إلى قيمة أعظمية مقدارها y_{max} . ومن جهة أخرى في حال كان الانتقال معكوساً تعود المرونة وفق خط موازي للخط الأولي والاستعادة تسير بشكل مرن حتى قيمة سالبة للخضوع R_c في الاتجاه المعاكس.

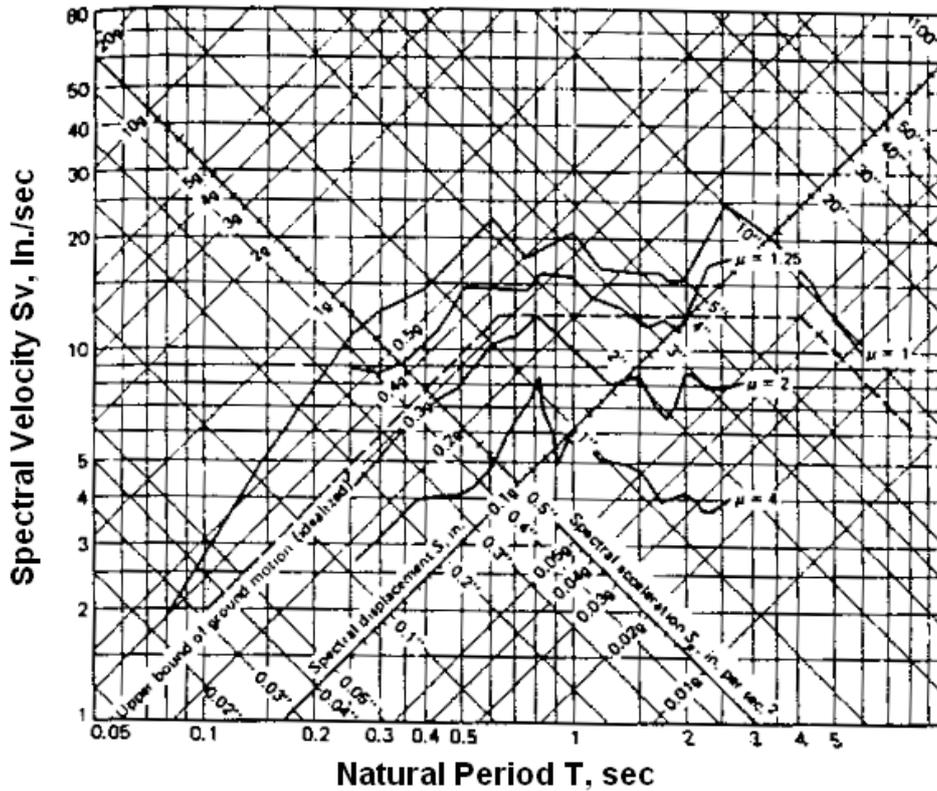


الشكل (2-129): علاقة القوة - الانتقال من أجل نظام SDOF مرن لدن

في الواقع، إن عملية إنشاء أطراف الاستجابة لنظم غير مرنة أكثر صعوبة من حالة النظم المرنة. يتم رسم أطراف الاستجابة غير المرنة كسلسلة من المنحنيات المتوافقة مع قيم محددة لعامل المطاوعة μ ، الذي يعرف بأنه النسبة بين الانتقال الأعظمي للمنشأة في المجال اللامرن y_{max} إلى الانتقال المتوافق مع نقطة الخضوع y_y :

$$\mu = \frac{y_{\max}}{y_y} \quad (47-2)$$

يبين الشكل (130-2) طيف الاستجابة من أجل نظام SDOF مع تخامد حرج 10% معرض للمركبة N-S لزلزال السنترو (EL Centro 1940)، وذلك من أجل قيم مختلفة لعامل المطاوعة μ .



الشكل (130-2): طيف الاستجابة من أجل نظام SDOF مرن - لدن مع تخامد حرج 10% - المركبة N-S لزلزال (EL Centro 1940)

6-7-2- أطيف التصميم غير المرنة (Inelastic Design Spectra):

يمكن أن نجد في المراجع العلمية الخاصة بهذا الموضوع جملة من الإجراءات المقترحة لإنشاء أطيف التصميم غير المرنة، فمثلاً اقترح الباحثان Newmark and Hall طيفاً تصميمياً غير مرن مبني على تعديل الطيف التصميمي المرن بحيث يأخذ بالحسبان تأثير عامل مطاوعة مخصص μ (الشكل 2-131)، وتم اشتقاق طيفين منفصلين انطلاقاً من طيف استجابة مرن:

- طيف التسارع غير المرن الذي يستخدم في حساب القوى غير مرنة.
- طيف الانتقال غير المرن.

إن المبدأ النظري لهذا التعديل يستند على ملاحظة الباحث Newmark التي تبين إمكانية وجود ثلاث مكافئات تربط بين الاستجابة المرنة وغير المرنة:

- 1- عند التواترات المنخفضة تكون الانتقالات متساوية.
 - 2- وعند التواترات المتوسطة (المعتدلة) تكون الطاقات الممتصة هي نفسها.
 - 3- وفي حالة التواترات العالية تكون القوى أو التسارعات متساوية .
- نعمد الخطوات التالية عندما يراد إنشاء طيف استجابة غير مرن (الشكل 2-132):

الخطوة الأولى:

نرسم على ورقة لوغاريتمية ثلاثية طيف الاستجابة المرن باعتماد الشروط والبارامترات الخاصة بحركة التربة وكمية التخماد المميزة كافة (الخطوط المبينة على الشكل 2-131: $D - V - A - A_0$).

