

Hysteretic Loops

Dr.Eng. Dalía Najjar

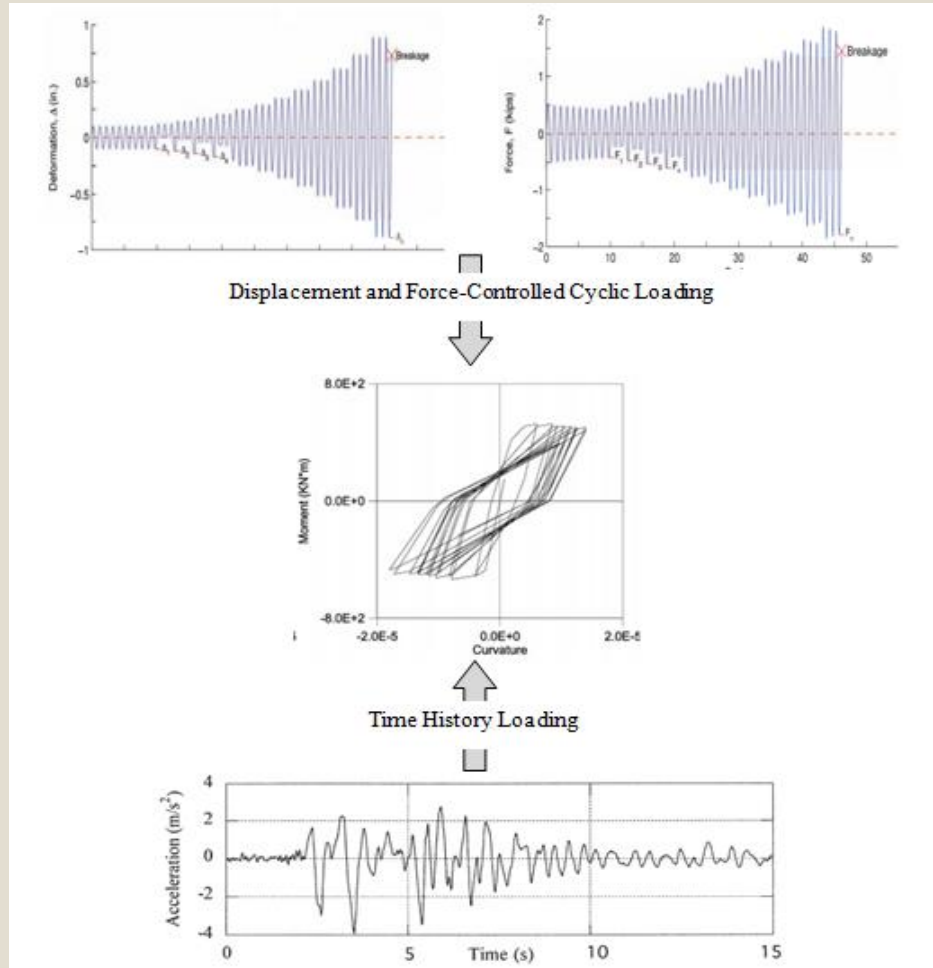
2019-2020

1- مقدمة Introduction:

عندما تخضع المنشآت المدنية لحمولات زلزالية فإنها تحت تأثير تلك الحمولات ستسلك سلوك (مرن-لدن) بشكل عام، وعند شدات مرتفعة للتحرير الزلزالي سوف لن يكفي المنشأ بالبقاء فقط في المجالات المرنة لا بل سوف يتعداها إلى مجالات لدنة قد تصل للانهييار، تُصمّم مختلف العناصر الإنشائية والوصلات ضمن المنشآت وفق الكودات الزلزالية لتبديد الطاقة الداخلة من خلال تعرّضها للتشوّهات ودخولها في المجالات اللدنة في سبيل حماية العنصر ومنع حدوث الانهيارات، وبالإضافة لذلك ففي العديد من الحالات وضمن إطار رفع كفاءة المنشآت لمقاومة الحمولات الزلزالية فإنه يتم الاستعانة بوسائل عديدة في سبيل الحصول على تبديد أكبر للطاقة منها (أنظمة العزل القاعدي، أنظمة التخميد المتعددة).

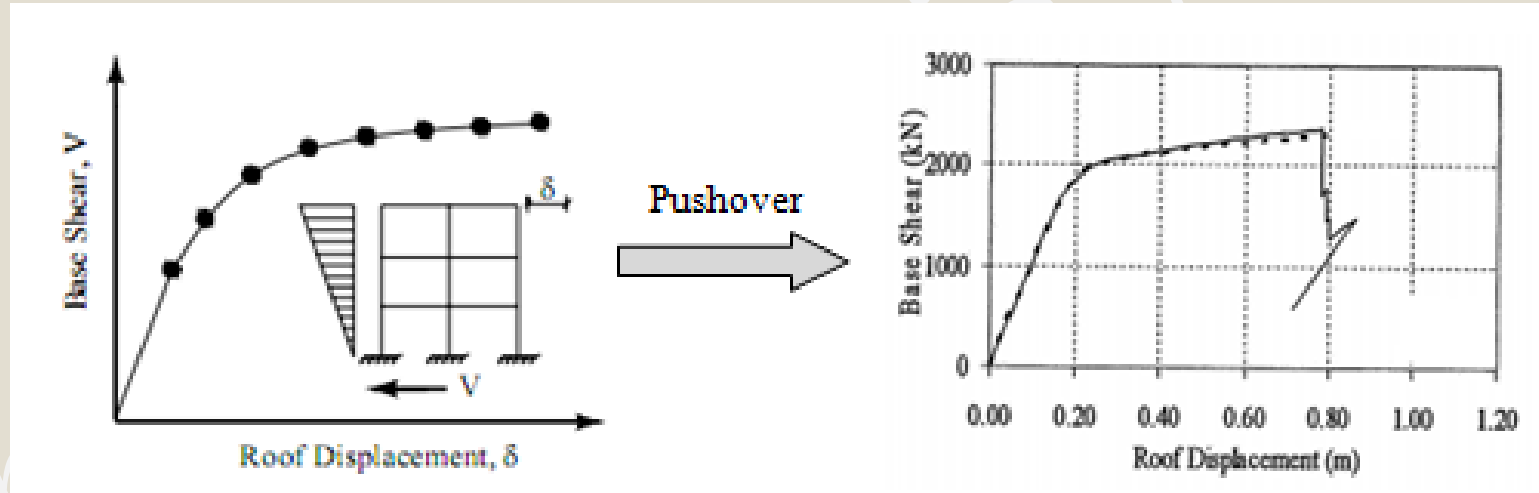
يتمّ تمثيل تبديد الطاقة بمنحنيات تُسمى الحلقات الهستيريّة، حيث تُعرّف الحلقة الهستيريّة بشكل مبسّط بأنها عبارة عن علاقة تربط بين القوّة المطبّقة (أو العزم) على المحور الشاقولي كبديل عن مفهوم الإجهاد وبين الانتقال (أو زاوية الانحناء) على المحور الأفقي كبديل عن مفهوم الانفعال، وكما هو معروف بأنه في المجال المرن يكون غالباً سلوك المنشأ خطياً ويتمّ الاعتماد على معادلة التوازن الخطية الشهيرة في التحليل باعتبار كلّ من التّخامد والصلابة ثابتة على كامل المنشأ، علماً أنه في بعض الحالات وعندما تكون التشوّهات كبيرة في المجال المرن فلا بدّ من الاعتماد على معادلة التوازن غير الخطية (التابعة للزمن) كما هو الحال تماماً عند الدخول في المجالات اللدنة، وعندها يتمّ الحل باستخدام عدّة طرائق عدديّة أشهرها: Newmark's Beta Methods

2- السلوك الهستيرتي Hysteretic Behavior:



يختلف شكل السلوك الهستيرتي ابتداءً من نقطة الصفر ومروراً بالمرحلة المرنة ومن ثم المرحلة اللدنة أي (عند التّحميل والتّفريغ) تبعاً لبروتوكول التّحميل الزلزالي المطبّق على المنشأ، وفي هذا المجال يمكن أن يكون التّحميل تكراري وهو عبارة عن قوى متزايدة متناوبة في الجزء الموجب والسّالب مطبّقة خلال عدد من الدّورات، وقد تكون الحمولة انتقاليّة متزايدة متناوبة خلال عدد من الدّورات أيضاً، أو أن يكون التّحميل على شكل هزة أرضيّة Time History وفي هذه الحالة نحصل على عدّة حلقات هيسستيريّة متناوبة في الجزء الموجب والسّالب كما هو موضح بالشّكل التّالي.

وقد تكون الحمولة عبارة عن حمولة متزايدة بالتدرج حيث يتم دراسة هذا النوع من الحمولة وفق تحليل الدّفع المتتالي للمنشأ (Pushover Analysis) للوصول إلى قوّة معيّنة أو انتقال معيّن يُدعى بالانتقال الهدف، وبحيث يكون تطبيق هذه الحمولة بجهة واحدة وصولاً للانهييار كما هو موضّح بالشكل التّالي.



