Seismic Rehabilitation of Reinforced Concrete and Steel Structures Course

Lecture -1

Damping and Energy Dissipation

Dr.Eng. Dalia Najjar

2019-2020

1- مقدّمة Introduction:

تعرّف الطّاقة الكليّة النّاتجة عن تطبيق عمل خارجي على المنشأ بأنّها عبارة عن مجموع الطّاقة الدّاخليّة المؤثّرة ضمن عناصر المنشأ والطّاقة المبدّدة ضمن المنشأ، وإذا رمزنا للطّاقة الكليّة بالرّمز ET والطّاقة الدّاخلية بالرّمز EI والطّاقة المبدّدة المتأصّلة بالرّمز ED والطّاقة المبدّدة بوسائل تبديد الطّاقة بالرّمز EP عندئذ تُعطى علاقة الطّاقة بالشّكل.

$$ET = EI + ED + EP$$

تُقسم الطّاقة الدّاخليّة EI إلى جزئين أساسيّين:

- الطّاقة الحركيّة Kinetic Energy KE.
- الطّاقة الكامنة Potential Energy PE.

تُعطى الطّاقة الحركيّة والطّاقة الكامنة بالعلاقتين التّاليتين:

$$K_E = \frac{1}{2}(M\,u^{\cdot 2})$$
$$P_E = \frac{1}{2}(K\,u^2)$$

Dr. Eng. Dalia Najjar

كذلك تُقسم الطّاقة الكامنة PE إلى جزئين أساسيّين:

- طاقة التّشوّه المرنة المُسترجعة (PE_E).
- طاقة التّشوّه اللدنة المتبقّية (PE_P)، حيث تكون قيمتها معدومة ضمن المجال المرن (لا يوجد تشوّهات لدنة).

يمكن أن يُلاحظ بشكل بسيط أنّه باعتبار المنشأ سيبقى ضمن المجال المرن وبإهمال موضوع تبديد الطّاقة فإنّ:

$$ET = EI = contant$$

$$EI = KE + PE = contant$$

ومن الجدير بالذّكر أنّه بتعويض قيم KE,PE في العلاقة السّابقة واشتقاق طرفي العلاقة نحصل على معادلة الحركة (Equation of Motion) الموضّحة بالعلاقة التّالية وذلك بحالة الاهتزاز الحرّ، وهذا ما يُدعى بقانون حفظ الطّاقة.

$$M\,u^{\cdot\cdot} + K\,u = 0$$

Dr. Eng. Dalia Najjar

تمثّل المعادلة السّابقة معادلة الحركة الدّيناميكيّة لمنشأ وحيد درجة الحرّية بإهمال موضوع تبديد الطّاقة (التّخامد) واعتبار الاهتزاز الحرّ، ولكن بالحقيقة فإنّ موضوع تبديد الطّاقة يُعتبر من الأمور الأساسيّة في علم الدّيناميك، لذلك سيتمّ التّركيز عليه في الفقرات اللاحقة. بأخذ موضوع تبديد الطّاقة بعين الاعتبار فإنّ معادلة الحركة الدّيناميكيّة لمنشأ وحيد درجة الحريّة تُعطى بالشّكل.

$$M\,u^{\cdot\cdot} + C\,u^{\cdot} + K\,u = 0$$

2- مصادر تبديد الطّاقة Resources of Energy Dissipation:

- طاقة التّشوّه اللدنة المتبقّية PE_P والنّاتجة عن بلوغ العناصر الإنشائيّة مرحلة اللدونة وبالتّالي تشكّل المفاصل اللدنة وحدوث الأضرار، وترتبط بمفهوم التّخامد الهيستيري.
- الطّاقة المبدّدة المتأصّلة ضمن المنشأ ED، وترتبط بمفهوم التّخامد اللزج.
- الطّاقة المبدّدة بوسائل تبديد الطّاقة EP، وترتبط بمفهوم التّخامد الهيستيري.

Dr. Eng. Dalia Najjar

ويمكن القول بشكلٍ مبسّطٍ أنّ نسبة التّخامد الكلّي والذي يُدعى في معظم المراجع بـ (نسبة التّخامد اللزج المكافئ) هو عبارة عن مجموع نسبة التّخامد اللزج ونسبة التّخامد الهيستيري. ونظراً لأهميّة مصطلح (التّخامد) ضمن هذه المحاضرة لذلك سيتمّ التّعرف على مفهوم التّخامد وأنواعه في الفقرات القادمة.