الخطوة الثانية:

الحصول على الخطوط D' و V' الموازية لـ D و V بتقسيم الإحداثيات الرأسية للخطوط D و V على عامل المطاوعة الموافق μ .

الخطوة الثالثة:

نقسم الإحداثيات الرأسية للنقطة P في الطيف المرن على $\sqrt{(2\mu - 1)}$ لنحصل على النقطة الجديدة P' .

الخطوة الرابعة:

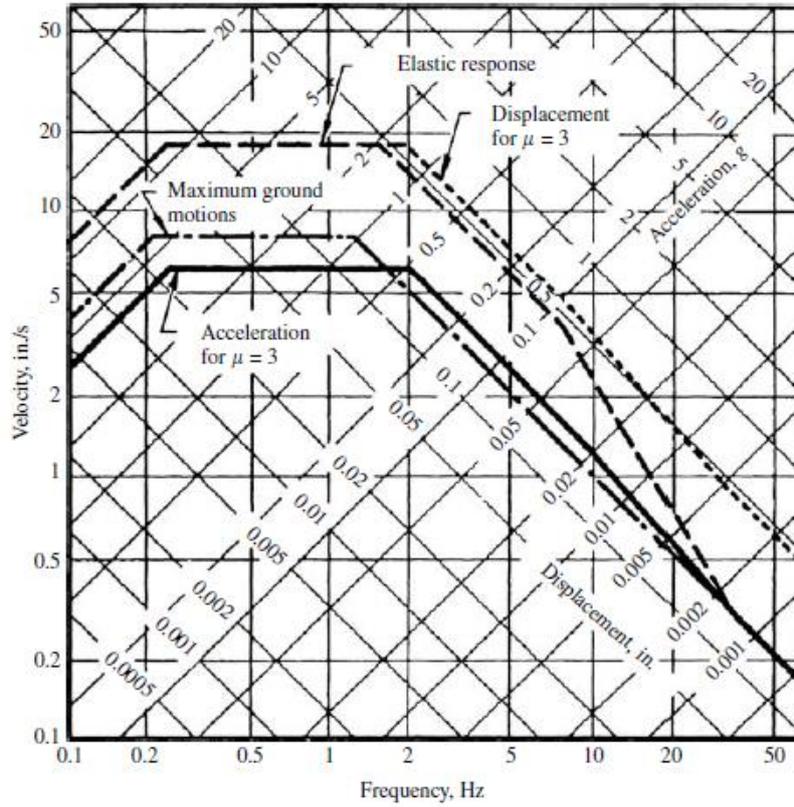
نرسم من النقطة المحددة الجديدة P' الخط A' المائل بزاوية 45° حتى يتقاطع مع الخط V' .

الخطوة الخامسة:

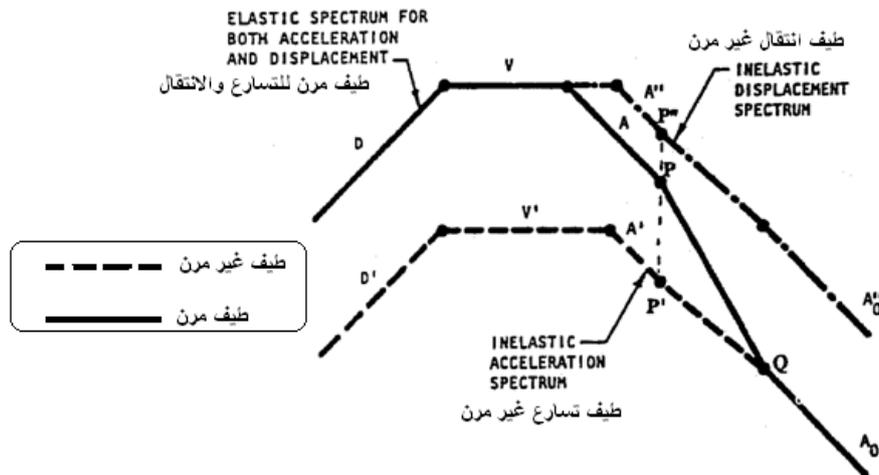
نصل النقطة P' والنقطة Q حتى نكمل طيف الاستجابة للتسارع.

الخطوة السادسة:

نرسم القطع المستقيمة A'' و A_0'' التي نحصل عليها من الإحداثيات الموافقة لـ A' و A_0' والمضروبة بعامل المطاوعة μ .