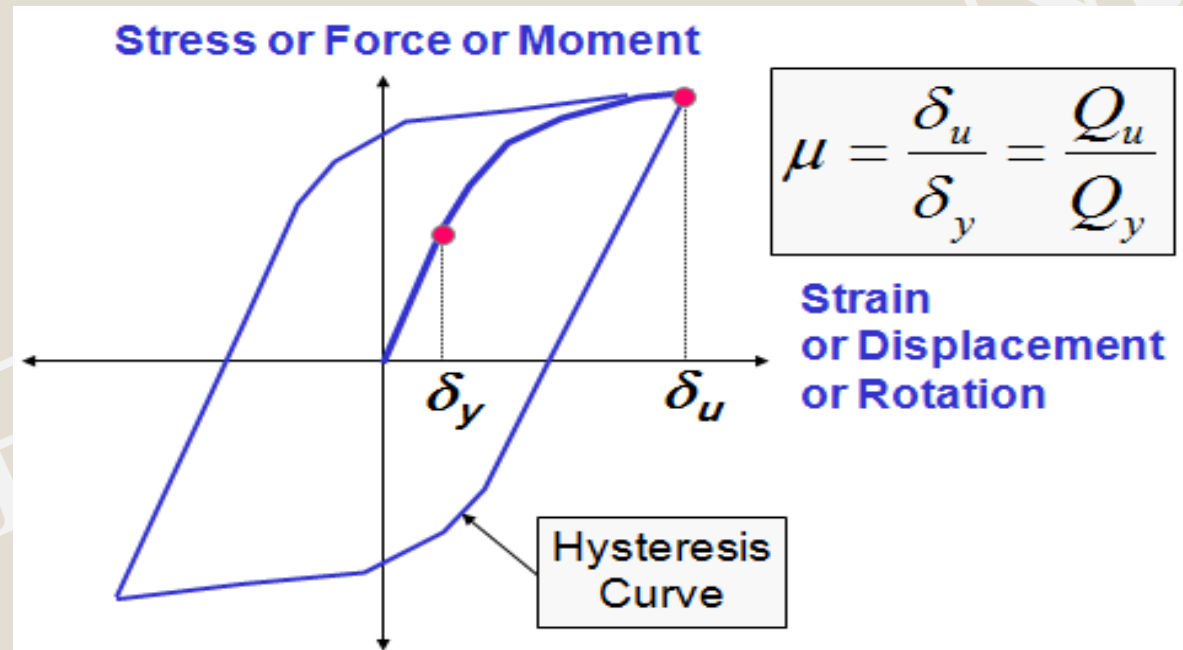
3- فوائد الحلقات الهيسٲيرية :Benefits of Hysteresis

ٲعتبر الحلقات الهيسٲيرية من أهم النٲائج التي يتم الحصول عليها عند التحليل الزلزالي للعناصر البيٲونية المسلحة والعناصر المعدنية بشكل عام، وللوسائل الأخرى التي تُستخدم في حماية المنشآت وإعادة تأهيلها على الزلازل بشكل خاص، يمكن من خلال الحلقات الهيسٲيرية قراءة مجموعة من المؤشرات الهامة سواء فيما يتعلق بتشقق وتصدع وانهيار البيٲون، أو في ما يتعلق بتلدن وانقطاع الفولاذ، أو فيما يتعلق بتلدن وتشوه عناصر الوسائل والتجهيزات المضافة.

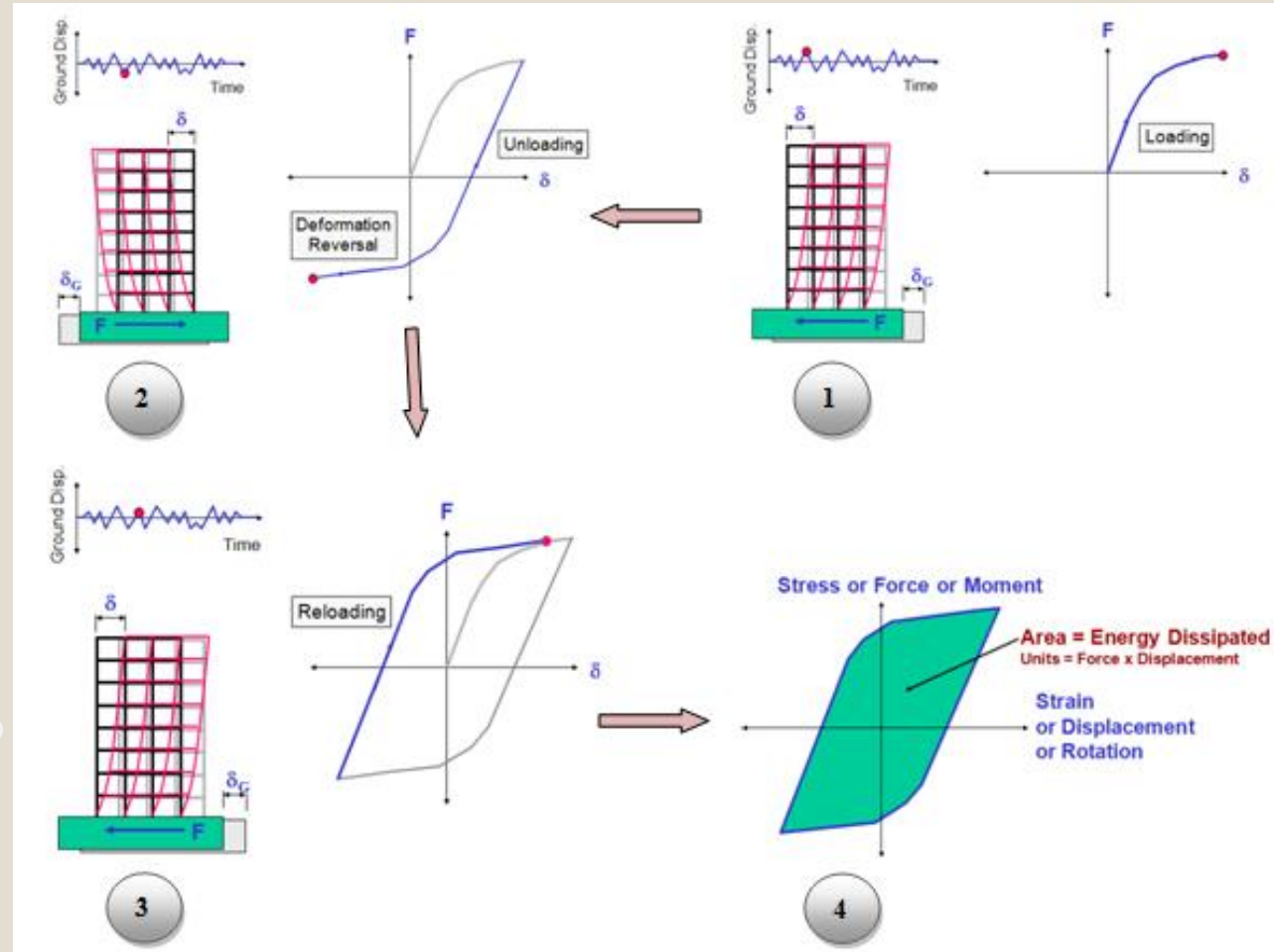
يمكن بالاعتماد على الحلقات الهيسٲيرية إجراء عدة مقارنات بين النماذج المدروسة والتي تشمل على سبيل المثال: عامل المطاوعة، كمية الطاقة المبددة، تأثير القوى المحورية الشاقولية، وتسليح القص الأفقي في بعض العناصر البيٲونية المسلحة.

غالباً يتم الاعتماد على مغلف الحلقات الهيسٲيرية الناتجة عن عدد من دورات التحميل في إيجاد العديد من القيم اللازمة في الدراسة يُذكر منها: مقدار المقاومة الجانبية عند السيلان أو الخضوع ومقدار المقاومة الجانبية الحدية عند الانهيار والتشوهات الموافقة، وبالتالي قيم الصلابة الجانبية في المرحلة المرنة وفي مرحلة ما بعد الخضوع.

يتمّ إيجاد قيمة عامل المطاوعة بشكلٍ مبسّطٍ من خلال الحلقات الهيسْتيرِيَّة كما هو موضّح بالشّكل التّالي، كذلك إنّ مساحة المنطقة المحصورة ضمن الحلقات الهيسْتيرِيَّة تساوي إلى كميّة الطّاقة المبدّدة ضمن العنصر المدروس.



يبين الشكل التالي مجموعة رسومات توضّح كيفية الحصول على كمية الطاقة المبدّدة من خلال الحلقة الهستيرية.



4- النماذج الهستيرية Hysteretic Models:

هناك نموذجان أساسيان لشكل الحلقات الهستيرية ضمن إطار دراسة السلوك (المرن-اللدن) ضمن المنشآت البيتونية المسلحة والمنشآت المعدنية على حدّ سواء:

□ النموذج الأول يُدعى Polygonal Hysteretic Model (PHM)

□ النموذج الثاني يُدعى Smooth Hysteretic Model (SHM)

يعطي النموذجان السابقان منحنيات نموذجية تختلف عما هي عليه في بعض التجارب العملية الواقعية، حيث تُعتبر العلاقات والأشكال الخاصة بالحلقات الهستيرية التي ستمرّ في الفقرات اللاحقة الأساس النظري الذي اعتمد عليه الكثير من الباحثين لتطوير نماذج جديدة بعلاقات جديدة من أجل دراسة السلوك (المرن-اللدن) للعناصر البيتونية المسلحة.

تتميّز نماذج الحلقات الهستيرية سابقة الذكر بقدرتها على تمثيل خسارة المنشأ للمقاومة والصلابة وحتى انزلاق التماسك، تلك العوامل التي يجب أخذها بعين الاعتبار في نمذجة وتصميم النظام المقاوم للزلازل في المنشأ.

تحاول هذه المحاضرة تسليط الضوء على الخلفية النظرية لرسم الحلقات الهستيرية من خلال إيضاح شكلي النموذجين الأساسيين لتلك الحلقات، بالإضافة إلى عرض عدة أمثلة، علماً أنّ النماذج التي ستعرض هي نتاج البحث الطويل في أساسيات علم ديناميك المنشآت وذلك بالاعتماد على عدة مسلمات وتبسيطات للوصول إلى نماذج رياضية مبسطة.

ضمن هذا الإطار سيتمّ التعرف على ثلاثة مفاهيم أساسية وهي:

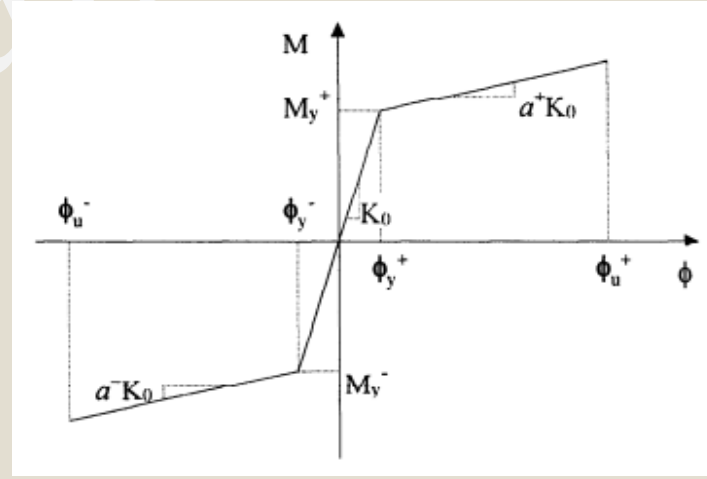
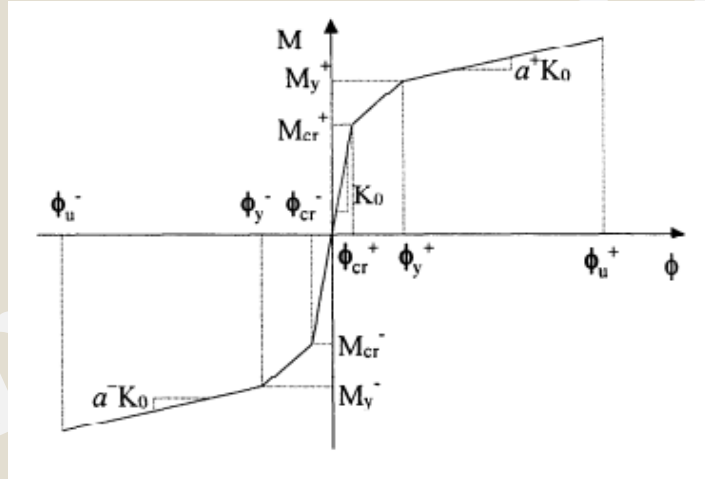
✓ **Stiffness Degradation** التناقص في الصلابة

