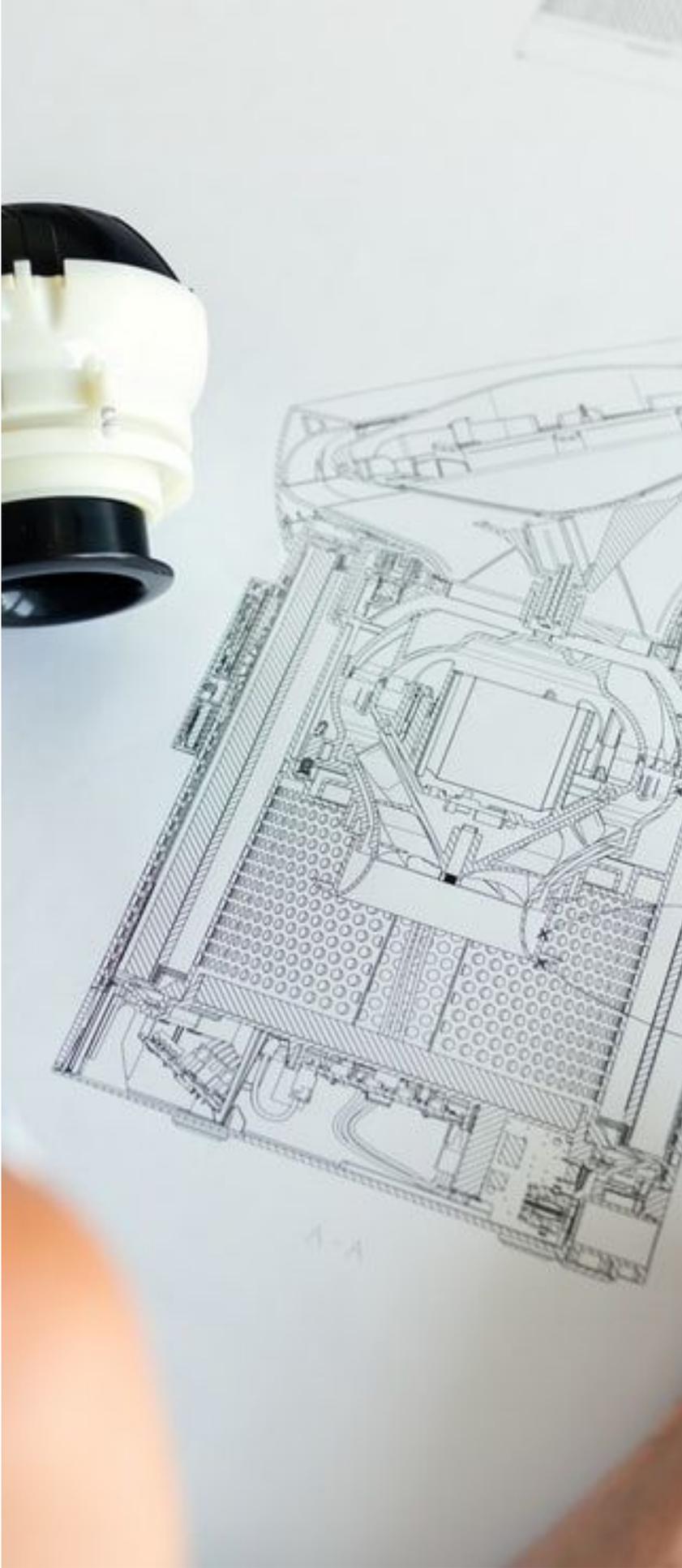


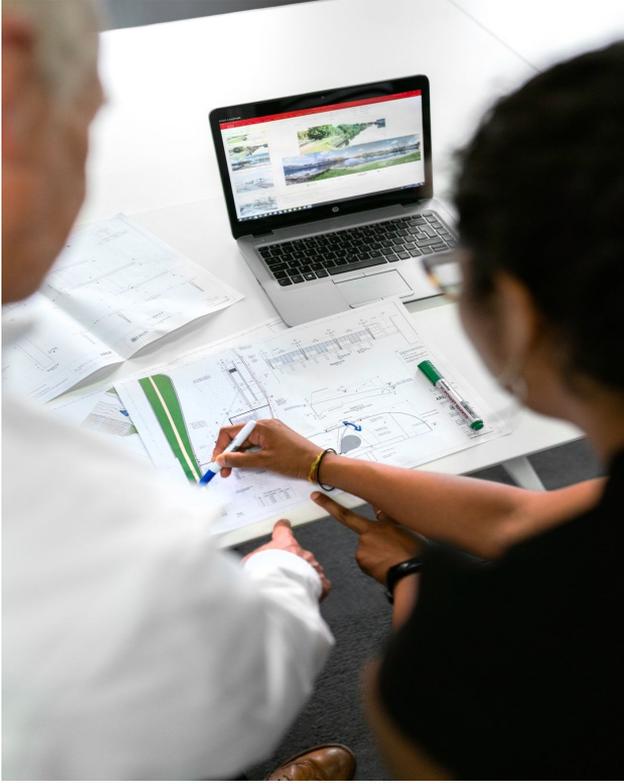
# التحليل الستاتيكي اللاخطي (Nonlinear Static Analysis)

بلدية مدينة الشارقة

بقلم المهندس / مضر عبد الرحمن الحاج يونس



تقدم هذه المقالة إجراءات التحليل المطلوبة لتقييم أداء الأبنية القائمة، والتحقق من تصميم التأهيل الزلزالي حيث توجد طرق تحليل متنوعة خطية ولاخطية لتحليل الأبنية البيتونية القائمة، ومنها: الطريقة الطيفية الاستطاعية **Pushover over analysis** وهي تستخدم تقاطع منحنى الاستطاعة **Capacity (الدفع)** مع طيف الاستجابة **Response spectrum** المخفض لتقدير الانتقال الأعظمي، وهذه الطريقة تفيد في تحديد ميكانيكية التدمير وطريقة إعادة توزيع العزوم في كل مرة يتم تشكل مفصل لدن **Plastic Hinge** .



## طريقة إنجاز التحليل اللاخطي المبسط:

ثمة عنصران أساسيان في طريقة التصميم المبينة على الأداء وهما الطلب (Demand) و الاستطاعة (Capacity) حيث يمثل الطلب تمثيل للحركة الأرضية الزلزالية بينما الاستطاعة تمثيل لقدرة المنشأ على مقاومة الطلب الزلزالي. أما الأداء (Performance) فيكون تابع للأسلوب الذي من خلاله تكون الاستطاعة قادرة على التعامل مع الطلب أي أن المنشأ يجب أن يكون لديه الاستطاعة ليقاوم طلبات الزلازل ليكون أداء المنشأ متوافق مع أهداف التصميم .

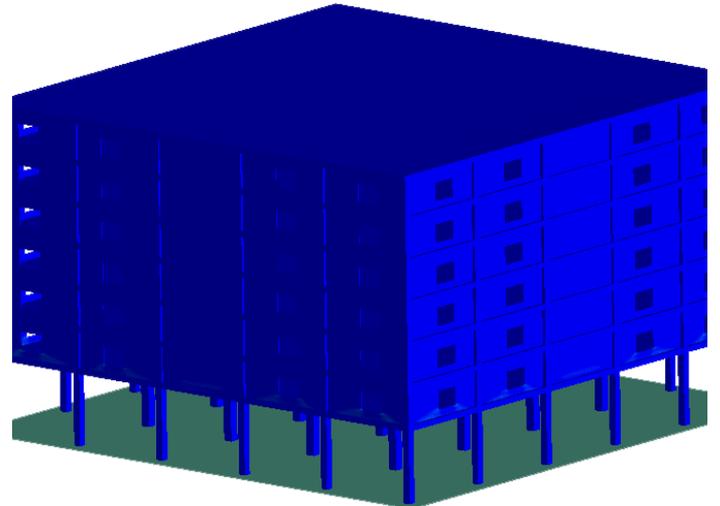
الاستطاعة (Capacity): تعتمد الاستطاعة الكلية للمنشأ على مقاومات واستطاعات التشوه للمركبات المستقلة للمنشأ، و لتحديد الاستطاعات بعد الحدود الخطية فإن نوع من التحليل اللاخطي مثل الطريقة الدفعية (Pushover Method) تكون مطلوبة، حيث يستخدم هذا الإجراء سلسلة من التحاليل المرنة المتتابعة و تراكب بعدها حتى تقارب منحنى الاستطاعة بدلالة العلاقة بين القوة والانتقال للمنشأ ككل، و يعدل النموذج الرياضي للمنشأ ليأخذ بالاعتبار المقاومة المخفضة للمركبات التي دخلت في مرحلة الخضوع Yield، ومن ثم تطبق القوى الجانبية مرة ثانية حتى تصل مركبات أخرى للخضوع وتستمر هذه العملية حتى يصبح المنشأ غير مستقر أو حتى يصل للحد المطلوب مسبقاً . وإن منحنيات الاستطاعة الدفعية تعطي تقريباً سلوك المنشأ بعد تجاوز مرحلة الخضوع أو اللدونة.