الشكل (2-131): مثال لطيف استجابة غير مرن (Newmark and Hall, 1982)



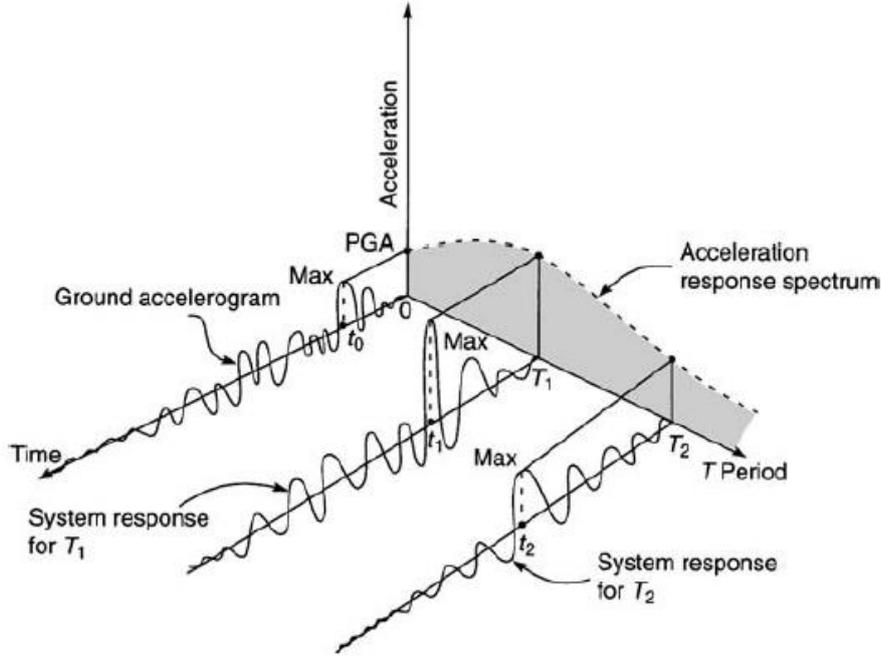
الشكل (2-132): التعديلات على طيف استجابة مرن للحصول على طيف استجابة غير مرن

7-7-2- خلاصة:

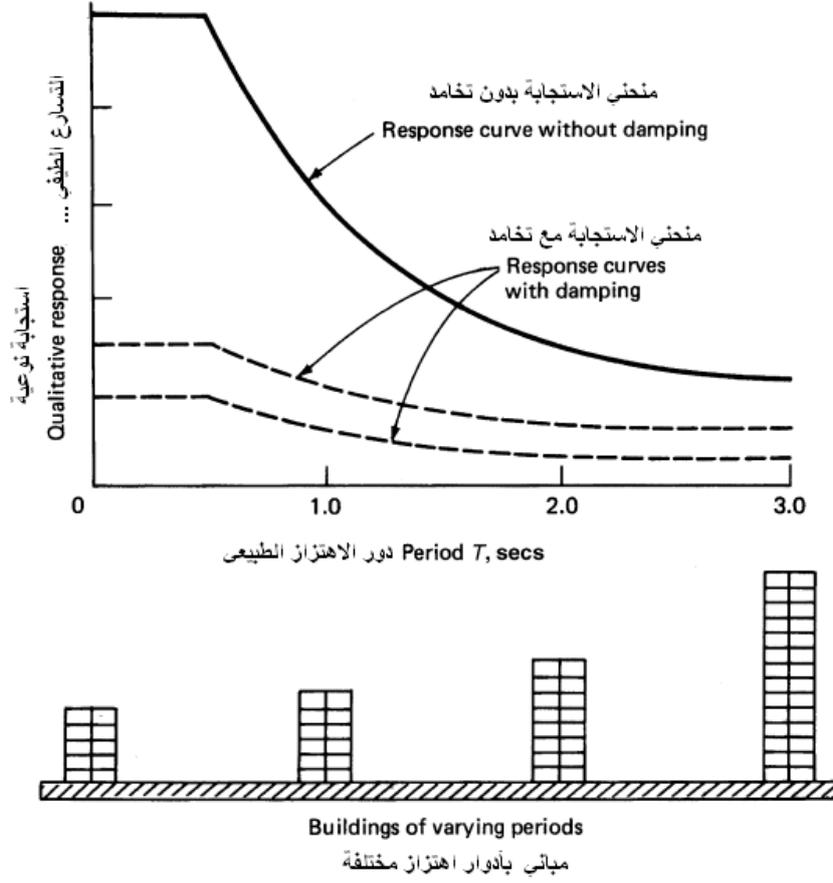
من خلال ما تم عرضه حول أطياف الاستجابة، يمكننا أن نورد بعض الملاحظات المهمة التالية:

1- مفهوم طيف الاستجابة (Concept of Response Spectrum):

إن كلمة طيف الاستجابة تعني فكرة تجميع استجابة المنشآت ذات أوقات اهتزاز مختلفة (مجال واسع) في مخطط وحيد، فمن أجل حركة زلزالية ما ونسبة من التخامد الحرج، يعطي طيف الاستجابة النموذجي مخططاً بيانياً للاستجابات المرتبطة بالزلازل مثل التسارع والسرعة والانتقال لحقل كامل أو لطيف كامل من أوقات الاهتزاز للمنشآت، بالتالي يمكننا طيف الاستجابة من مشاهدة عرض بياني للاستجابة الديناميكية القصوى بدلالة دور الاهتزاز الطبيعي لسلسلة من الهزات المتنوعة تحت تأثير حمولات زلزالية جانبية مطبقة عند القاعدة، وهذا يعني إن طيف الاستجابة هو مغلف الاستجابات القصوى كما هو مبين في الشكلين (2-133 و 2-134).



الشكل (2-133): وصف بياني لطيف الاستجابة للتسارع



الشكل (2-134): مفهوم طيف الاستجابة

2- أنواع أطياف الاستجابة (Types of Response Spectrum):

من الناحية العملية (التطبيقية)، يتم استخدام ثلاثة أنواع من أطياف الاستجابة:

- أطياف استجابة من تسجيلات زلزالية حقيقية.
- أطياف استجابة تصميمية معالجة.
- أطياف استجابة خاصة بالموقع موضوع الدراسة.