3- أنواع التّخامد Types of Damping:

يعرّف التّخامد بشكلٍ مختصرٍ بأنّه الحالة التي تؤدّي إلى ممانعة المنشأ للحركة، ويُقسم إلى الأنواع الثّلاثة التّالية:

- ✓ التّخامد اللزج (المائع) Viscous Damping.
- ✓ التّخامد الهيستيري (الإنشائي) Hysteresis Damping , Structural Damping.
- ✓ التّخامد الجاف Coulomb Damping , Dry Damping.

3-1- التّخامد اللزج (المائع) Viscous Damping:

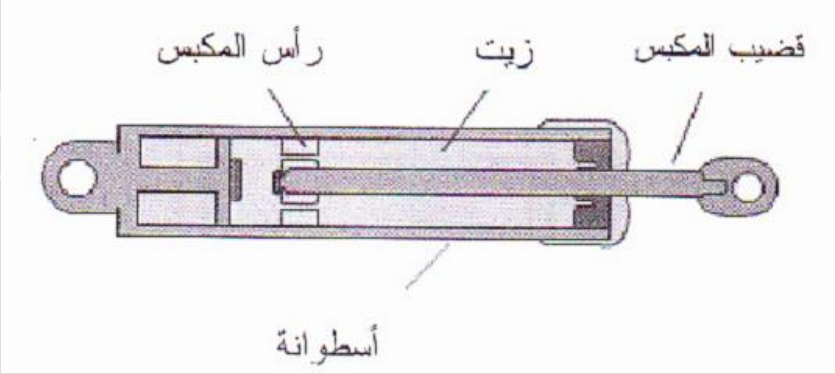
يُستخدم عادةً التّخامد اللزج أو التّخامد المتأصّل (Inherent Damping) لتمثيل الطّاقة المبدّدة في المنشأ وذلك ضمن المجال المرن، حيث أنّ تبديد الطّاقة ذلك ينتج عن عدّة عوامل بما فيها الظّواهر الطّبيعيّة، نذكر أهمّ تلك العوامل: (اللاخطيّة في الحالة المرنة من الاستجابة، الاحتكاك بين العناصر الإنشائية وغير الإنشائية والتّفاعل بين العناصر غير الإنشائيّة، تبديد الطّاقة ضمن الأساس، التّفاعل بين التّربة والمنشأ، ممانعة ذرّات الهواء لحركة المنشأ)، وباعتبار صعوبة تحديد أثر كلّ ظاهرة على التّخامد لذلك فإنّ التّخامد اللزج يمثّل الأثر المشترك لكلّ آليات تبديد الطّاقة السّابقة، كما ويُرمز لهذا التّخامد في معظم المراجع بـ ع.

Dr. Eng. Dalia Najjar

يمكن القول بشكلٍ مبسّطٍ بأنّ مقدار التّخامد في هذا النّوع يتناسب مع سرعة المنشأ، ويمكن تمثيله بقوّة مانعة للحركة تتناسب مع السّرعة Vc وقيمة ثابت التّخامد C، حيث تُعطى هذه القوّة بالعلاقة التّالية:

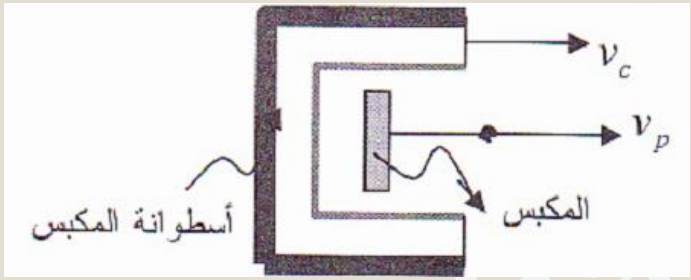
$$F_D = c \cdot v_c$$

يُسمى هذا النّوع من التّخامد بالتّخامد اللزج لأنّ قوى التّخامد في هذه الحالة تشبه الحالة ضمن مكبس هيدروليكي كما هو موضّح بالشّكل التّالي، حيث يمكن تمثيل هذه الحالة بوسط أشبه بحالة تغطيس المنشأ ضمن سائل وتركه يتحرّك فيه.



Dr. Eng. Dalia Najjar

يمكن التّعبير عن التّخامد اللزج الممثّل بالمكبس ضمن النّموذج الرّياضي الموضّح في الشّكل التّالي.