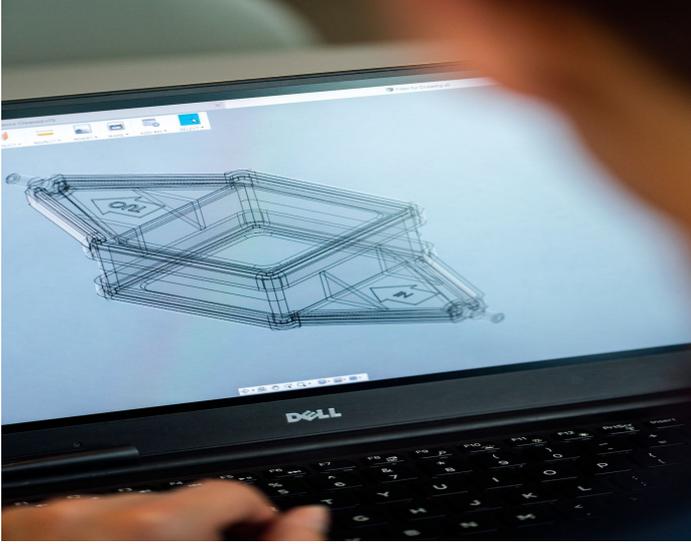
الطلب (Demand): إن المركبات الأرضية أثناء الزلازل تؤدي إلى أنماط انتقال معقدة في المنشأ والتي قد تختلف مع الزمن وتتبع هذه الحركة عند كل خطوة زمنية لتحديد المتطلبات التصميمية الإنشائية يعتبر غير عملي.

إن طرائق التحليل الخطية تستخدم القوى الجانبية لتوضيح الشرط التصميمي المتعلق بالانتقال، وفي حالة الطرائق اللاخطية فإن من الأسهل وبشكل مباشر استخدام مجموعة من الانتقالات الجانبية كشرط تصميمي، ومن أجل منشأ معطى وحركة أرضية معينة يكون الطلب على الانتقال عبارة عن تقدير للاستجابة المتوقعة الأعظمية خلال الحركة الأرضية.

الأداء (Performance): حالما يتم تحديد منحنى الاستطاعة والانتقال المطلوب فإنه يمكن التحقق من الأداء، حيث أن التحقق من الأداء يثبت أن المركبات الإنشائية لم تتجاوز مرحلة الضرر الموصوفة في هدف الأداء تحت تأثير القوى والانتقالات المتضمنة في الطلب على الانتقال.



## طريقة الخطوة - خطوة لتحديد الاستطاعة ) ( Capacity



إن استطاعة المنشأ تمثل بالمنحنى الدفعي **Pushover Curve** والطريقة المناسبة هي رسم منحنى العلاقة بين القص القاعدي **Base Shear** وانتقال السقف الأخير **Displacement**، وينشأ منحنى الاستطاعة بشكل عام ليتمثل استجابة النمط الأول للاهتزاز **First Mode** ويفرض أن النمط الأول للاهتزاز يعبر عن الاستجابة السائدة للمنشأ وهذا صحيح إلى حد كبير من أجل الأبنية ذات أذوار الاهتزاز **Periods** حتى 1 ثانية تقريباً بينما من أجل منشآت أكثر ليونة مع أذوار تزيد على 1.0 ثانية فإن المحلل يجب أن يفكر بتأثير الأنماط العالية في التحليل وفيما يلي شرح لآلية عمل هذه الطريقة:

**المستوى الأول** : طبق ببساطة قوة أفقية مفردة في سقف الطابق الأخير وتطبق للأبنية ذات الطابق الواحد.

1- يتم عمل المنشأ وفق مبادئ نمذجة العناصر.