2-8-1- آراء عامة:

إن للطقس وللمناخ تأثيرات مباشرة وكبيرة على نشاط الإنسان وعلى البيئة المحيطة به، وتفرض عليه سلوكاً معيناً يتغير بتغير الفصول، فأحياناً يتحكم الطقس بصحة الإنسان وبنشاطه الاجتماعي والاقتصادي. فالطقس يحدد نوع اللباس وماذا يأكل الإنسان وماذا ومتى يزرع ومتى ينتقل من مكان لآخر وكيف يؤمن السكن المناسب للحماية من تأثيرات هذا المناخ وتقلباته. فجميع الأنشطة الإنسانية تتأثر بالطقس والمناخ والمياه وتؤثر فيها.

ونحن نعيش على كوكب نشط والثبات فيه نسبي، والكارثة لا تقع إلا عندما نقف في طريق الظاهرة الطبيعية وتكون البنية التحتية أضعف من أن تحتوي وتستوعب تطرف هذه الظاهرة.

في فقرة سابقة حول أسباب تشكل الزلازل التكتونية، كنا قد بينا بأن كوكب الكرة الأرضية الذي نساكنه سواء منه اليابس والماء، وما يحيط به من هواء، يتكون من أربعة أغلفة هي: الغلاف اليابس (التربة والصخور)، الغلاف المائي، الغلاف الجوي والغلاف الحيوي (المحيط الحيوي).

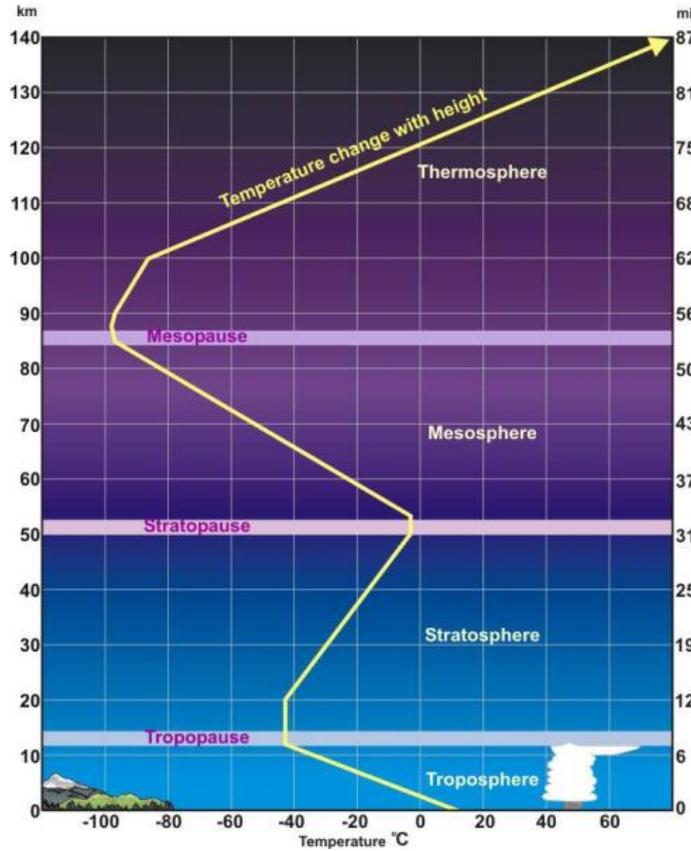
ينقسم الغلاف اليابس (الصخري) إلى ثلاث طبقات: القشرة الأرضية، المعطف (الرداء) وجوف الأرض (نواة الأرض).

يشمل الغلاف المائي جميع أنواع المياه على سطح الأرض وتحت سطحها ويغطي الماء مساحة من الكرة الأرضية تقدر بحوالي 70% وتعد مياه البحار والمحيطات والأنهار والبحيرات العذبة والثلوج في المناطق القطبية مياه سطحية و أما المياه الجوفية التي تملأ المسامات والشقوق في الصخور فتسمى المياه تحت السطحية (جوفية) وتحتوي أملاحاً منحلّة اكتسبها الماء أثناء جريانه وتسربه خلال مسامات الصخور أو نتيجة للتفاعل الكيميائي بين الماء والصخر.

يحاط كوكب الأرض بغلاف الهواء، يطلق عليه الغلاف الجوي وخليط من الغازات المختلفة المحيطة بهذا الكوكب، وينقسم الغلاف الجوي إلى عدة طبقات تمتد من سطح الأرض إلى ارتفاع 1000 كم وتتداخل هذه الطبقات فلا يوجد خطوط فاصلة بشكل دقيق بين بداية كل طبقة ونهايتها، وبين الشكل (2-135) طبقات الغلاف الجوي المختلفة وتغير درجات حرارتها مع الارتفاع: (التروبوسفير، الستراتوسفير، الميزوسفير والترموسفير).

إن طبقة التروبوسفير هي الطبقة الملاصقة لسطح الأرض والتي تعيش فيها الكائنات الحية كافة، ومنها الإنسان وهي الطبقة التي تحدث فيها التغيرات الجوية وتتميز بوجود السحب والأمطار والرياح.