حيث أنّ الفرق بين حركة اسطوانة المكبس وحركة المكبس يتمّ تمثيلها بحساب فرق السّرعة بين سرعة اسطوانة المكبس Vc وسرعة المكبس Vp، وبالتّالي تُعطى قوّة التّخامد FD بالعلاقة التّالية:

$$F_D = \Delta v.c$$

يُلاحظ من العلاقة السّابقة بأنّ ثابت التّخامد C هو حاصل قسمة قوّة التّخامد إلى فرق السّرعة، وبالتّالي فإنّ واحدة ثابت التّخامد وفق الواحدات الدّوليّة تُعطى بـ **N.sec/m**

Dr. Eng. Dalia Najjar

يمكن إظهار **نسبة** التّخامد اللزج في معادلة الحركة لمنشأ وحيد درجة الحريّة SDOF من العلاقة التّالية المذكورة سابقاً:

$$M\,u^{\cdot\cdot} + C\,u^{\cdot} + K\,u = 0$$

بعد تقسيم طرفي العلاقة على M (كتلة المنشأ)، فينتج لدينا العلاقة التّالية:

$$\ddot{u} + 2\xi\varpi_n\dot{u} + \varpi_n^2 u = 0$$

حيث ω_n: تواتر الاهتزاز الطّبيعي ويُعطى بالعلاقة:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

كذلك فإنّ قيمة ثابت التّخامد C تُعطى بالعلاقة:

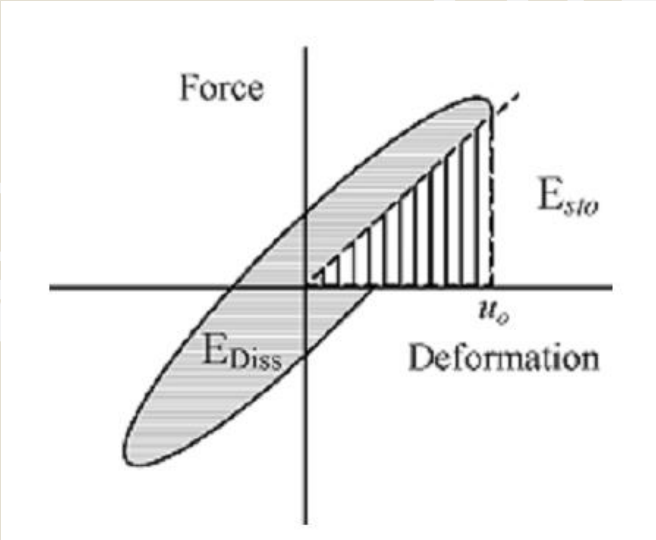
$$C = 2\,\xi\,M\,\omega_n$$

Dr. Eng. Dalia Najjar

وبالتّالي فإنّ نسبة التّخامد اللزج يُعطى بالعلاقة التّالية:

$$\xi = C / C_{cr} = C / 2\,M\,\omega_n$$

يوضّح الشّكل التّالي الطّاقة المختزنة والمبدّدة في حالة التّخامد اللزج.



Dr. Eng. Dalia Najjar

يقدّم العرض السّابق فكرة بسيطة عن مفهوم نسبة التّخامد اللزج وكيفيّة حسابه وذلك من أجل منشأ وحيد درجة الحريّة، وبينما من أجل منشأ متعدّد درجات الحريّة MDOF فلابدّ عندئذ من حساب نسبة التّخامد اللزج أو ما يدعى بـ (نسبة التّخامد المرن البدائي) من علاقة ريلي والتي تُعطى بالشّكل التّالي:

$$\xi = \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\omega_n} + \beta\omega_n\right)$$

حيث ω_n: تواتر الاهتزاز الطّبيعي، α: معامل تابع لتخامد الكتلة الجزئي، β: معامل تابع لتخامد الصّلابة الجزئي، كما أنّ المعاملين السّابقين يتعلّقان بنوع المنشأ، المواد المستخدمة، شدّة وطور الاهتزاز.

يتمّ غالباً افتراض قيمة لنسبة التّخامد اللزج مساوية لـ 5%. بالنّظر للعلاقة السّابقة يُلاحظ وجود معادلة حلّ واحدة ومجهولان وبالتّالي نحن بحاجة إلى معادلة ثانية لكي يتمّ إيجاد قيم معاملات التّخامد α و β وذلك وفق ما يلي.

تمثّل العلاقة التّالية معادلة الحلّ الأولى حيث ω_1: تواتر الاهتزاز الطّبيعي الأصغري (الأساسي).

$$\xi = \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\omega_1} + \beta\omega_1\right)$$

Dr. Eng. Dalia Najjar

كما وتمثّل العلاقة التّالية معادلة الحلّ الثّانية حيث $\kappa\omega_1$: تواتر الاهتزاز الطّبيعي الأعظمي.

$$\xi = \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\kappa\omega_1} + \beta\kappa\omega_1\right)$$

بطرح المعادلة الثّانية من المعادلة الأولى المضروبة بـ κ نحصل على العلاقة التّالية:

$$\xi(\kappa - 1) = \frac{\alpha}{2\omega_1}\left(\frac{\kappa^2 - 1}{\kappa}\right)$$