**المستوى الثاني** : طبق قوى أفقية عند كل طابق بالتوافق مع طريقة الكود و لكن بدون القوة **Ft** عند القمة أي:

2- يصنف كل عنصر في النموذج على أنه إما رئيسي أو ثانوي.

3- تطبق القوى الجانبية في كل طابق بالتناسب مع حاصل جداء

$$\sum F_x = (w_x * h_x) / W$$

الكتلة **mass** بإحداثيات نمط الاهتزاز وإن هذا التحليل يجب أن

**المستوى الثالث** : طبق قوة جانبية بالتناسب مع جداء كتل الطوابق و نمط الاهتزاز الأول المرين للمنشأ أي:

يشمل القوى الرأسية **Vertical Loads**

$$\sum F_x = (w_x * \phi_x) / W$$

حيث أن منحنى الاستطاعة ينشأ بشكل عام ليتمثل استجابة النمط الأول للمنشأ بناء على افتراض أن نمط الاهتزاز الأساسي هو نمط استجابة.

كما يدل اسمها فإن الطريقة الدفعية هي عملية دفع المنشأ أفقياً بواسطة نمط معين للقوى بشكل تدريجي حتى يصل المنشأ إلى الحالة الحدية الموصوفة، وهناك عدة مستويات من التعقيد يمكن استخدامها من أجل التحليل الدفعي وأيضاً هناك عدة مستويات لتطبيق القوى الأفقية ويوصف المستوى الثالث منها بالطريقة الأساسية ولكن المستوى الرابع يكون مطلوباً للأبنية ذات الطابق الضعيف **weak story** والمستوى الخامس يكون مطلوباً للأبنية العالية والأبنية غير المنتظمة التي تسبب أنماط اهتزاز أخرى مساهمة غير النمط الأساسي وفيما يلي شرح لهذه المستويات:

**المستوى الرابع** : هو نفسه المستوى الثالث حتى الخضوع الأول و من أجل كل زيادة ما بعد الخضوع تعدل القوى بالتناسب مع شكل التشوه المتغير.

**المستوى الخامس** : مشابه للمستوى 3 و المستوى 4 أعلاه ولكنه يتضمن تأثير الأنماط العليا للاهتزاز في تحديد الخضوع في العناصر الإنشائية بينما يتم رسم منحنى الاستطاعة للبناء بدلالة القوى الجانبية للنمط الأول مع الانتقال. و إن تأثير الأنماط العليا يمكن تحديده عن طريق إجراء التحليل الدفعي للأنماط العليا ( أي يمكن للأحمال أن تطبق بالتدرج المناسب مع نمط الاهتزاز الدروس لتحديد سلوكه اللامر ( و من أجل الأنماط العليا فإن المنشأ يدفع و يسحب بنفس الوقت للحفاظ على نمط الاهتزاز المدروس



4 - احسب قوى العناصر للتركيب المطلوب للأحمال الشاقولية والافقية .

5 - عدل مستوى القوى الجانبية بحيث أن عنصر ما أو مجموعة من العناصر تجهد لدرجة تقل أو تزيد بمقدار 10% عن مقاومتها . وإذا وصل أحد العناصر وجدار قص مثلاً وإلى مقاومته فإن هذا العنصر يعتبر غير قادر على أخذ قوى جانبية إضافية، ومن أجل المنشآت ذات العناصر الكثيرة فإن تتبع وتسلسل التحليل عند كل حالة خضوع لعنصر يعتبر غير ضروري ويستهلك الكثير من الوقت، لذلك تجمع العناصر في مجموعات ذات نقاط خضوع موحدة.

إن معظم المنشآت يمكن تحليلها باستخدام 15 زيادات في القوى بينما المنشآت البسيطة يمكن الاكتفاء باستخدام 3-4 خطوات .