✓ **Strength Degradation** التناقص في المقاومة

✓ **Pinching or Slip** الانضغاط أو الانزلاق

1-4- النّموذج الأوّل (PHM) Polygonal Hysteretic Model :

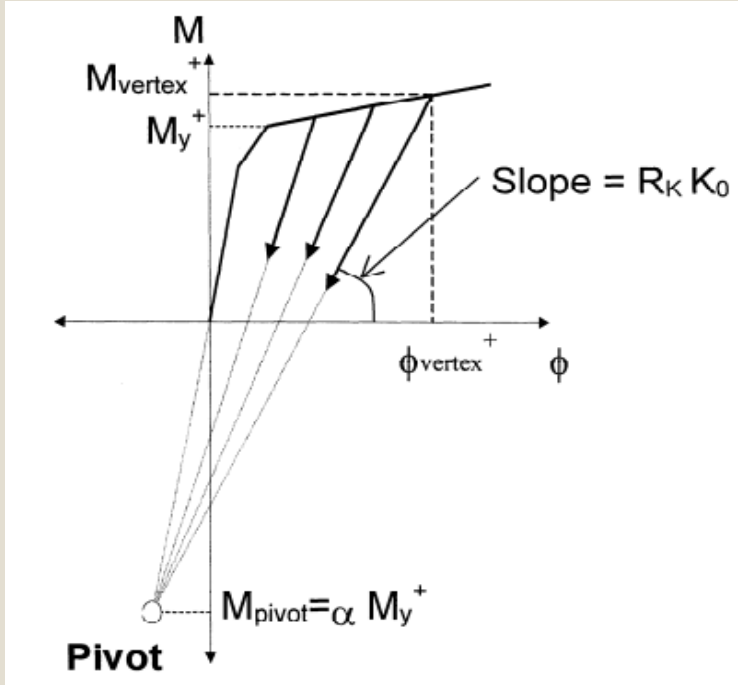
يُعرف شكل هذه الحلقة بأنه عبارة عن مجموعة من الخطوط المستقيمة المكسّرة المتلاحقة، وقد تكون عبارة عن حلقات ثنائية الخطيّة، أو عبارة عن حلقات ثلاثيّة الخطيّة تناسب نماذج التّشقّقات بالإضافة إلى الخضوع كما هو موضّح بالشّكل التّالي، وبحيث يتمّ الحصول على تلك الحلقات من خلال جملة من المعادلات الديناميكيّة اللاخطيّة.



4-1-1-1- التناقص في الصلابة في النموذج PHM:

يعبر عن هذه الظاهرة ضمن الحلقة الهستيرية بتناقص ميل منحنى التفريغ الذي يرافق استمرار التحميل كما هو موضح بالشكل المجاور، الأمر الذي يعني تناقصاً في الصلابة وفق معامل الصلابة R_K وذلك وفق العلاقة التالية:

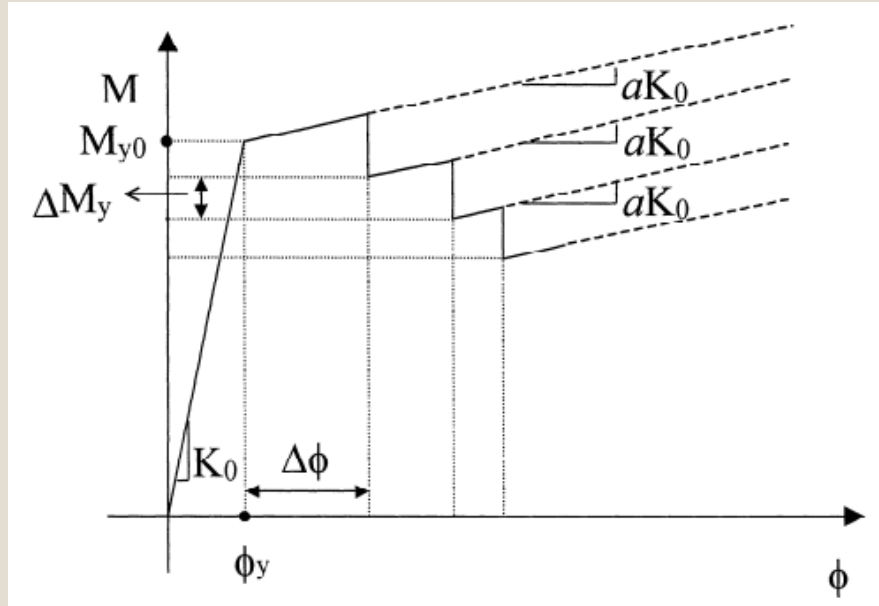
$$R_K^+ = \frac{M_{cur} + \alpha M_y}{K_0 \phi_{cur} + \alpha M_y}$$



حيث α : بارامتر تناقص الصلابة، M_y : العزم عند الخضوع، M_{cur} : العزم الحالي، Φ_{cur} : الدوران المقابل للعزم الحالي، K_0 : الصلابة البدائية، وبالتالي فإن قيمة الصلابة الجديدة تُعطى بالعلاقة التالية:

$$K_{cur} = R_K K_0$$

4-1-2- التناقص في المقاومة في النموذج PHM:



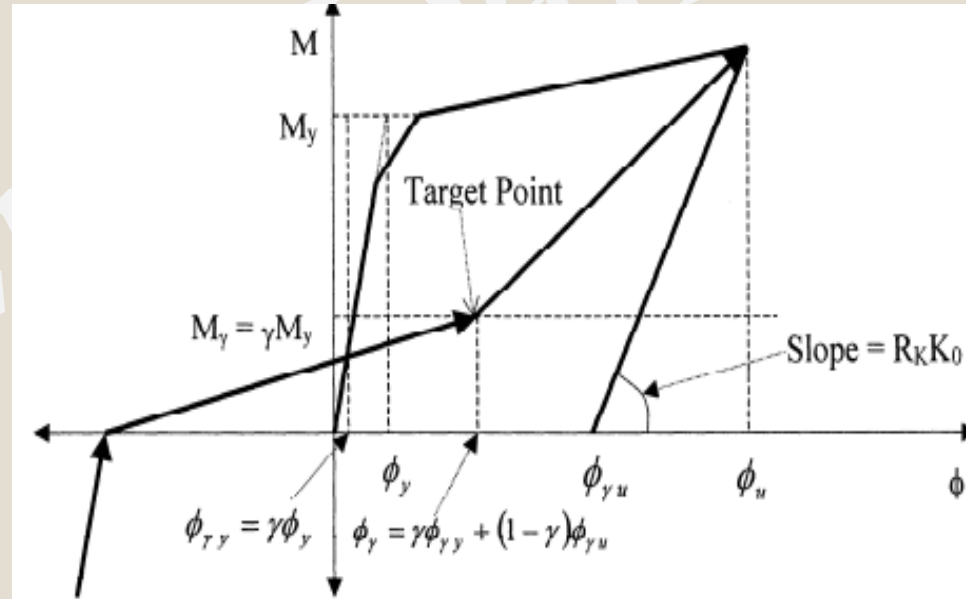
يعبر عن هذه الظاهرة ضمن الحلقة الهستيرية بتناقص قيم الإجهادات على المحور الشاقولي الذي يرافق استمرار التّحميل كما هو موضح بالشكل المجاور، حيث يرتبط هذا التناقص بعدة بارامترات مع ثبات الميل (الصلابة) مما يعني تناقصاً في المقاومة، والعلاقة التالية تعطي القيم الجديدة للوزم عند الخضوع:

$$M_y^{+/-} = M_{y0}^{+/-} \left[1 - \left(\frac{\phi_{max}^{+/-}}{\phi_u^{+/-}} \right)^{\beta_1} \right] \left[1 - \frac{\beta_2}{1 - \beta_2} \frac{H}{H_{ult}} \right]$$

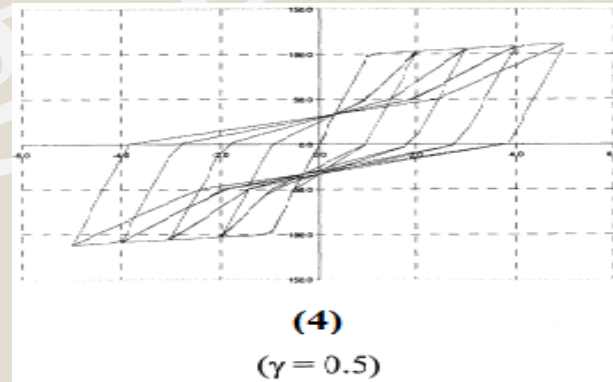
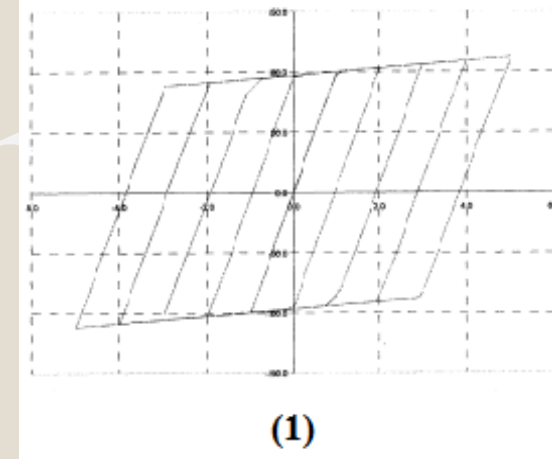
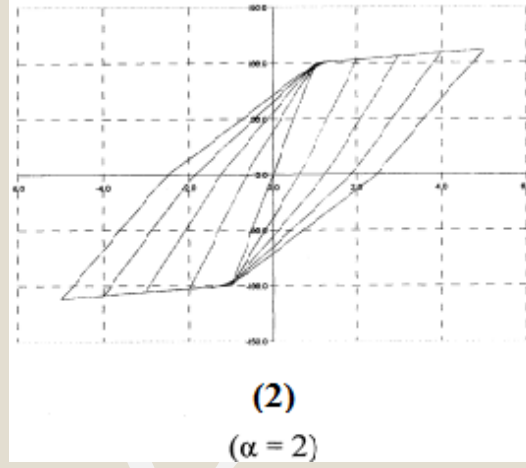
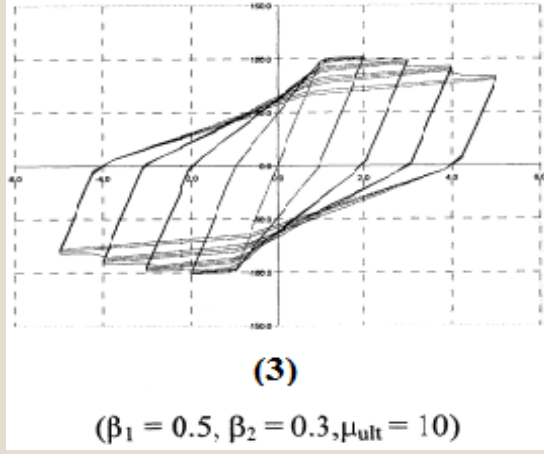
حيث M_{y0} : عزم الخضوع البدائي، Φ_{max} : زاوية الانحناء الأعظمية، Φ_u : زاوية الانحناء الحدية، H : كمية الطاقة الهستيرية المبددة، H_{ult} : كمية الطاقة عند التّحميل للوصول إلى زاوية الانحناء الحدية بدون أيّ تناقص، β_1 : بارامتر تناقص المقاومة المعتمد على المطاوعة، β_2 : بارامتر تناقص المقاومة المعتمد على الطاقة.