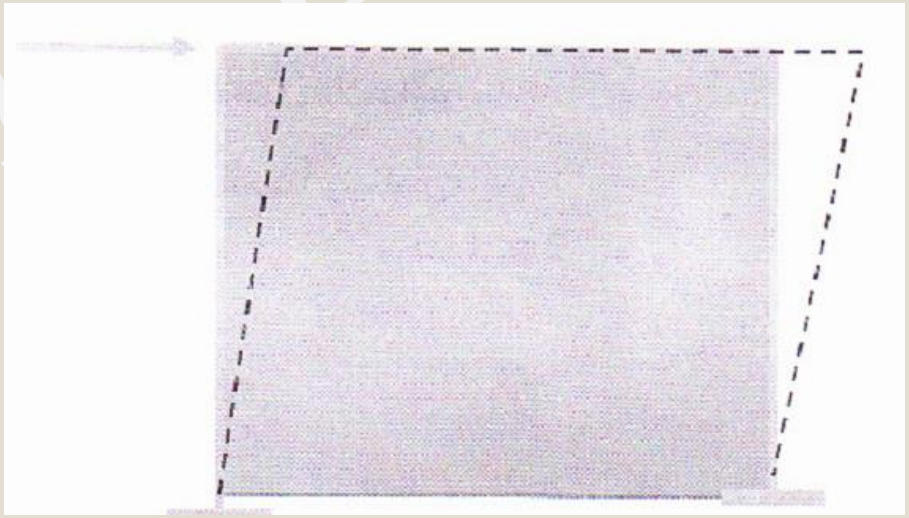
وبمعرفة قيم كلّ من ξ و κ و ω_1 يمكن حساب قيمة معامل التّخامد α ومن ثمّ حساب معامل التّخامد β، كما ويمكن القول أخيراً أنّ تخامد ريلي غير شائع الاستخدام في منشآت وحيدة درجة الحريّة لأنّ تحديده يتطلّب نمطي اهتزاز على الأقلّ.

Dr. Eng. Dalia Najjar

2-3- التّخامد الهيستيري (الإنشائي) Hysteresis Damping:

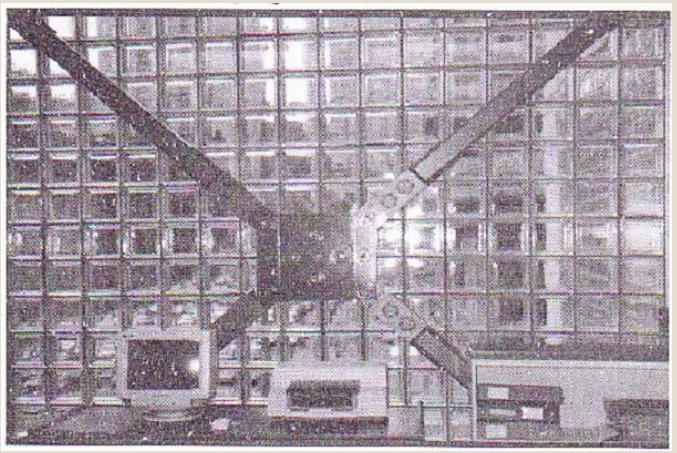
يُستخدم عادةً التّخامد الهيستيري أو التّخامد الإنشائي لتمثيل الطّاقة المبدّدة في المنشأ، حيث أنّ تبديد الطّاقة ذلك ينتج عن عدّة عوامل أهمّها: (احتكاك جزيئات المادّة مع بعضها البعض ضمن الجسم المتحرّك، الاحتكاك النّاتج عن مقاومة الجسم للتّشوّهات النّاتجة عن الشّد والضّغط والانعطاف، الاحتكاك بين العناصر الإنشائيّة المكوّنة للمنشأ..)، كما ويرمز لهذا التّخامد في معظم المراجع بـ ξ_{hyst}.

يظهر الشّكل التّالي مثال عن حالة احتكاك جزيئات المادّة مع بعضها البعض ضمن الجسم المتحرك، حيث يبيّن الشّكل التّخامد الإنشائي في الجدار القصّي وذلك حسب طبيعة المادّة المكوّنة له.



Dr. Eng. Dalia Najjar

يظهر الشّكل التّالي مثال آخر عن حالة الاحتكاك بين العناصر الإنشائيّة المكوّنة للمنشأ، حيث يبيّن الشّكل التّخامد الإنشائي النّاتج عن الاحتكاك بين عناصر مخمّد الاحتكاك.