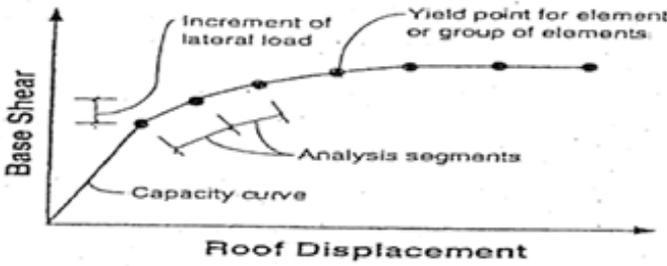
6 - سجل قوة القص القاعدي وانتقال السقف الأخير ومن المفيد أيضاً تسجيل القوى الداخلية في العناصر مع الدورانات لأننا نحتاجها عند تدقيق الأداء.

7 راجع النموذج باستخدام قساوة صفرية أو صغير جداً للعناصر التي تعرضت للخضوع.

8 - طبق تزايد جديد للقوى الجانبية للمنشأ المعدل بحيث أن عنصر آخر أو مجموعة من العناصر تصل أيضاً للخضوع . حيث أن القوى والدورانات الفعلية للعناصر عند بداية كل تزايد تساوي تلك التي كانت عند نهاية التزايد السابق و لكن يعتبر تطبيق كل تزايد للقوى الجانبية عملية تحليل منفصلة تبدأ من الوضع الصفري لذلك لتحديد متى يكون الخضوع التالي يجب إضافة القوى من التحليل الراهن إلى مجموع القوى الناتجة من التزايدات السابقة و بشكل مشابه لتحديد دوران العنصر يجب إضافة الدورانات من التزايدات السابقة.

9- أضف تزايد القوى الجانبية وتزايد انتقال السقف الأخير إلى المجاميع السابقة لإعطاء القيم المتركمة للقص القاعدي وانتقال السقف.

10 - كرر الخطوات 7 و 9 حتى يصل المنشأ إلى الحالة الحدية مثل عدم الاستقرار تحت تأثير العمل  $P-\Delta$  أي تشوهات تتجاوز مستوى الأداء المطلوب أو أن عنصر أو مجموعة من العناصر وصلت إلى مستوى تشوه جانبي يحصل عنده تدهور هام في المقاومة أو أن عنصر أو مجموعة من العناصر وصلت إلى مستوى تشوه جانبي يحصل عنده فقدان القدرة على تحمل القوة الرأسية يمثل الشكل رقم 1 نموذجاً لمنحني الاستطاعة .

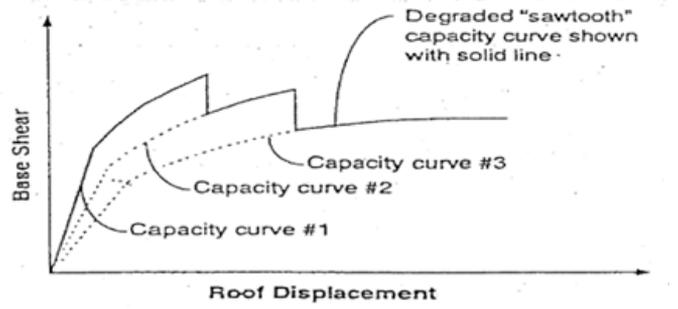


الشكل (1)

11 - يمكن نمذجة تدهور المقاومة العامة للمنشأ بوضوح إذا تم إيقاف الحمل المتزايد عند الخطوة 10 نتيجة لوصول مستوى التشوه الجانبي إلى درجة تصبح عندها عدد من العناصر أو كلها غير قادرة على مقاومة الأحمال بمعنى أن مقاومتها قد تناقصت إلى حد كبير عندها تخفض قساوة تلك العناصر أو تحذف و عندها يتم إنشاء منحني استطاعة جديد بدءاً من الخطوة 3 و يمكن إنشاء منحنيات دفعية إضافية بحسب الضرورة للتعريف الكافي بالتدهور العام للمقاومة ويوضح شكل رقم 2 هذه العملية حيث يوجد ثلاث منحنيات استطاعة مختلفة قد تم رسمها . بعد ذلك يتم رسم منحني الاستطاعة النهائي حيث يتبع بداية المنحني الأول ثم هناك منطقة انتقالية للمنحني الثاني عند انتقال يقابل التدهور الأول للمقاومة و هكذا سيكون للمنحني شكل أسنان المنشار كما هو مبين في الشكل رقم 3 .