4-1-3- الانضغاط أو الانزلاق في النموذج PHM:

يحدث الانضغاط ضمن الحلقة نتيجة للأضرار ضمن العناصر وكمثال على ذلك انهيار التلاحم وانزلاق قضبان الفولاذ، حيث يُلاحظ من الشكل التالي أنه مع نهاية الدورة الأولى للحلقة فإنها تعود لنقطة تُدعى بالنقطة الهدف والتي يكون فيها العزم نسبة من عزم الخضوع، وكذلك فإن زاوية الانحناء عند نقطة الهدف ترتبط بزاوية الانحناء عند الخضوع وبارامتر الانضغاط أو الانزلاق γ ، وتُعتبر هذه الظاهرة سلبية لأنها تقلل من تبديد الطاقة وتؤدي إلى انهيار سريع ومفاجئ.



4-1-4- أمثلة على بعض الحلقات الهستيرية ضمن النموذج PHM:



بعض أشكال الحلقات الهستيرية لنموذج PHM: (1) حلقة ثنائية الخطية (2) حلقة ذات تناقص بالصلابة (3) حلقة ذات تناقص بالمقاومة (4) حلقة ذات انزلاق أو انضغاط.

2-4- النّموذج الثّاني (SHM) Smooth Hysteretic Model:

يختلف هذا النّموذج عن النّموذج السّابق بالشّكل وبالمعادلات الحاكمة، ويتميّز بأنّ الحلقة ذات حواف مدبّبة ومنحنية وليست حادّة كما لوحظ سابقاً، يتمّ تمثيل السلوك الهستيرتي مع تقسية بعد الخضوع لهذا النّموذج بوجود نابضين موصولين على التّفرع، النّابض الأوّل مرّن وخطّي تماماً وتُعطي صلابته كنسبة من الصّلابة المرنة، وذلك وفق العلاقة التّالية:

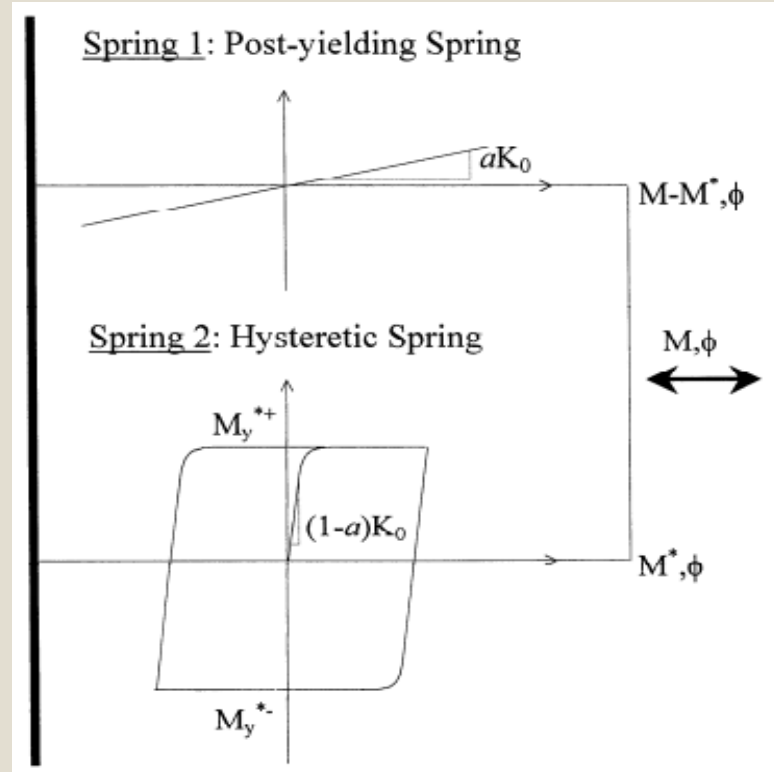
$$K_{post-yield} = \alpha K_0$$

حيث α : بارامتر تناقص الصّلابة: نسبة الصّلابة بعد الخضوع إلى الصّلابة البدائيّة.
 K_0 : الصّلابة البدائيّة (المرنة).

بينما النّابض الثّاني ذو سلوك مرّن-لدن وتُعطي صلابته بإهمال موضوع التّناقص بالصّلابة بالاعتماد على العلاقة التّالية:

$$K_{hysteretic} = (1 - \alpha)K_0 \left\{ 1 - \left| \frac{M^*}{M_y^*} \right|^N \left[\eta_1 \operatorname{sgn}(M^* \dot{\phi}) + \eta_2 \right] \right\}$$

حيث η : بارامتر يتحكّم بشكل المنحني عند تفريغ الحمولة ولدينا $\eta_1 = \eta$ و $\eta_2 = 1 - \eta$ ، N : بارامتر يتحكّم بدرجة انحناء الحلقة عند الانتقال من المرحلة المرنة إلى المرحلة اللدنة، M^* : حصّة النّابض الثّاني من العزم المطبّق، M_y^* : العزم عند الخضوع للنّابض الثّاني ويُحسب من العلاقة: $M_y^* = (1 - \alpha) M_y$.



يوضّح الشّكل الجانبي نموذجي النّابضين المدروسين والممثّلين للسلوك الهيسْتيري (بدون وجود تناقص في الصّلابة أو المقاومة)، علماً أنّ الصّلابة الكلية للنّموذج تُعطى بالعلاقة التّالية:

$$K = K_{post-yield} + K_{hysteretic}$$

1-2-4- التناقص في الصلابة في النموذج SHM:

تتشابه القواعد المتعلقة بموضوع التناقص في الصلابة والمقاومة مع ما تم ذكره في النموذج الأول PHM من حيث المبدأ مع اختلاف القوانين الحاكمة، فبالنسبة لموضوع التناقص في الصلابة فإنه يحدث ضمن النابض الثاني فقط وبالتالي تُعطى قيمة الصلابة الجديدة بالعلاقة التالية:

$$K_{hysteretic} = (R_K - a)K_0 \left\{ 1 - \left| \frac{M^*}{M_y^*} \right|^N \left[\eta_1 \operatorname{sgn}(M^* \dot{\phi}) + \eta_2 \right] \right\}$$

2-2-4- التناقص في المقاومة في النموذج SHM:

بالنسبة لموضوع التناقص بالمقاومة فإن العلاقة التالية تعطي القيم المتغيرة الجديدة للعزم عند الخضوع.

$$\frac{dM_y^{+/-}}{dt} = M_{y0}^{+/-} \left\{ \left[1 - \frac{\beta_2}{1 - \beta_2} \frac{H}{H_{ult}} \right] \left[- \frac{1}{\beta_1 \left(\phi_u^{+/-} \right)^{\frac{1}{\beta_1}}} \left(\phi_{max}^{+/-} \right)^{\frac{1 - \beta_1}{\beta_1}} \right] \dot{\phi}_{max}^{+/-} + \left[1 - \left(\frac{\phi_{max}^{+/-}}{\phi_u^{+/-}} \right)^{\frac{1}{\beta_1}} \right] \left[- \frac{\beta_2}{(1 - \beta_2) H_{ult}} \right] \dot{H} \right\}$$

4-2-3- الانضغاط أو الانزلاق في النموذج SHM:

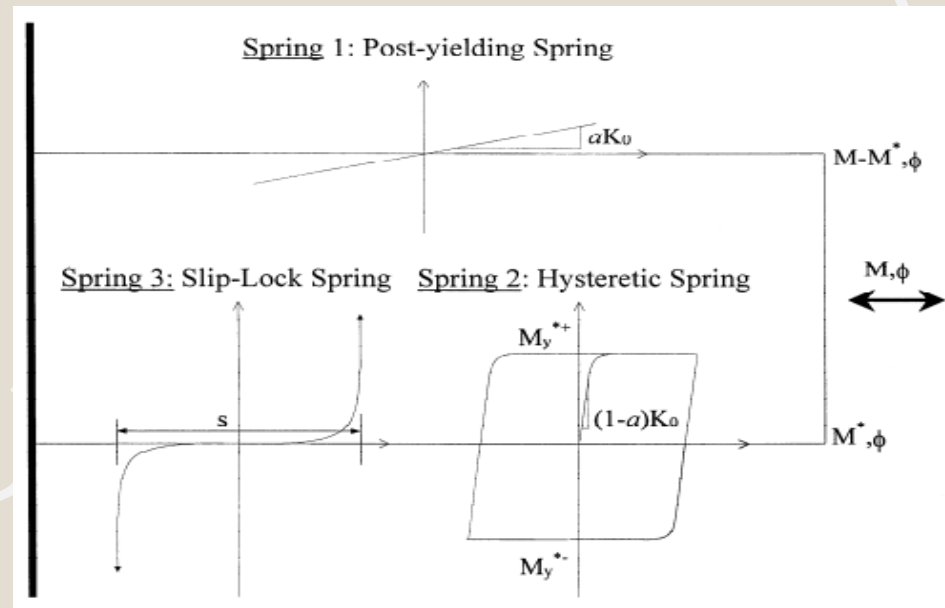
تتم نمذجة تأثير الانزلاق أو الانضغاط من خلال إضافة نابض آخر مربوط على التسلسل مع النابض الثاني ويُدعى Slip-Lock Spring وتُعطى صلابته بالعلاقة التالية:

$$K_{Slip-Lock} = \left\{ \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{s}{M_{\sigma}^*} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{M^* - \bar{M}^*}{M_{\sigma}^*} \right)^2 \right] \right\}^{-1}$$

حيث S: طول الانزلاق ولدينا $S = R_S(\Phi_{\max}^+ - \Phi_{\max}^-)$ ، M_{σ}^* : قيمة العزم عند حدوث الانزلاق و $M_{\sigma}^* = \sigma M_y^*$ ، M^* : مستوى العزم الوسطي على كل جانب حيث يحدث الانزلاق ويمكن حسابه من العلاقة: $M^* = \lambda M_y^*$ ، R_S, σ, λ : بارامترات تتعلق بالنموذج.

