

تقييم الطرق المستخدمة لحساب دليل الضرر الانشائي للهياكل الخرسانية المسلحة المعرضة لهزات أرضية مختلفة

سفيان يونس احمد
dr.sofyan@yahoo.com

رغيد نجيب عبد الله
ragheed1976@yahoo.com

جامعة الموصل - كلية الهندسة - قسم الهندسة المدنية

تاريخ القبول: 15/10/2021

تاريخ الاستلام: 6/6/2021

الخلاصة

تتناول هذه الدراسة ابراز مستويات الضرر الانشائي والمقارنة بين طرق حساب دليل الضرر (Damage Index) المختلفة لهيكل خرساني مسلح ثنائي البعد معرض لأحمال زلزالية متباينة، صمم الهيكل المكون من ثلاث فضاءات وعشرة طوابق بالاعتماد على مواصفات (ACI 318-19)، وتم تحليل الهيكل تحليلاً حركياً غير خطي باستخدام برنامج (ETABS Version 19.0.0). جرى حساب قوى القص القاعدية وقيم الطاقة المتبددة، ونوقشت استجابة الهيكل من حيث قيم الازاحات العظمى (Maximum displacements) خلال التحليل والازاحات اللدنة المتبقية نهاية التحليل (Residual Displacements) ومقارنة كل حالة مع حدود المواصفات المذكورة في المدونات العالمية. تم استخدام طرق مقترحة من قبل الباحثين لغرض احتساب دليل الضرر الكلي للهيكل، كما تم اقتراح طريقة اخرى في هذا البحث، وكان هناك تقارباً في القيم المحسوبة على أساس الطرق المركبة للمتغيرات الفيزيائية والهندسية مقارنة مع الطرق التي تعتمد على المتغيرات الهندسية فقط كالمطيلة (Ductility) والازاحة. اعتبر دليل الضرر المعتمد على المتغيرات الفيزيائية فقط كالطاقة الهستيرية المتبددة غير كفوء في إعطاء انطباع حقيقي عن ضرر المنشأ وخاصة في حالة الاضرار المتوسطة والكبيرة، كما يستحسن اعتماد أكثر من طريقة للتأكد من سلامة المنشأ وعدم الاعتماد على طريقة واحدة تحدد بمتغيرات قليلة وذلك للتعبير عن الضرر الدقيق والفعلي في كافة الجوانب.

الكلمات الدلالية:

دليل الضرر؛ الحمل الزلزالي؛ مستويات الأداء؛ التحليل الديناميكي غير الخطي؛ المفاصل اللدنة.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
<https://rengj.mosuljournals.com>

1. المقدمة

انطلاقاً من هذه المعلومات والبيانات، حيث أن العديد من المراجع والأبحاث اعتمدت هذه الطريقة ووضعت أسس ومبادئ لاستخدامها وتطبيقها، كالمقياس الأوربي الدقيق للزلازل (EMS-98) [3].
ب- نمذجة المنشأ باستخدام إحدى برامج التحليل الإنشائي بعد قياس وتحديد الخصائص الإنشائية الفعلية للعناصر الإنشائية من أبعاد ومقاومة وغيرها، وهي الطريقة التي تم اعتمادها في هذا البحث، حيث تجري مقارنة نتائج الازاحات اللدنة والازاحات العظمى وتشوهات دوران للمفاصل الإنشائية التي تم الحصول عليها من خلال التحليل مع المواصفات والمدونات التي وضعتها الوكالات والجمعيات العالمية المعنية بالحد من خطر الزلازل والكوارث، مثل مدونة (FEMA-273) [4] و (ATC-20) [5] (ASCE/SEI 7-10) [6] وغيرها من المدونات.
كما ان هناك عدة أساليب وصيغ لحساب دليل الضرر، فمنها ما هو غير تراكمي (Non-cumulative damage index)، أي انها لا تأخذ تأثير الحمل الدوري بنظر الاعتبار وانما تعتمد على مدى التشوهات الهندسية التي يحدثها الزلزال في المنشآت، ومنها ما هو تراكمي (Cumulative damage index)، حيث تتضمن المعادلات فيها القيم الفيزيائية كقيمة الطاقة الهستيرية المتبددة أثناء تكرر الاهتزازات الناتجة عن الحمل الزلزالي او اية احمال دورية او غير دورية اخرى. والجدول رقم (1) يوضح بعض المعادلات التي تم استخدامها في هذه الدراسة.