تُعطى العلاقة العامّة للتّخامد الهيستيري كما يلي:

$$\xi_{hyst} = \frac{2}{\pi}\frac{A_1}{A_2}$$

حيث A_1: مساحة الحلقة الهيستيريّة النّاتجة **كاملةً**، A_2: مساحة المستطيل المغلّف للحلقة الهيستيريّة.

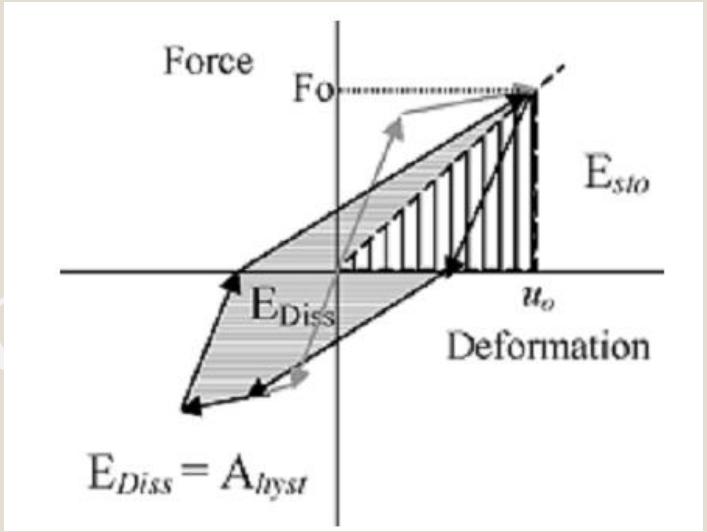
أو يُعطى التّخامد الهيستيري بشكله العام بالعلاقة التّالية:

$$\xi_{hyst} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_{Diss}}{E_{sto}} = \frac{1}{2\pi}\frac{A_{hyst}}{F_o u_o}$$

Dr. Eng. Dalia Najjar

حيث E_{Diss}: الطّاقة المبدّدة، E_{sto}: الطّاقة المرنة المختزنة، A_{hyst}: مساحة الحلقة الهيستيريّة النّاتجة، F_O: القوّة الأعظميّة u_O: الانتقال الأعظمي.

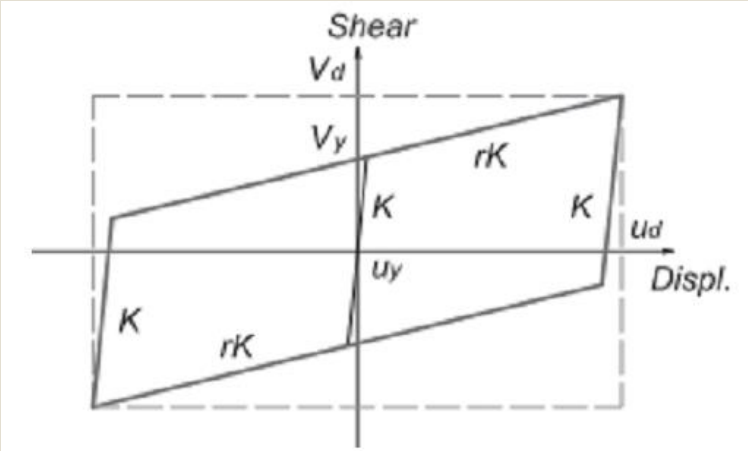
والشّكل التّالي يبيّن الطّاقة المختزنة والمبدّدة في حالة التّخامد الهيستيري.



باعتبار أنّ شكل الحلقة الهيستيريّة ومساحتها يختلف من نموذج لآخر، وبإدخال مفهومي مطاوعة المنشأ μ (نسبة الانتقال الأعظمي ud إلى الانتقال عند الخضوع uy) والنّسبة r (نسبة الصّلابة بعد التلدّن إلى الصّلابة قبل التلدّن) ضمن العلاقة العامة السّابقة، عندئذ يمكن أن نذكر على سبيل الذّكر لا الحصر قيم التّخامد الهيستيري من أجل:

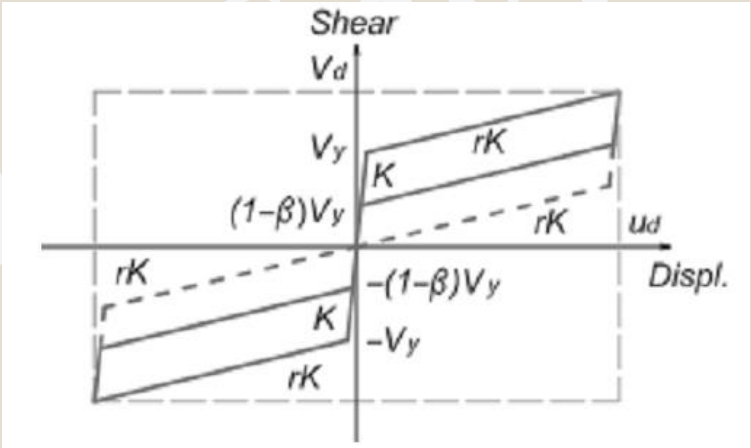
Dr. Eng. Najjar

❑ نموذج مرن–لدن كما هو موضّح بالشّكل التّالي:



$$\xi_{hyst} = \frac{2}{\pi}\frac{(\mu-1)(1-r)}{\mu(1+r\mu-r)}$$

❑ نموذج من الشّكل Flag كما هو موضّح بالشّكل التّالي:



$$\xi_{hyst} = \frac{1}{\pi}\frac{\beta(\mu-1)(1-r)}{\mu(1+r\mu-r)}$$

Dr. Eng. Dalia Najjar

هناك العديد من الأبحاث التي تهمل دور التّخامد اللزج بسبب قيمته الصّغيرة نسبيّاً مقارنةً مع التّخامد الهيستيري، كما وقد جرت العادة في معظم الدّراسات على الأبنية البيتونيّة على اعتبار قيمة ثابتة لنسبة التّخامد اللزج مساوية لـ 5% وعلى قيمة أصغر من تلك بالنّسبة للمنشآت المعدنيّة، وما تزال الأبحاث مستمرّة على موضوع تحديد هذه النّسبة بدقّة لكونها تعتمد على قيمة الصّلابة التي تتغيّر عند دخول المنشأ في المجالات اللدنة، حيث يتمّ في هذه الحالة تعديل نسبة التّخامد اللزج باستخدام معاملات معينة تتعلّق بشكل أساسي بمطاوعة المنشأ μ (نسبة الانتقال الأعظمي إلى الانتقال عند الخضوع) والنّسبة r (نسبة الصّلابة بعد التلدّن إلى الصّلابة قبل التلدّن).

يُعتبر موضوع تحديد نسبة التّخامد اللزج المكافئ Equivalent Viscous Damping من الأمور الهامّة، وخطوة أساسيّة في طريقة التّصميم المعتمدة على الانتقالات، وبالتّالي فإنّ نسبة التّخامد اللزج المكافئ هي مجموع كلّ من التّخامد اللزج والتّخامد الهيستيري وذلك وفق العلاقة التّالية:

$$\xi_{eq} = \xi + \xi_{hyst}$$

Dr. Eng. Dalia Najjar

اهتمّت الكثير من الأبحاث بتحديد نسبة التّخامد اللزج المكافئ من خلال وضع العديد من العلاقات التي تعطي قيم التّخامد الهيستيري سواء من أجل نماذج مختلفة للسّلوك الدّيناميكي كما رأينا سابقاً أو من أجل عناصر إنشائيّة مختلفة، يمكن تلخيص بعض العلاقات التي تعطي نسبة التّخامد اللزج المكافئ كما يلي:

❖ **من أجل العناصر الفولاذيّة:**

$$\xi_{eq} = 5 + \frac{150}{\mu\pi}(\mu - 1)$$

❖ **من أجل الإطارات البيتونيّة:**

$$\xi_{eq} = 5 + \frac{120}{\pi}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right)$$

❖ **من أجل الأعمدة البيتونيّة والجدران:**

$$\xi_{eq} = 5 + \frac{95}{\pi}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right)$$

Dr. Eng. Dalia Najjar

❖ **من أجل الإطارات والجدران مسبقة الصّنع:**

$$\xi_{eq} = 5 + \frac{25}{\pi}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right)$$

حيث μ: مطاوعة المنشأ (نسبة الانتقال الأعظمي إلى الانتقال عند الخضوع)، r: (نسبة الصّلابة بعد التلدّن إلى الصّلابة قبل التلدّن).

يبسّط موضوع افتراض قيمة نسبة التّخامد اللزج المسألة الدّيناميكيّة بشكل كبير، حيث يمكن بتضمين نسبة التّخامد الهيستيري في معادلة الحركة الموضّحة بالعلاقة التّالية حلّ نظام خطّي بدلاً من النّظام اللاخطّي، ممّا يعني توفيراً في الجهد والوقت ويُعتبر ذلك فعّالاً في تطبيقات التّصميم.