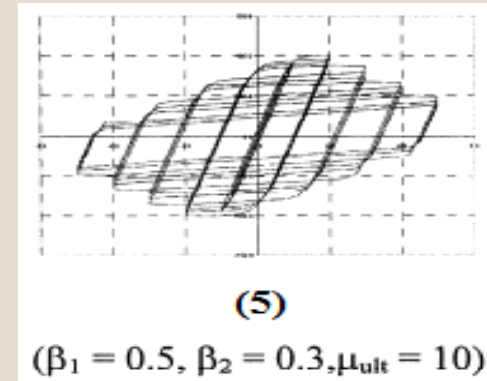
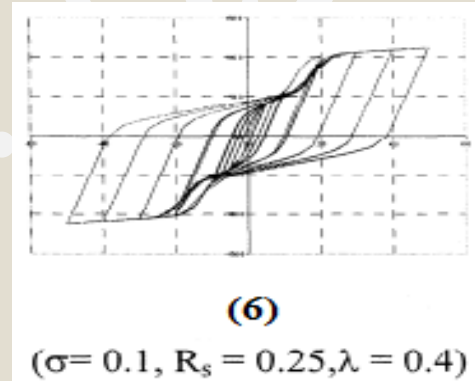
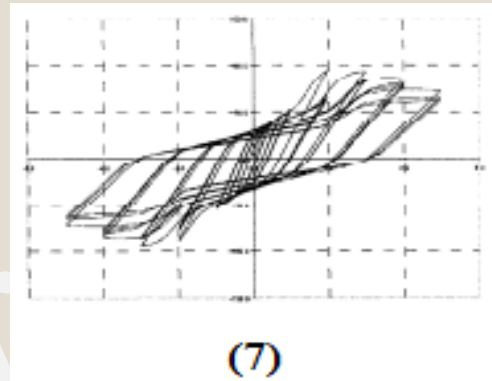
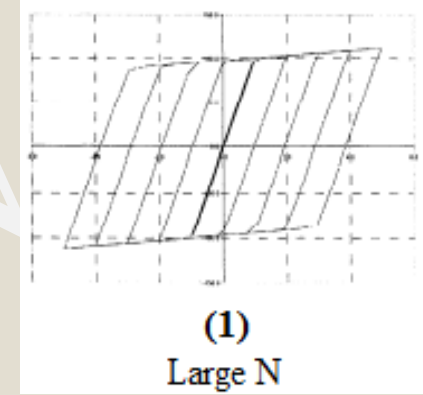
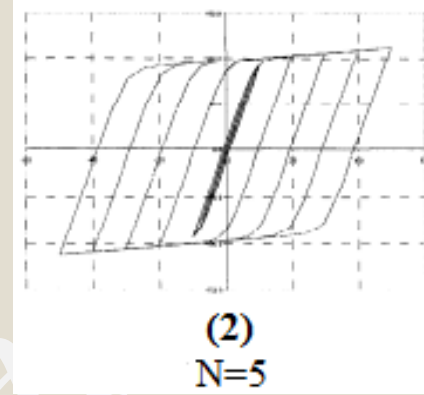
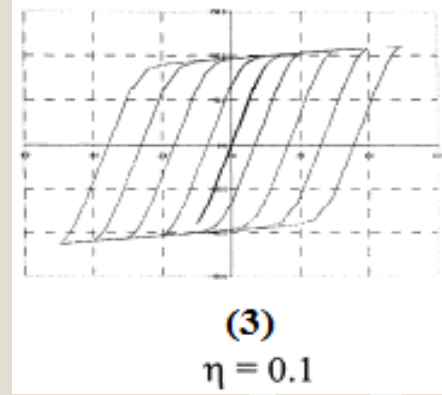
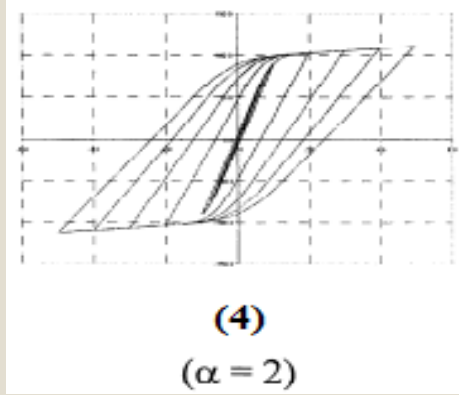
يوضح الشكل التالي نماذج النوابض الثلاثة المدروسة والممثلة للسلوك الهستيرتي (بدون وجود تناقص في الصلابة أو المقاومة وبوجود انزلاق)، علماً أنّ الصلابة الكلية للنموذج تُعطى بالعلاقة التالية:

$$K = K_{post-yield} + \frac{K_{Hysteretic} K_{slip-lock}}{K_{slip-lock} + K_{Hysteretic}}$$



نماذج النوابض الممثلة للسلوك الهستيرتي بدون وجود تناقص في الصلابة والمقاومة وبوجود انزلاق.

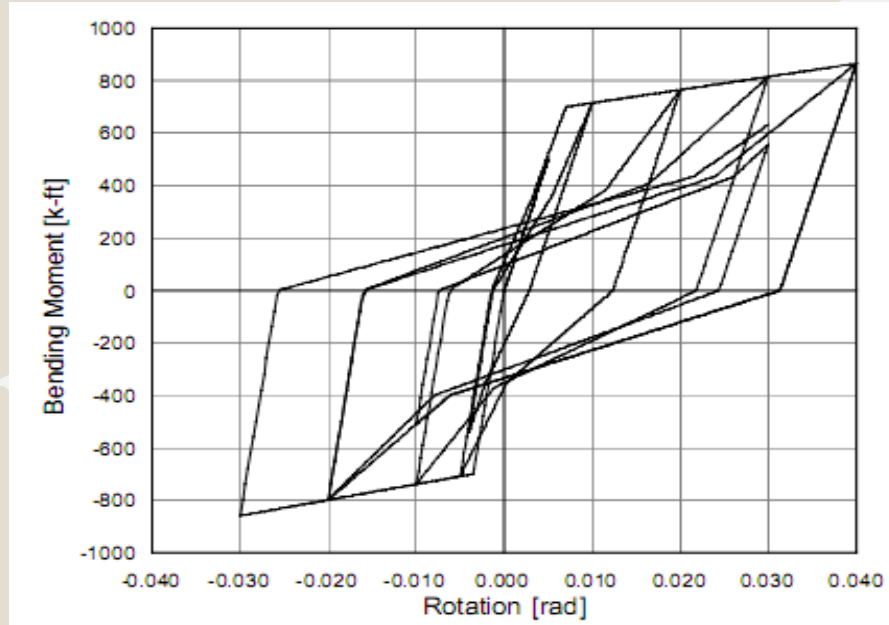
4-2-4- أمثلة على بعض الحلقات الهستيرية ضمن النموذج SHM:



بعض أشكال الحلقات الهستيرية لنموذج SHM: (1) حلقة ثنائية الخطية ذات قيمة N كبيرة (2) حلقة ذات قيمة N مساوية 5 (3) حلقة ذات قيمة η مساوية 0.1 (4) حلقة ذات تناقص بالصلابة (5) حلقة ذات تناقص بالمقاومة (6) حلقة ذات انزلاق أو انضغاط (7) مجموع الحالات 6+5+4.

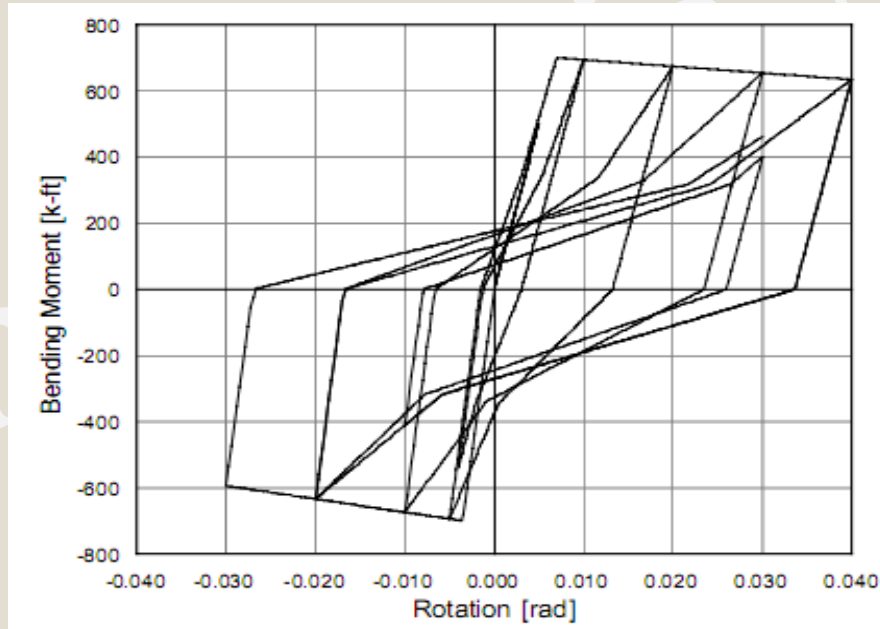
5- مفهوم التّقسية الانفعاليّة والليونة الانفعاليّة Strain Hardening & Strain Softening:

ضمن إطار التعرّف على أشكال الحلقات الهستيريّة لابدّ من التعرّف على كلّ من ظاهرتي التّقسية الانفعاليّة **Strain Hardening** والليونة الانفعاليّة **Strain Softening**، حيث يُقصد بالتّقسية الانفعاليّة خضوع المنشأ إلى زيادة بالتشوّهات مع زيادة الإجهادات في مرحلة ما بعد الخضوع أي بعد المجال المرن، ويُعرّف هذا المفهوم بأنّه مقياس لمقاومة المنشأ لحدوث أضرار.