أصبحت الخرسانة المسلحة مادة إنشائية عالمية خلال العقود الماضية، ومن الطبيعي بأن تؤدي الكوارث الطبيعية كالزلازل إلى درجات مختلفة من الأضرار فيها. الا ان ما يميز الزلازل عن غيرها من الكوارث أن الضرر الذي يلحق بحياة الفرد من جرائها يرتبط بالكامل تقريباً بالهياكل التي من صنع الإنسان، كما ان الضرر الذي يحدثه الزلزال في البنية التحتية يؤدي الى خسائر مادية كبيرة وتراجع في النمو الاقتصادي للبلد [1].
إن إزالة جميع المنشآت التي يظهر فيها آثار الضرر هو أمر غير ممكن عملياً واقتصادياً، إذ لا بد من إجراء عملية تقييم فنية لهذه المنشآت المتضررة كخطوة أولى في سبيل اتخاذ الإجراء الأمثل في ما يخص المبني من حيث قرار الترميم أو الصيانة أو الإزالة، وذلك من أجل استمرار استئثار هذه المنشآت بشكل آمن و اقتصادي، لذا فان تقييم المنشآت الخرسانية المسلحة القائمة عند تعرضها لزلزال بقوة معينة سوف يصبح عملية ضرورية ومهمة بالنسبة للمهندسين على نحو واسع في المستقبل [2].
ان عملية تقييم الضرر الانشائي وحساب دليل الضرر (Damage Index) يمكن ان تحسب للمنشأ بصورة كاملة (Global Damage Index) او للأعضاء الإنشائية الخاصة بالمبنى بشكل منفصل (Local Damage Index)، ومن ثم يتم تجميع الضرر ليمثل المنشأ ككل، ويمكن ان تصنف عملية التقييم الإنشائي الى صنفين من حيث الأسلوب:

أ- المعاينة والفحص البصري واستخدام أجهزة قياس واستشعار إتلافية وغير إتلافية وتحديد أشكال وأنواع وشدة الأضرار المتشكلة في العناصر الإنشائية للمنشأ، ثم تقييم مستوى الضرر

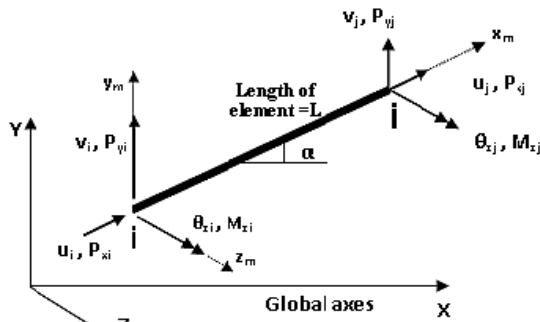
جدول رقم (1) يوضح المعادلات المستخدمة لإيجاد دليل الضرر والتي اقترحها قسم من الباحثين