الرياح هي الحركة الأفقية لجزيئات الهواء، وتمثل كمية تتألف من عنصرين يحددان خصائصها، هما الاتجاه والسرعة، ويشير الاتجاه إلى الجهة القادمة منها الرياح، وأما سرعة الرياح فهي تقيس المسافة التي تقطعها جزيئات الهواء المتحركة أفقياً في واحدة الزمن.



الشكل (2-135): طبقات الغلاف الجوي المحيط بالأرض

وان السبب الأولي لنشوء الرياح هو وجود انحدار في الضغط الجوي، مما يقود الهواء بالتحرك من المكان الأعلى ضغطاً إلى المكان الأقل ضغطاً، وتزداد سرعة الرياح كلما ازداد انحدار الضغط وقلت كثافة الهواء، وانخفض الاحتكاك بسطح الأرض.

يتم تصنيف الرياح وفق عدة أسس ومعايير مختلفة:

1. التصنيف حسب مستوى هبوبها والقوى المتحركة فيها: سطحية، علوية...
2. التصنيف حسب السرعة: النسيم بدرجاته المختلفة (خفيف، لطيف، معتدل، نشيط، قوي) بسرعة أقل من 13.8 m/sec ، والعاصفة (ضعيفة، متوسطة، شديدة) بسرعة تتراوح $(13.8 \rightarrow 24.5)\text{ m/sec}$ ، والزوبعة (المتوسطة أو الهوجاء) بسرعة $(24.5 \rightarrow 32.7)\text{ m/sec}$ ، والإعصار الذي تكون سرعته أكبر من 32.7 m/sec .
3. التصنيف الذي يعتمد على ديمومة هبوبها وسعة انتشارها، وتقسّم بموجبه إلى أربعة أنواع هي: الرياح الدائمة، الرياح الموسمية، الرياح المحلية، والرياح اليومية (دورية متناوبة بين الليل والنهار).

إن العواصف والأعاصير هي قوى تخريب وتدمير لما يعترض طريقها (الشكل 2-136)، ولقد تبين بأنها الأكثر تخريباً من بقية الكوارث الطبيعية مثل الزلازل والفيضانات، لما تسببه من خسائر اقتصادية وبشرية، فعلى سبيل المثال، وفي أمريكا بين سنة 1986 و 1993م، سببت هذه الرياح العنيفة خسائر تم تقديرها بحوالي 41 مليار دولار، مقارنة مع حوالي 6 مليار دولار لبقية الكوارث الطبيعية. وفي أوروبا، وخلال العام 1900م فقط وصلت الخسارة إلى 10 مليار دولار تكاليف الضمان و 15 مليار من الخسارة الاقتصادية نتيجة أربع عواصف شتوية.

وعلى المستوى العالمي، فقد وجد أن 90% من الكوارث الطبيعية لها علاقة بالظواهر الجوية (الطقس والمناخ والماء)، وخلال الفترة من سنة 1992-2001م، فقد العالم حوالي (622000) حالة وفاة، عدد الأشخاص الذين تأثروا في هذه الكوارث حوالي 2 مليار شخص، وسببت هذه الكوارث خسائر اقتصادية تقدر بحوالي 500 مليار دولار أمريكي، وهذا ما يمثل حوالي 65% من مجموع الخسائر الناجمة عن كل الكوارث الطبيعية في هذه الفترة.



الشكل (2-136): تأثيرات الرياح السلبية والايجابية

2-8-2- اعتبارات التصميم:

عند التصميم لمقاومة الرياح، لا يمكن اعتبار المنشأة منفصلة عن البيئة المحيطة بها، ويكون تأثير الأبنية القريبة وتكوين الأرض مهماً جداً بل أساسياً على الاستجابة الحاكمة للمنشأة عند خضوعها لحمولات الرياح. إن التأرجحات والانزلاقات الناجمة عن فعل الرياح في الطوابق العليا من الأبنية العالية لا يمكن النظر إليها بصورة مبسطة وعابرة، بل إنه أمر يخص الذين يقطنون تلك الطوابق.

في الواقع، يوجد أدلة ضئيلة حول تسبب الرياح بأضرار إنشائية رئيسة على الأبنية الحديثة، باستثناء العواصف والأعاصير، ومن ناحية أخرى تبين أن ناطحات السحاب الحديثة الحاوية على جدران حاجبة خفيفة (Curtain walls)، وقواطع غير مدعمة، وعلى مواد عالية المقاومة، تكون أكثر عرضة لمشاكل حركة الرياح مقارنة بالناطحات الأولية التي كانت تملك قواطع حجرية، وواجهات حجرية ثقيلة و عناصر إنشائية كتلية.

من المؤكد أن الأبنية كافة تتأرجح عند تعرضها لعواصف ريحية، وعادة تكون الحركة مألوفة أو غير محسوس بها ولا تسبب مشكلة للقاطنين، وذلك في حالة الأبنية العالية الأولية الحاوية على قواطع وجدران ثقيلة.

إن الابتكارات الإنشائية وتقنيات الإنشاء الخفيف سببت انخفاضاً واضحاً لبعض الخواص كالكتلة والقساوة والتخامد للأبنية الحديثة.

وتبين أن الأبنية المختبرة على حمولات الرياح تسبب في اهتزاز المواد والأشياء وتأرجح الثريات والأبواب وتساقط الكتب عن الرفوف، هذا وعندما يخضع البناء لفعل الفتل يتولد لدى الشاغلين إحساس كاذب بأن العالم في الخارج يتحرك مبددين إشارات الدوخة والإرباك.