$$\ddot{u} + 2\xi\varpi_n\dot{u} + \varpi_n^2 u = 0$$

Dr. Eng. Dalia Najjar

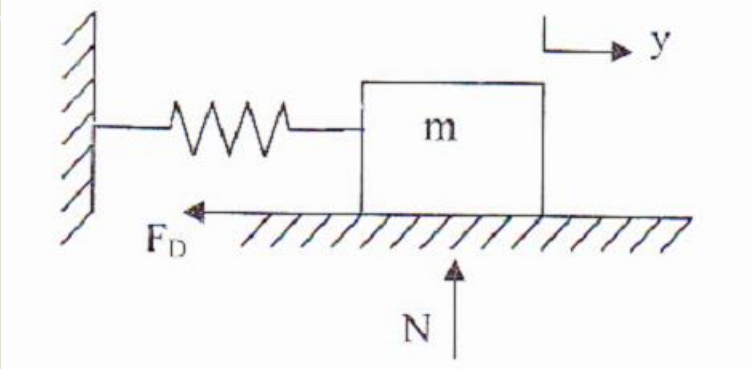
3-3- التّخامد الجاف Coulomb Damping:

يُقصد بالتّخامد الجاف أو تخامد كولومب التّخامد النّاتج عن الاحتكاك بين الجسم المتحرّك والمسند الجاف الملامس له، حيث تُعطى قوّة الاحتكاك الدّيناميكيّة FD بالعلاقة التّالية:

$$FD = \mu_K . N$$

حيث μ_K: ثابت الاحتكاك الحركي الدّيناميكي، N: المركّبة النّاظميّة لرد الفعل لوزن الكتلة (قوّة).

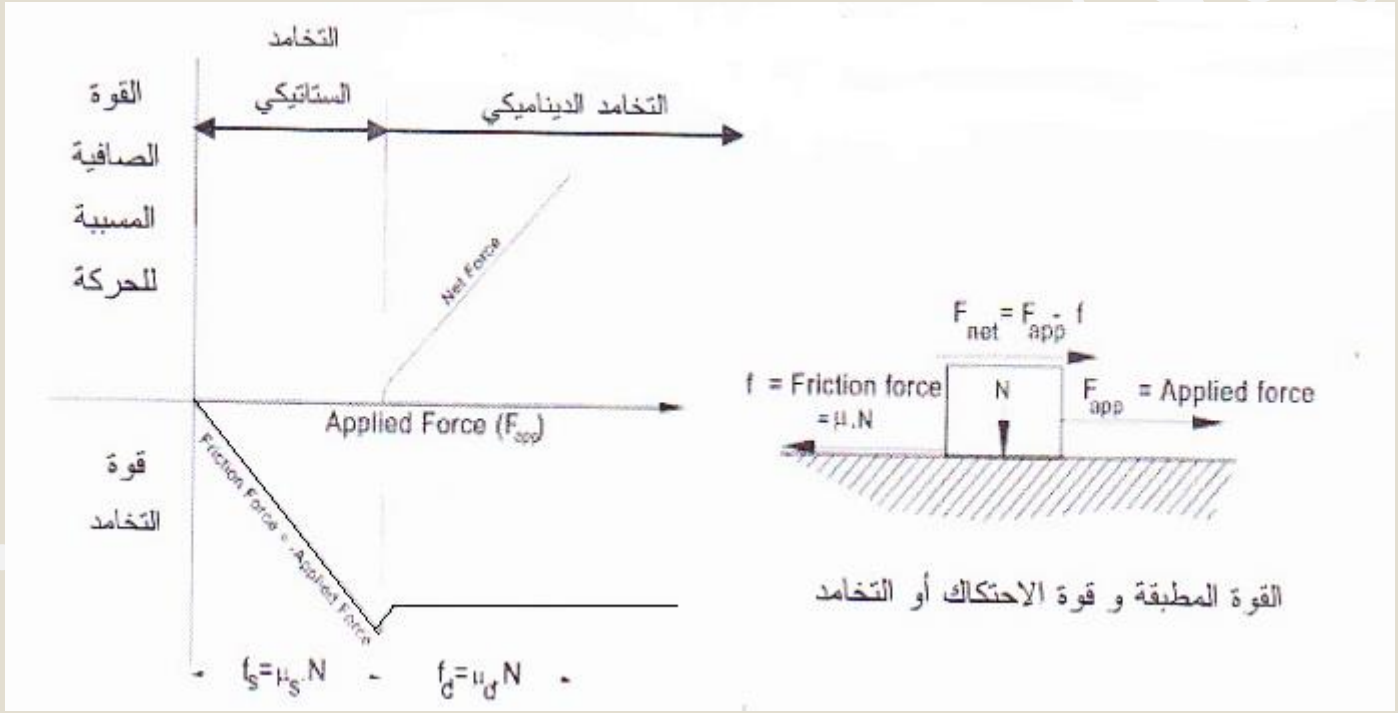
يمكن توضيح ذلك وفق الشّكل التّالي.