رقم المعادلة	اسم الباحث	صيغة معادلة دليل الضرر (DI)	نوع المعادلة*		الملاحظات
			C او L	N-C او G	
1	Park and Ang (1985)	$DI = \frac{u_m}{u_n} + \beta \frac{E_h}{F_y u_n}$	C	L	<p>u_m: الأزرحة العظمى</p> <p>u_n: الأزرحة القصوى</p> <p>E_h: الطاقة المستوربة المتبددة</p> <p>F_y: قوة الخضوع</p> <p>β: معامل يتضمن تأثير الحمل المتكرر على المنشأ</p>
2	Roufaiel and Meyer (1987)	$DI = \frac{d_R - d_Y}{d_X - d_Y}$	N-C	G	<p>d_R: الأزرحة العظمى للطابق الأخير عند سطح المبني</p> <p>d_B: الأزرحة القصوى للسطح المبني التي يهاجر عندها المنشأ</p> <p>d_Y: قيمة الأزرحة عند تكون أول مفصل لن في المنشأ</p>
3	Powell and Allahabadi (1988)	$DI = \frac{\mu_m - 1}{\mu_n - 1}$	N-C	G	<p>μ_m: قيمة معامل المطيلية عند اعظم أزرحة يصلها المنشأ</p> <p>μ_n: مؤشر المطيلية القصوى المبني</p>
4	Kunnath et al (1992)	$DI = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_n - \theta_r} + \beta \frac{E_h}{M_y \theta_n}$	C	L	<p>θ_m: أكبر قيمة لدوران المفصل اللدن خلال صلابة التحليلي الديناميكي</p> <p>θ_n: أقصى قيمة للدوران يمكن ان يتصلها المفصل اللدن</p> <p>θ_r: قيمة الدوران للمفصل اللدن التي يمكن عندها من العودة بدون تشوه عند إزالة الحمل</p> <p>M_y: عزيم الخضوع</p> <p>β: معامل يتضمن تأثير الحمل المتكرر على المنشأ</p> <p>E_h: الطاقة المستوربة المتبددة</p>
5	Cao Van et al. (2011)	$DI = \frac{u_{res}}{u_m}$	N-C	G	<p>u_{res}: الأزرحة اللدنة المتبقية لنهاية التحليل</p> <p>u_m: اعظم أزرحة (مرنة + لدنة) التي وصل اليها المنشأ خلال التحليل</p>
6	Cao Van et al. (2011)	$DI = \frac{E_{non-rec.}}{E_{non-rec.} + 2E_{rec.}}$	C	G	<p>E_{rec}: الطاقة القابلة للاسترداد</p> <p>$E_{non-rec}$: الطاقة غير القابلة للاسترداد</p>
7	Datta and Ghosh (2008)	$DI = \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_n - \delta_y} + \beta \sum_{i=1}^n \int_0^t dE_i$	C	G	<p>δ_m: الأزرحة العظمى</p> <p>δ_y: أزرحة الخضوع</p> <p>δ_n: الأزرحة القصوى</p>
8	Hait, et al (2020)	$DI = 0.0518 \times IDR + 14.64 \times \theta + 2.468 \times d_{max} + C$	N-C	G	<p>IDR: اعظم أزرحة نسبية بين الطوابق %</p> <p>θ: اعظم دوران للمفصل اللدن حصل خلال التحليل بوحدة radian</p> <p>d_{max}: اعظم أزرحة لسطح البتابة بوحدة المتر (m)</p> <p>C: ثابت = 0.00362</p>
9	المعادلة المقترحة في البحث الحالي	$DI = \frac{V_m u_m - V_y u_y}{V_n u_n - V_y u_y}$	N-C	G	<p>V_y: أزرحة</p> <p>u_y: أزرحة سطح المنشأ عند نقطة الخضوع</p>

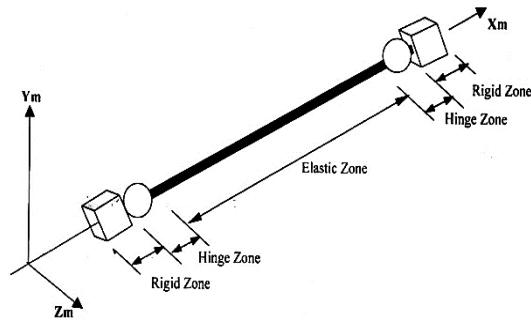
* N-C: دليل ضرر غير تراكمي (Non-Cumulative DI) ، C: دليل ضرر تراكمي (Cumulative DI) ، L: دليل ضرر سطحي (Local DI) ، G: دليل ضرر كلي (Global DI)

المجموعة، حيث يتكون من ثلاثة أجزاء، وكما هو مبين في الشكل رقم (2) [15].