في العواصف القوية، يمكن أن تتكسر النوافذ التي تسبب خطراً على المشاة، وأحياناً يتم سماع ضجيج غريب ومرعب من قبل الشاغلين للبناء.

ونبين فيما يلي بعض المعايير المهمة عند تصميم الأبنية لمقاومة الرياح:

- 1- المقاومة والاستقرار.
- 2- التعب في العناصر الإنشائية والعقد، الناجم عن تردد حمولات الرياح.
- 3- الانتقال الجانبي المفرط، الذي يمكن أن يسبب تشقق القواطع الداخلية والاكساءات الخارجية، وتشوهات دائمة في العناصر غير الإنشائية.
- 4- التواتر والسعة للانتقالات التي يمكن أن تسبب إزعاج الشاغلين للأبنية العالية.
- 5- احتمال تشكل صدمة عنيفة تعمل على زيادة سرعة الرياح على الأبنية المتاخمة.
- 6- تشكل ظاهرة الطنين لاهتزازات البناء مع اهتزازات المصاعد.

لأغراض التصميم يمكن تصنيف الرياح وفق ثلاثة أنواع رئيسية: الرياح السائدة (المسيطرة)، الرياح الموسمية، و الرياح المحلية.

2-8-3- خواص الرياح:

إن جريان الرياح هو عملية معقدة وذلك بسبب نشوء الكثير من حالات التدفق الناجمة عن الفعل المتبادل بين الرياح والمنشآت، وبالرغم من هذا التعقيد يمكن أن نلاحظ وجود بعض التبسيطات، في دروس وأدبيات هندسة الرياح، بهدف الحصول على حمولات الرياح التصميمية وذلك من خلال التمييز بين الخواص التالية:

- تغير سرعة الرياح مع الارتفاع.
- اضطراب الرياح.
- الاحتمال الإحصائي.
- ظاهرة فرز الدوامات.

- الطبيعة الديناميكية للفعل المتبادل رياح - منشأة.

يبين الشكل (2-137) تأثير موقع التعرض للرياح (مواقع حضرية مسكونة، مواقع مفتوحة، ومواقع منبسطة لا يوجد حواجز طبيعية أو مسطحات مائية) على تغيرات سرعة الرياح بدلالة الارتفاع. في الواقع، إن لزوجة الهواء تقلل من سرعته القريبة لسطح الأرض للوصول تقريباً إلى درجة الصفر، ولا تتأثر سرعة الرياح بخشونة السطح عند الارتفاعات الكبيرة (حوالي 366 متر) عن سطح الأرض.

يسمى الارتفاع الذي من خلاله تتأثر سرعة الرياح بطبوغرافية الموقع بـ "الطبقة الجوية المتاخمة"، وتعطى سرعة الرياح في هذه الطبقة بالعلاقة التالية:

$$V_z = V_g \left(Z / Z_g \right)^{1/\alpha}$$

حيث:

V_z : سرعة الرياح الوسطية عند الارتفاع Z من سطح الأرض.

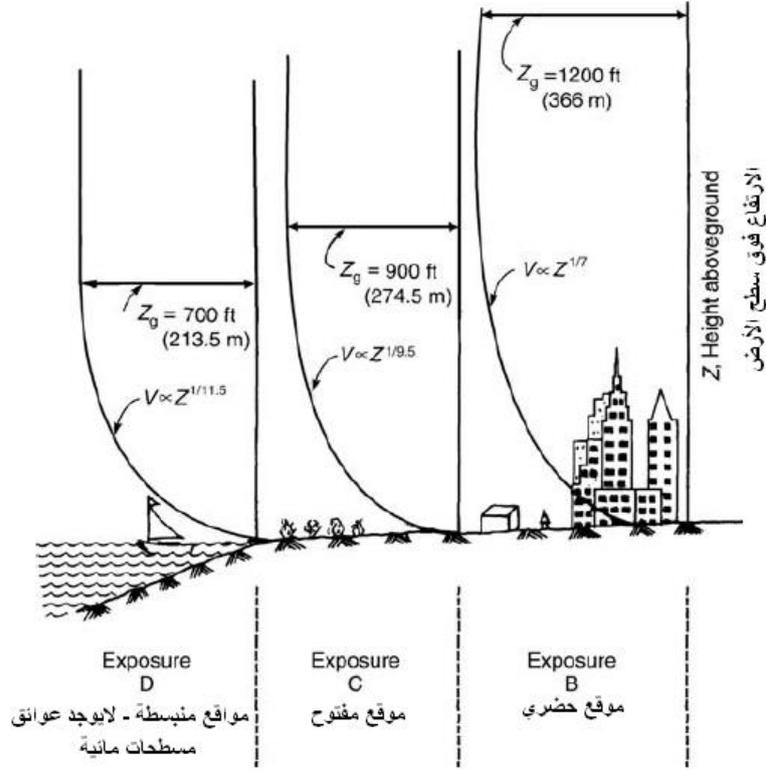
V_g : سرعة تدرج الرياح، وهي ثابتة فوق الطبقة المتاخمة.

Z : الارتفاع عن سطح الأرض.

Z_g : الارتفاع الاسمي للطبقة المتاخمة، يعتمد على موقع التعرض (الشكل 2-137).