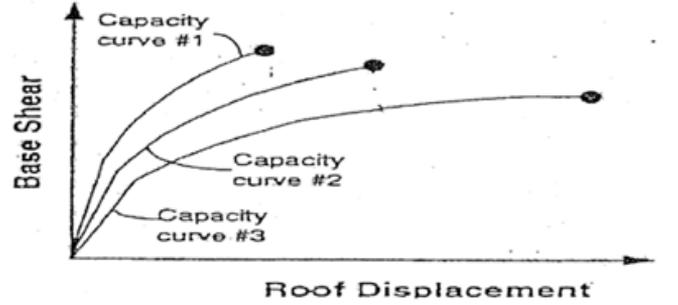
إن موقع نقطة الأداء يجب أن يحقق علاقيتين :

1 - يجب أن يكون موقع النقطة على منحنى طيف الاستطاعة حتى يمثل المنشأ عند الانتقال المعطى .



الشكل (3)

2 - يجب أن تقع النقطة على منحنى الطلب الطيفي بعد أن يخفض الطيف التصميمي المرن ذي التخامد 5% وذلك ليمثل الطلب اللاخطي عند نفس قيمة انتقال المنشأ و يمثل الشكل أدناه موقع نقطة الأداء .



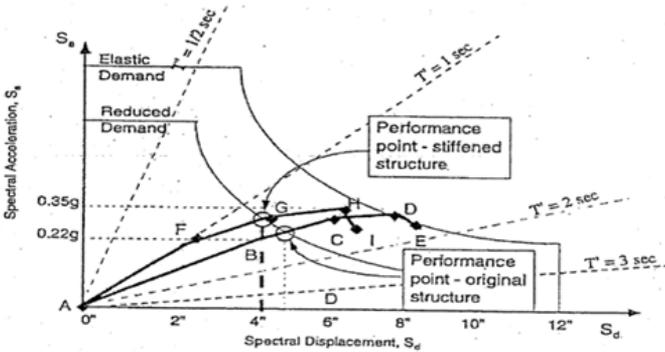
الشكل (2)

و من أجل هذه الطريقة يتم عادة إعطاء معامل تخفيض طيفية بدلالة التخامد الفعال . و يحسب التخامد الفعال التقريبي بناء على شكل منحنى الاستطاعة و الطلب على الانتقال و الحلقة الهستيرية الناتجة . في الحالة العامة يتطلب تحديد نقطة الأداء عدة محاولات بحث (طريقة الخطأ و الصواب ) و ذلك لتحديد المعيارين المحددين أعلاه . و في المقالات اللاحقة سنكمل ما بدأناه للوصول إلى الأداء المطلوب للمنشأ .

## الطريقة الطيفية الاستطاعية في تحديد الطلب

### (Demand)

إن تحديد منحنى الاستطاعة للمنشآت القائمة هو عملية مفيدة جدا للمهندس حيث أنه يعطي رؤية هامة عن خواص أداء البناء بالإضافة إلى طرائق التأهيل **Strengthen** . و لكن حتى نحكم على قبولية هدف **Target** أداء معطى للبناء سواء قبل التأهيل أو بعده يجب تقدير الانتقال الأعظمي المحتمل لحركة أرضية معينة . و للتحقق من الوصول إلى مستوى الأداء المعطى يجب تحديد الانتقال منحنى الاستطاعة بالتوافق مع منحنى الطلب الزلزالي . و سيتم هنا شرح طريقة طيف الاستطاعة و هي مبنية على إيجاد نقطة على منحنى الاستطاعة و أن تكون موجودة أيضا على منحنى طيف الاستجابة المناسب الذي يمثل الطلب بعد تخفيضه لأخذ تأثير اللاخطية . و إن الانتقال المطلوب في الطريقة الطيفية الاستطاعية يحدث عند نقطة على الطيف الاستطاعي تسمى نقطة الأداء و تمثل هذه النقطة حالة تساوي الاستطاعة الزلزالية للمنشأ مع الطلب الزلزالي المفروض عليه بواسطة الحركة الأرضية .



المقالة مشتقة من محاضرات المعهد العالي للبحوث و الدراسات الزلزالية - دمشق