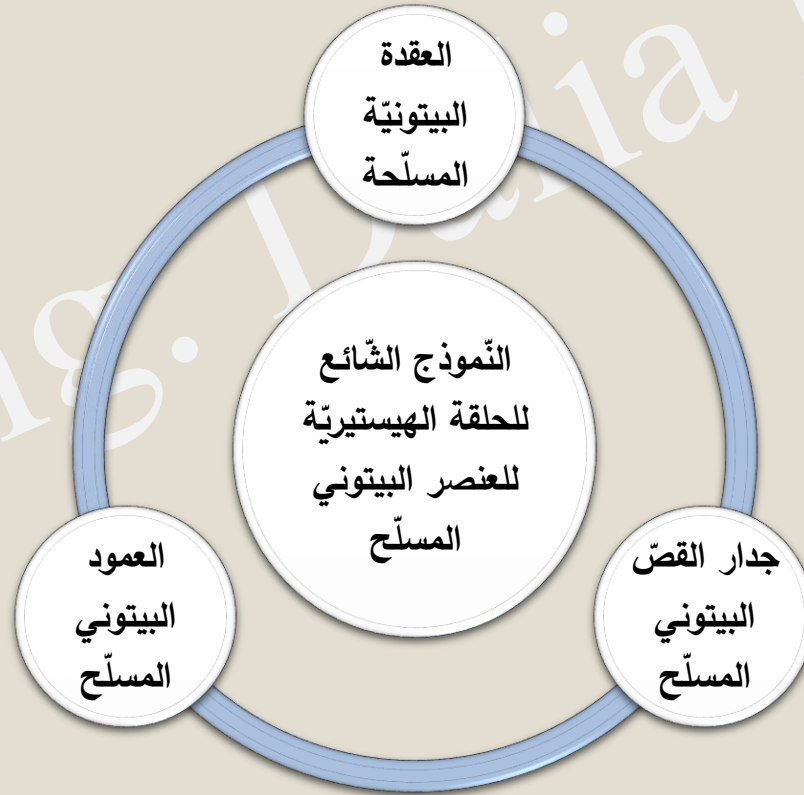
تُميّز مرحلة التّقسية الانفعاليّة بمجموعة من الظواهر منها: (تبديد الطّاقة عند تفريغ الحمولة، فقدان المطاوعة ونقصان في معاملات الصّلابة وهذه من النّقاط السّلبية، زيادة مقاومة الخضوع وهذه من النّقاط الإيجابيّة)، علماً أنّ معاملات المرونة والمقاومة الحديّة لا تتأثّر في مرحلة التّقسية الانفعاليّة، والشّكل التّالي يبيّن هذه الظّاهرة.

بينما يُقصد بالليونة الانفعاليّة خضوع المنشأ إلى زيادة بالتشوّهات مع نقصان الإجهادات في مرحلة ما بعد الخضوع، حيث أنّه من أهمّ أسباب نشوء هذه الظاهرة هو ظهور التّشقّقات وتصدّع البيتون وتشكّل المفاصل اللدنة ضمن المنشأ، والشّكل التّالي يوضّح الحلقات الهيسيريّة مع وجود ظاهرة الليونة الانفعاليّة.

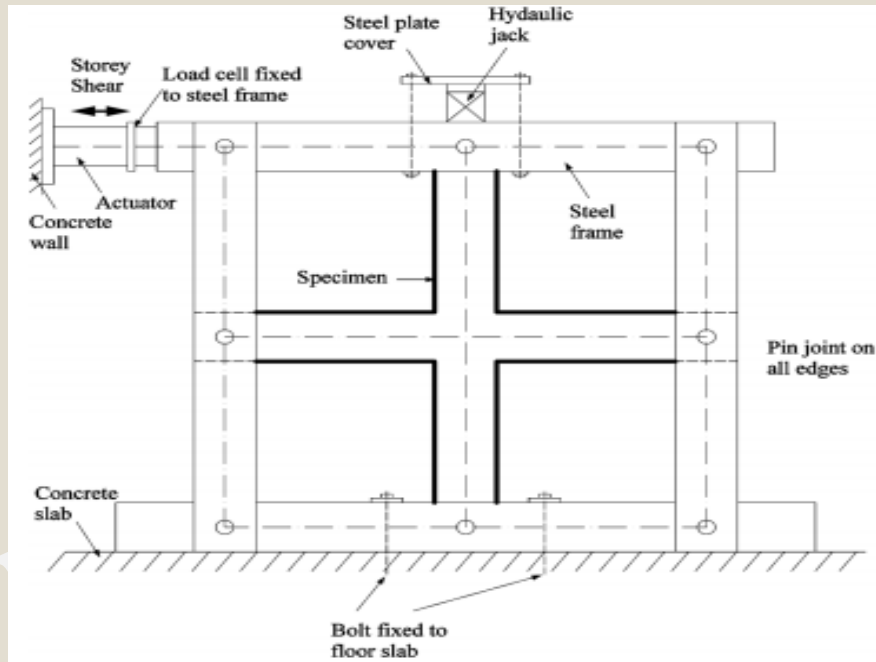


6- النماذج الهستيرية للعناصر البيتونية المسلحة :Hysteretic Models of R.C. Members

سيتمّ ضمن هذه الفقرة استعراض النماذج الشائعة للحلقات الهستيرية لعدد من العناصر البيتونية المسلحة كما هو موضّح بالمخطّط التالي:

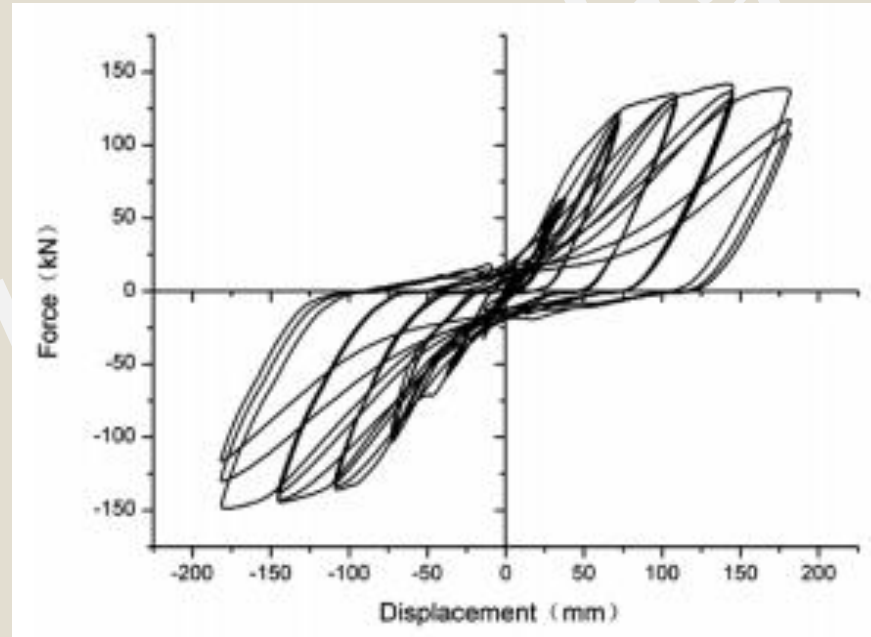


1-6- الحلقة الهستيريّة للعقدة البيتونيّة المسلّحة :Hysteretic Loop of R.C Joint

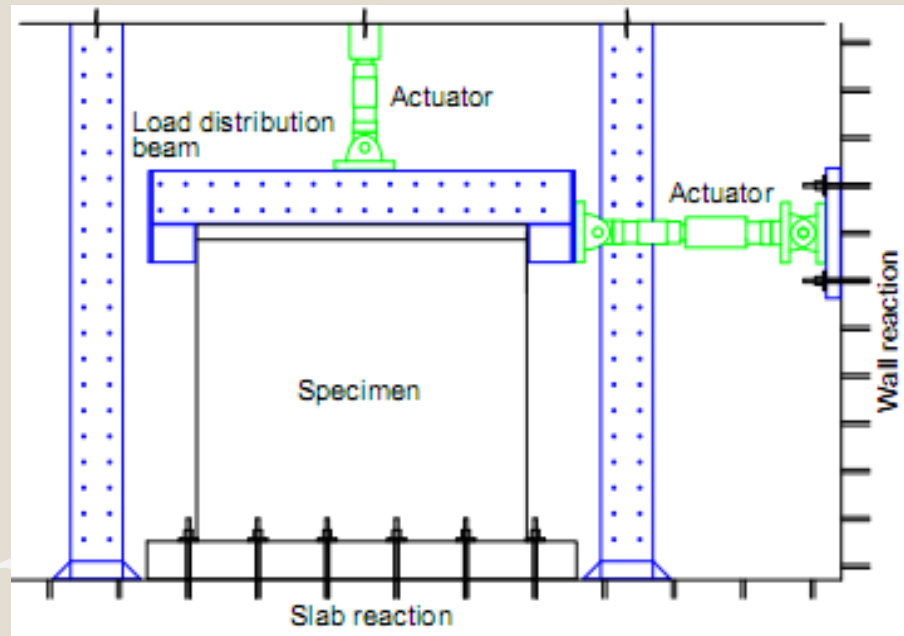


تعطي عادةً العقد البيتونيّة المسلّحة المعرّضة لحمولات تكراريّة أفقيّة والموضّحة بالشّكل المجاور سلوكاً هستيريّاً يتميّز بوجود ظاهرة الانضغاط أو الانزلاق، والذي يُعرف بأنّه أمر شائع في سلوك العقد البيتونيّة المسلّحة غير المطاوعة، حيث تنتج هذه الظاهرة عن عدّة أمور أهمّها (وجود قوى قصّ كبيرة، انزلاق قضبان التسليح ضمن المنطقة الفاصلة بين العمود والجائز، فتح وإغلاق الشقوق بشكل متكرّر تحت تأثير الحمولات المتعاكسة).