α : عامل العلاقة الأسية، يتغير مع خشونة الموقع من قيمة منخفضة تساوي 0.087 لموقع ريفي مفتوح إلى القيمة 0.20 للمواقع الحضرية العمرانية، وهذا يعني بأن الرياح تصل إلى سرعات أقصى للارتفاعات الكبيرة وذلك في حالة المواقع الحضرية عنه في حالة المواقع المفتوحة.

إن حركة الرياح مضطربة، ومن الصعب إعطاء تعريف رياضي مختصر للاضطراب باستثناء حالة الرياح كون الهواء يملك لزوجة منخفضة (حوالي 1/16 من لزوجة الماء)، وإن أية حركة للهواء تزيد سرعتها عن (0.9 → 1.3 m/sec) تكون مضطربة بسبب أن جزيئات الهواء تتحرك في الاتجاهات كافة، عل عكس ما يحصل في السوائل الثقيلة والتي تتحرك بشكل موازي لاتجاه الجريان.



الشكل (2-137): تأثيرات مواقع التعرض للرياح على تغيرات سرعة الرياح بدلالة الارتفاع.

وفيما يخص مسائل الهندسة الإنشائية، يمكن اعتبار أن السرعة V_i تتكون من مركبتين: السرعة الوسطية V التي تزداد قيمتها بازدياد الارتفاع، وسرعة الاضطراب التي تبقى نفسها مع الارتفاع V' (الشكل 2-138). بطريقة مماثلة، فإن ضغط الريح الذي يتناسب مع مربع السرعة (الشكل 2-139)، يضطرب أيضاً، ويعطى الضغط الكلي P_i في أية لحظة t بالعلاقة التالية:

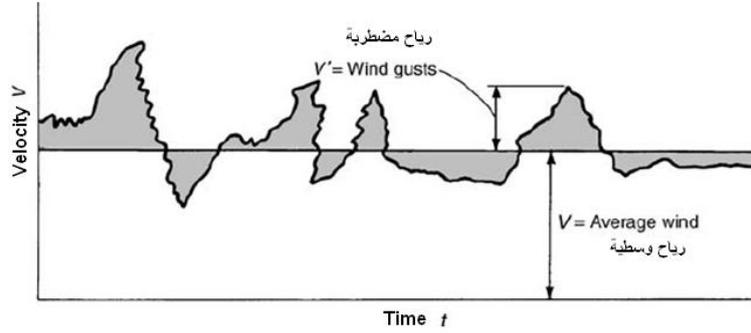
$$P_i = \bar{P} + P'$$

حيث:

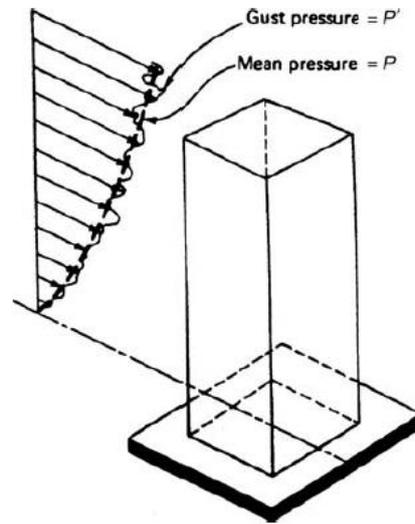
P_i : الضغط في اللحظة t .

\bar{P} : الضغط الوسطي.

P' : الضغط اللحظي المضطرب.



الشكل (2-138): تغير سرعة الرياح مع الزمن

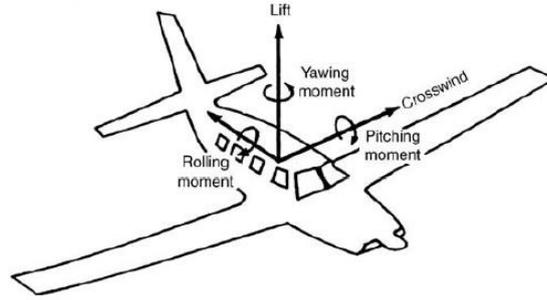


$$P_t = \bar{P} + P'$$

الشكل (2-139): عرض تخطيطي للضغط الوسطي والمضطرب للرياح

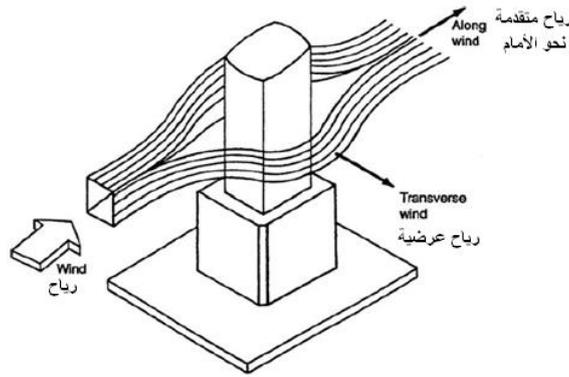
من المهم أن نفهم مفهوم احتمالية تجاوز السرعة التصميمية للرياح خلال الفترة الزمنية لعمر المنشأة المدروسة، حيث إن الضغوط الناجمة عن الرياح والمستخدمة في التصميم تستند على السرعة التي تملك فترة تكرار وسطية مميزة. وبشكل عام إن الفترات المتكررة الوسطية المعتمدة في تصميم الأبنية هي 20 و 50 سنة، حيث إن الفترة 20 سنة تكون من أجل تحديد راحة السكان شاغلي الأبنية العالية، وأما الفترة 50 سنة تكون من أجل تصميم العناصر المقاومة.