Dr. Eng. Dalia Najjar

يتمّ الاعتماد على ثابت الاحتكاك الحركي الدّيناميكي في حالة منشأ يتحرّك، بينما في حالة المنشأ الثّابت فيتمّ الاعتماد على ثابت الاحتكاك الستاتيكي μk، حيث أنّ قيمة ثابت الاحتكاك الستاتيكي أكبر من قيمة ثابت الاحتكاك الدّيناميكي.

يبيّن الشّكل التّالي كلاً من القوّة المطبّقة وقوّة الاحتكاك الستاتيكيّة وقوّة الاحتكاك الدّيناميكيّة.



Dr. Najjar

يوضّح الشكل السّابق أنّ قوّة الاحتكاك الستاتيكيّة تتزايد من الصّفر لتأخذ أكبر قيمة ويكون الجسم عندها في حالة سكون، وعندما يبدأ الجسم بالحركة تنخفض قوّة التّخامد وتصبح ثابتة، وتسمى عندها بقوّة التّخامد الدّينامكيّة، وباعتبار أنّ N ثابتة، وبالتّالي فإنّ قيمة ثابت الاحتكاك الستاتيكي أكبر من قيمة ثابت الاحتكاك الدّينامكي.

سطح التلامس	معامل الاحتكاك الستاتيكي μ_s	معامل الاحتكاك الحركي μ_k
فولاذ على فولاذ (جاف)	0.6	0.4
فولاذ على فولاذ (مشحم)	0.1	0.05
تفلون (Teflon) على فولاذ	0.04	0.04
فولاذ على سطح مبطن بمعدن (جاف)	0.4	0.3
فولاذ على سطح مبطن بمعدن (مشحم)	0.1	0.07
نحاس على فولاذ (جاف)	0.5	0.4
بطانة الفرامل على حديد صب	0.4	0.3
مطاط العجلات على طريق أملس (جاف)	0.9	0.8
سلك على بكرة معدنية (جاف)	0.2	0.15
حبل قنب على معدن	0.3	0.2
معدن على جليد	-	0.02

يبيّن الجدول المجاور قيماً نموذجيّة لمعامل الاحتكاك بنوعيه الستاتيكي والدّينامكي لبعض المواد المستخدمة في الأعمال الهندسيّة، علماً أنّ القيم ضمن ظروف الاستثمار الطّبيعيّة تختلف عن هذه القيم بنسب متفاوتة وذلك حسب التّطبيق الفعلي لها في الحياة العمليّة، والتي تعتمد بشكل أساسي على الظّروف المحيطيّة من شروط الاستناد مثل: استواء الاستناد ونظافته، سرعة الحركة أو الاهتزاز...

Dalia Najjar

4- الخاتمة Conclusion:

يتمّ تبديد الطّاقة عموماً من خلال ثلاث ميكانيكيّات أساسيّة:

- تبديد الطّاقة الدّاخلة للمنشأ من خلال تعرّض العناصر الإنشائيّة إلى ضرر واضح يترافق بتناقص مقاومتها وصلابتها، حيث تبدي هذه العناصر سلوكاً مرناً–لدناً عند تعرّضها لأحمال زلزاليّة كبيرة.

- تبديد الطّاقة الدّاخلة للمنشأ من خلال وسائل تبديد الطّاقة مثل (مخمّدات الاحتكاك، العناصر المعدنيّة التّصالبيّة، المخمّدات اللزجة، المخمدات المرنة اللزجة)، والتي تشارك العناصر الإنشائيّة في تبديد الطّاقة، حيث أنّ وجود تلك الوسائل يؤدّي إلى زيادة قيمة EP ونقصان قيمة EI، وباعتبار قيمة الطّاقة الخارجيّة ثابتة فإنّ ذلك يؤدّي إلى نقصان في طاقة التّشوّه اللدنة المتبقّية وبقاء العناصر بالحالة المرنة.

- تبديد الطّاقة الخارجيّة قبل دخولها للمنشأ من خلال أنظمة العزل الزّلزالي القاعدي مثل (المساند المطّاطيّة، أنظمة نواس الاحتكاك، مساند الانزلاق المسطّحة)، حيث تعمل تلك الأنظمة على تبديد الطّاقة والتّقليل منها قبل دخولها إلى المنشأ العلوي فوق نظام العزل، مما يعني بقاء العناصر الإنشائيّة مرنة وذلك عند دخول المنشأ ككلّ في المجالات اللدنة.

Dr. Eng. Dalia Najjar

Question
&
Answer