يوضّح الشّكل التّالي النّمودج الشّائع للحلقة الهيسْتيرِيّة للعقده البيْتونيّة المسلّحة، حيث تُلاحظ ظاهرة التّناقص بالصلابة Stiffness Degradation ومن أهمّ أسبابها تشقّقات البيْتون ووصول الفولاذ للخضوع والتلْدن، كذلك إنّ ظاهرة الانضغاط أو الانزلاق وظاهرة التّناقص بالمقاومة Strength Degradation تعتبر مؤشّرات أيضاً على تناقص الصّلابة.

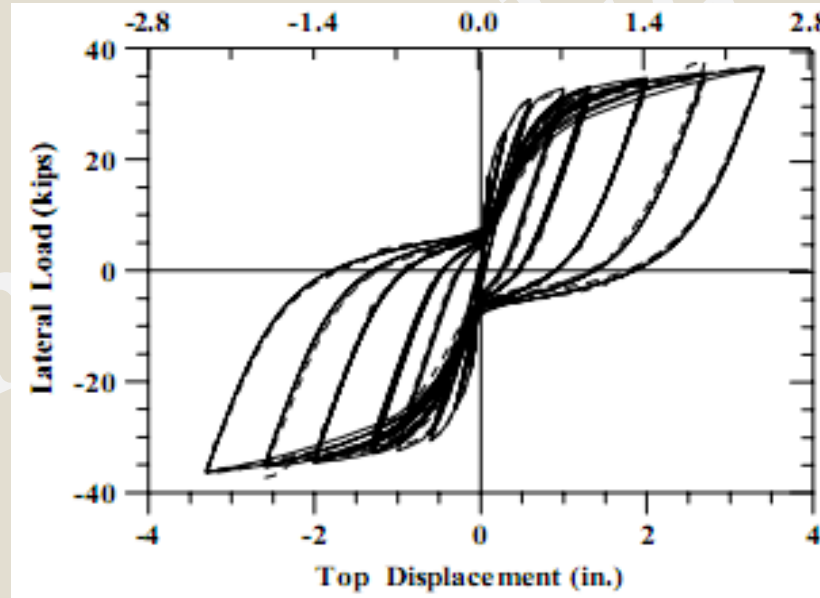


2-6- الحلقة الهستيرية لجدار القصّ البيتوني المسلّح :Hysteretic Loop of R.C Shear Wall

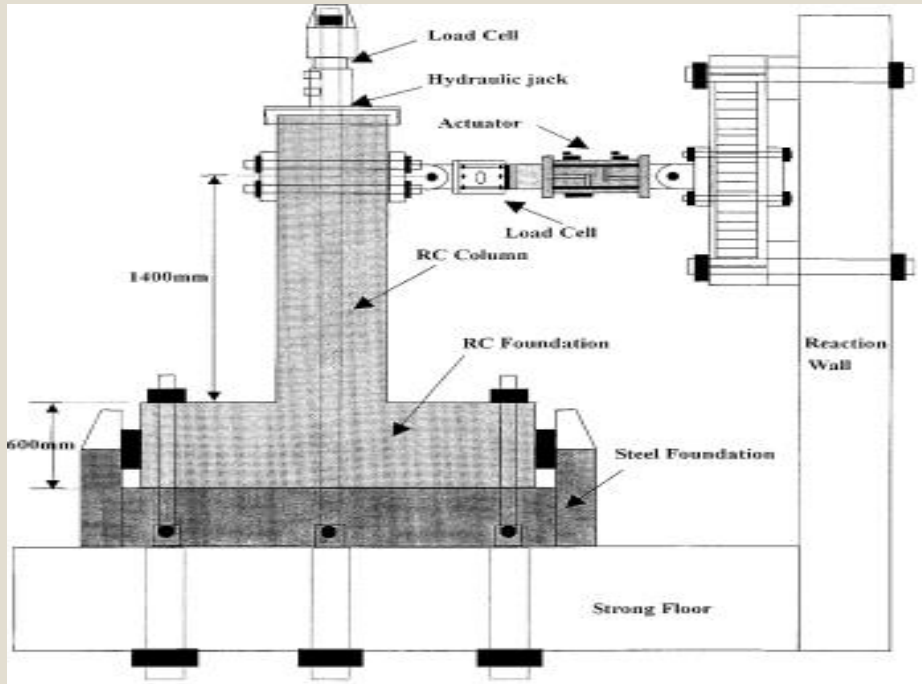


تُعطى عادةً جدران القصّ البيتونية المسلّحة المعرضة لحمولات تكرارية أفقية والموضّحة بالشكل المجاور سلوكاً هستيرياً ذي حلقات مستقرّة في المجالات اللدنة، حيث تسلك جدران القصّ سلوكاً مرناً تماماً وصولاً للخضوع مع ضرر بسيط مثل ظهور الشقوق. يتمثل بتناقص الميل الذي يعبر عن تناقص الصلابة وبتبديد قليل للطاقة.

بينما في المجالات اللدنة تزداد الأضرار ومنها: (ظهور شقوق عريضة ومفتوحة، تحطم البيتون، انهيار التسليح الطولي على الشد) مع تبديد أكبر للطاقة، حيث يُعتبر القص بأنه المسيطر في الانهيار، يوضح الشكل التالي نموذجاً شائعاً للحلقة الهستيرية لجدار القصّ البيتوني المسلح.

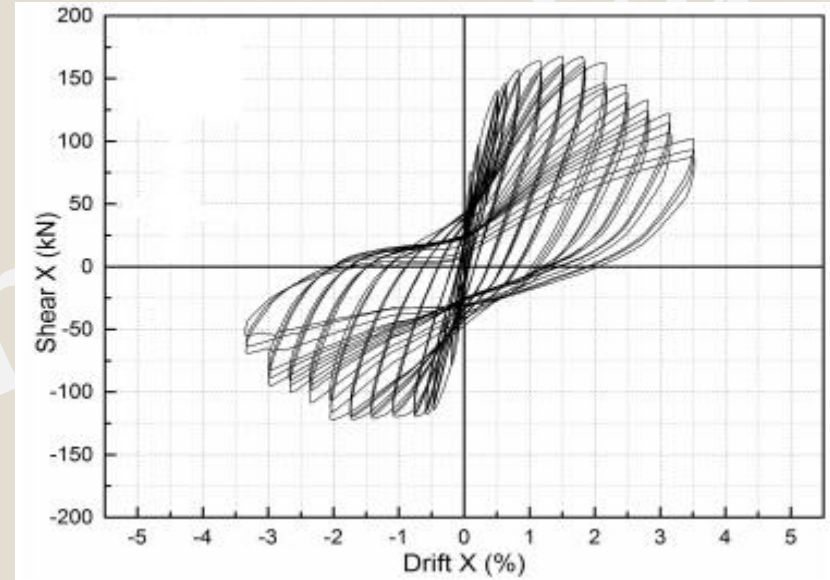


3-6- الحلقة الهستيرية للعمود البيتوني المسلح Hysteretic Loop of R.C Column:



تعطي عادةً الأعمدة البيتونية المسلحة المعرضة لحمولات تكرارية أفقية والموضحة بالشكل المجاور سلوكاً هستيرياً يشهد تناقصاً في الصلابة وتناقصاً في المقاومة إضافةً إلى ظاهرة الانضغاط أو الانزلاق، ويعود السبب في ذلك إلى عدّة ظواهر تُذكر على الترتيب (تشقق البيتون، دخول فولاذ التسليح الطولي في مرحلة الخضوع، تحطم وانفلاق البيتون، انقطاع فولاذ التسليح).

يوضح الشكل التالي النموذج الشائع للحلقة الهستيرية للعمود البيتوني المسلح، حيث أنّ وجود القوى المحورية يؤثر بشكل كبير في موضوع تناقص الصلابة والمقاومة وظهور حالة الانضغاط أو الانزلاق، ومن شأنه أن يؤثر أيضاً على شكل الحلقة الهستيرية على حدّ سواء.



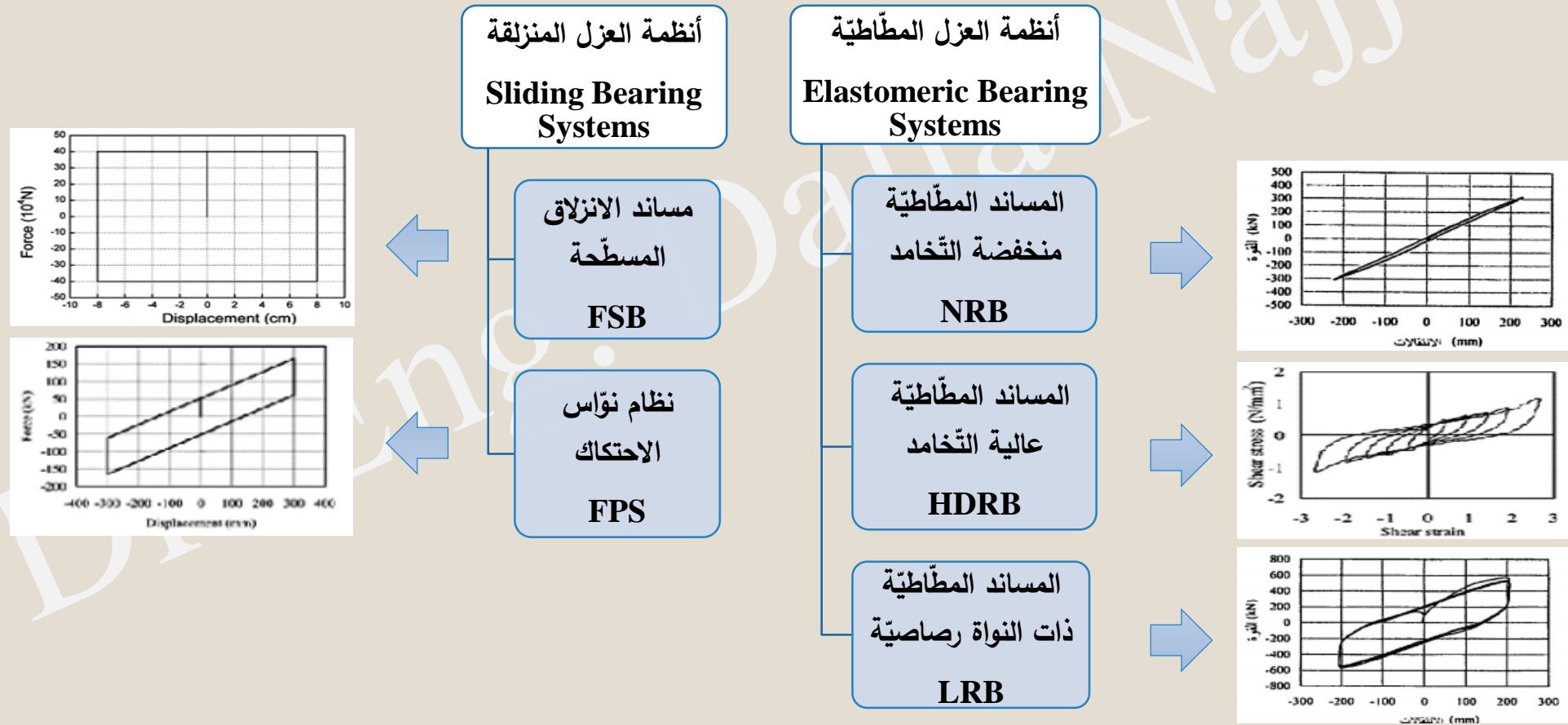
7- النماذج الهستيرية لأنظمة التّحكم السّلبية :Hysteretic Models of Passive Control Systems