عندما تضرب الرياح جسماً ما فسوف تتحول إلى ثلاثة اتجاهات متعامدة ومتناوبة، مسببة ولادة قوى وعزوم حول هذه الاتجاهات الثلاثة (ست مركبات للرياح) كما هو مبين في الشكل (2-140)، وهذا أمر مهم جداً في مجال هندسة الطيران.

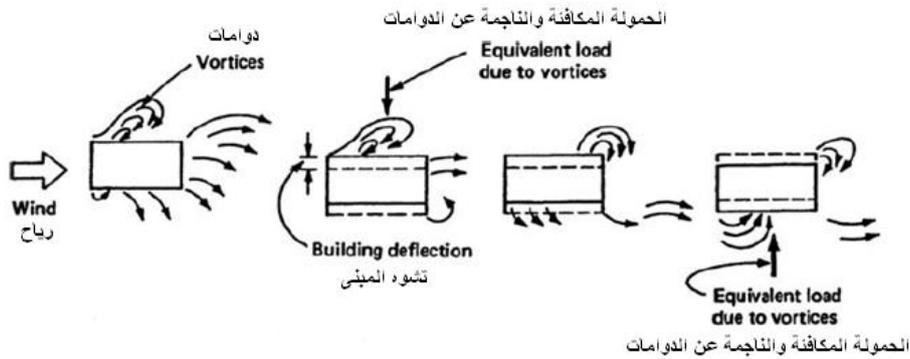


الشكل (2-140): المركبات الستة للرياح

يمكن تبسيط المسألة في مجال الهندسة الإنشائية، باستثناء حالة السقوف الكبيرة، بتحويل جريان الرياح إلى مسألة ثنائية الاتجاه لا يوجد فيها تأثير مهم لقوى الرفع، مؤلفة من رياح متقدمة إلى الأمام تشير لقوى السحب، ورياح عرضية تشير إلى حركة المنشأة باتجاه متعامد مع اتجاه الرياح، كما هو مبين في الشكلين (2-141 و 2-142).



الشكل (2-141): الجريان المبسط للرياح



الشكل (2-142): تأثير الرياح العرضية وتشكل ظاهرة الدوامات المعزولة

(حالة السعات العالية للرياح)

يجب على الدارس معرفة الطبيعية الديناميكية للرياح خاصة تلك المضطربة، بشكل مغاير لمفهوم الجريان الوسطي للرياح الذي يملك طبيعة استاتيكية. أثبتت الدراسات أن تأثير الرياح المضطربة لا يعتمد فقط على المسار المأخوذ

من قبل الرياح للوصول إلى الشدة القصوى ومن ثم الانخفاض ثانية، بل على دور الاهتزاز الذاتي للمبنى نفسه. فإذا وصلت الرياح المضطربة إلى قيمتها العظمى وانتهت بفترة زمنية أصغر بكثير من دور المنشأة فيكون تأثيرها ديناميكي، وبالمقابل يمكن أن يكون تأثير الاضطرابات مهماً واعتبار الرياح كحمولات استاتيكية عندما ترتفع حمولة الرياح وتتلاشى خلال فترة أطول بكثير من دور المبنى.

يبين الشكل (2-143) توزيعاً تخطيطياً لمناطق الضغط والسحب في مبنى معرض لحمولات الرياح، حيث أثبتت الدراسات التجريبية المقامة في أنفاق الريح أنه بالإمكان التمييز بين ثلاث مناطق للضغوط الناجمة عن حمولات الرياح حول مبنى ما، وهي:

منطقة الضغط الموجب في السطح المواجه للرياح (Region 1).

منطقة الضغط السالب في السطح المواجه للرياح (Region 2).

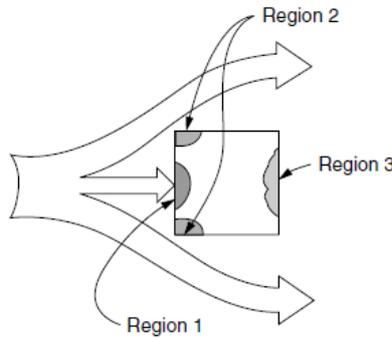
منطقة الضغط السالب في السطح المقابل للرياح (Region 3).

تبين أن المنطقة (2) تحوي أكبر الضغوط السالبة، وهي زوايا المبنى المواجهة للرياح.

هذا ولوحظ أن الضغط الموجب في السطوح المواجهة للرياح أكثر تقلباً من الضغوط السالبة في الجهات الأخرى، وأن منطقة الضغط السالب تبقى ثابتة نسبياً مقارنة بمنطقة الضغط الموجب.

أخيراً، يجب التمييز بين نوعين من الحمولات التي تسببها الرياح:

- حمولة الرياح الكلية: وهي الحمولة الجانبية المستخدمة في التحليل الإنشائي، والتي تتكون من تراكب الضغوط الموجبة والسالبة حول المنشأة.
- حمولات الرياح الموضعية التي تؤثر في مناطق معينة من المنشأة بهدف تصميم عناصر الأكساء الخارجية ووصلاتها مع المنشأة.



الشكل (2-143): توزيع الضغوط الموجبة والسالبة (السحب)