تُستخدم أنظمة التّحكم السّلبّي الزّلزالي لمقاومة قوى الزّلازل وتبديد الطّاقة الدّيناميكيّة وبالتالي تقليل الأضرار التي قد تحدث في المنشأ. تقسم عناصر التّحكم السّلبّي إلى أنظمة العزل الزّلزالي القاعدي وأنظمة تبديد الطّاقة، تُستخدم تلك الأنظمة بشكل واسع في الأبنية الحديثة والأبنية القائمة في إطار إعادة التّأهيل الزّلزالي، وتُعتبر هذه الأنظمة سلبية لأنّها لا تتطلّب مصدر إضافي للطّاقة لكي تعمل إنّما تنشط تحت تأثير قوى الزّلازل فقط.

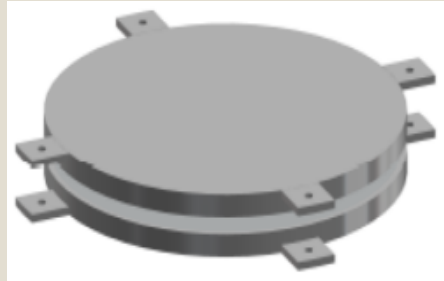
تُصمّم هذه الأنظمة لتبديد الطّاقة الدّاخلية وذلك من خلال تجاوبها مع حركة المنشأ، يتمّ ذلك عن طريق أجهزة متخصصة أو وصلات معيّنة تتشوّه وتتلدّن خلال الزّلازل أو من خلال تحويل الطّاقة الحركيّة إلى حرارة، وبما أنّ التّشوّه والتلدّن يتركّز ضمن هذه الأجهزة فإنّ الضرر المؤثّر على بقية العناصر الإنشائيّة المكوّنة للمنشأ سوف يتناقص. بالتّالي ضمن هذا الإطار لابدّ من التّعريف على أشكال الحلقات الهستيريّة ضمن هذا الأنظمة.

1-7- الحلقات الهستيريّة لأنظمة العزل القاعدي :Hysteresis of Base Isolation Systems

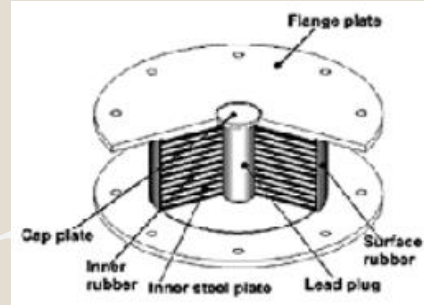
يمكن تلخيص سلوك أنظمة العزل الزلزالي القاعدي وفق المخطّط التّالي:



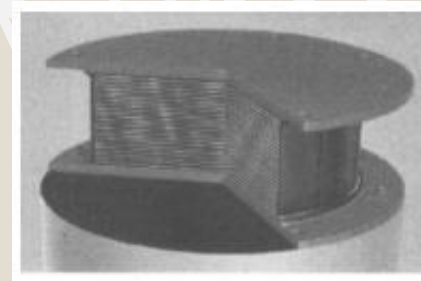
وكأمثلة على أنظمة العزل الزلزالي القاعدي يمكن عرض بعض الأشكال التوضيحية كما يلي:



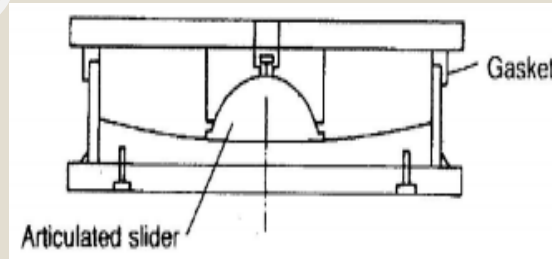
الشكل العام لمسند الانزلاق المسطح



الشكل العام للمسند المطاطي المزود بنواة رصاصية



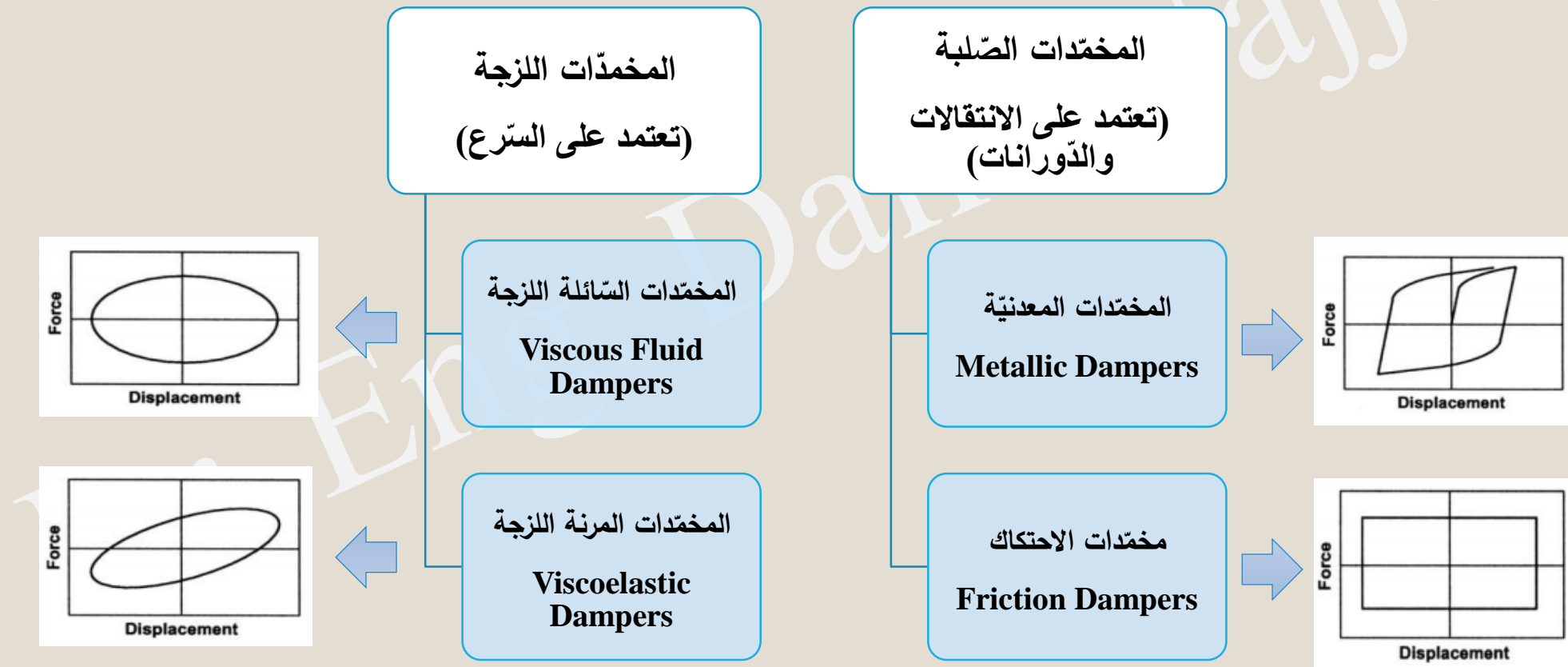
الشكل العام للمسند المطاطي



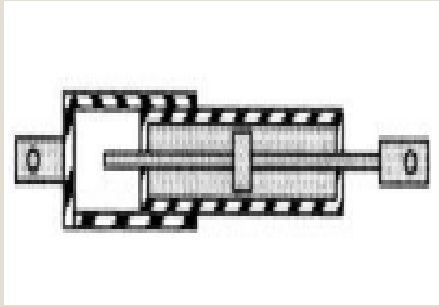
الشكل العام لنظام نواس الاحتكاك

2-7- الحلقات الهيسْتيرِيَّة لأنظمة تبديد الطّاقة :Hysteresis of Energy Dissipation Systems

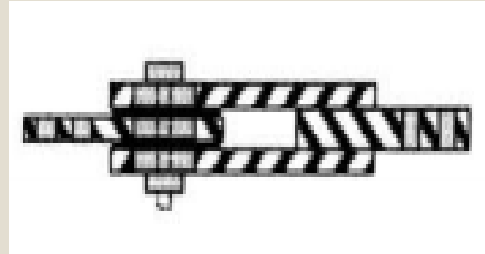
يمكن تلخيص سلوك أنظمة تبديد الطّاقة وفق المخطّط التّالي:



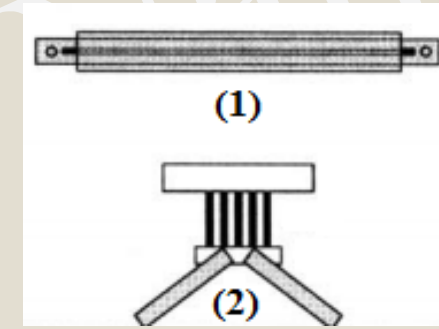
وكأمثلة على أنظمة تبديد الطاقة يمكن عرض بعض الأشكال التوضيحية كما يلي:



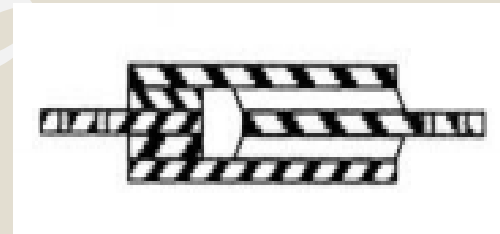
الشكل العام للمخمّد السائل اللزج



الشكل العام لمخمّد الاحتكاك



بعض أشكال المخمّذات المعدنية
ADAS (2) BRB (1)



الشكل العام للمخمّد المرن اللزج