الجزء الأول يمثل المنطقة الصلبة (Rigid Block Zone)، وموقعها في نهايات العضو، وهي المنطقة التي تتداخل مع العتبة مع العمود وهي قريبة من الصفر من حيث طولها في هذا البحث، والجزء الثاني يمثل المفاصل اللدنة في كلا الطرفين (Plastic Hinge Zone)، ويعكس السلوك غير المرين للعنصر الانشائي، أما بالنسبة للجزء الثالث، والذي يمثل الجزء المتبقي الواقع بين المفاصل اللدنة وهو الجزء المرين (Elastic Zone) حيث تم التعامل معه على أساس نظرية المرونة لأن سلوكه أثناء التحليل يبقى سلوكاً خطياً.



الشكل رقم (1) يوضح النموذج الرياضي لعضو الهيكل الخرساني المسلح



الشكل رقم (2) يوضح النموذج التحليلي لعضو الهيكل الخرساني المسلح

2.2. سلوك الاعضاء الانشائية

تم تمثيل سلوك العناصر الانشائية بعلاقات Mander الرياضية [16]، منها علاقة الاجهاد والانفعال للخرسانة المحصورة وغير المحصورة (شكل 3)، وكذلك العلاقة المثالية لمنحني (الاجهاد-الانفعال) لقضبان لتسليح تحت قوى الشد (شكل 4) [16] وكما مدونة في مكتبة برنامج ETABS.

1.2.2. الخرسانة غير المحصورة

يوضح نموذج Mander للخرسانة غير المحصورة والذي يعبر عن منحني (الاجهاد-الانفعال) $\epsilon \leq 2\epsilon'_c$ من خلال المعادلات التالية:

$$f = \frac{f'_c \times x \times r}{r-1+x^r} \quad \dots \dots \dots (1-2)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon'_c} \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

$$r = \frac{E}{E - \frac{f'_c}{\epsilon'_c}} \quad \dots \dots \dots (3-2)$$

تعتمد معادلة رقم (1) للباحثين پارك وأنك (Park and Ang 1985) [7] في حساب دليل الضرر على عاملين ، الأول مقدار التشوه الذي يحصل في العضو الانشائي (الازاحة العظمى) اثناء الهزة الأرضية، والثاني هو مقدار الطاقة الهستيرية المتبددة اثناء الزلزال. اما الباحثان روفانيل وماير (Roufaiel and Meyer 1987) [8]، فقد تضمنت المعادلة رقم (2) التي اقترحها الباحثين قيم الازاحات الفعلية والازاحات القصوى وازاحات الخضوع، لتعكس نسبة الضرر الذي وصل اليه المبنى خلال التحميل الزلزالي. اقترح الباحثان پاول والله آبادي (Powell and Allahabadi 1988) [9]، في المعادلة رقم (3) ان يكون دليل الضرر عبارة عن نسبة معامل المطيلية العظمى التي يصل عندها الهيكل الخرساني خلال الديناميكي غير الخطي مع المطيلية القصوى التي يتحملها المنشأ خلال التحليل السكوني غير الخطي Pushover Analysis (استيعابية المبنى).

في عام 1992 اقترح الباحثون كوناث واخرون (Kunnath, Reinhorn and Lobo) [10] علاقة لحساب دليل الضرر في المعادلة رقم (4) من قيم الدوران اللدن التي تحدث في المفاصل اللدنة للأعضاء الانشائية اثناء الزلزال أساسا في تقييم الضرر قياسا الى السعة القصوى لدوران المفصل، بالإضافة الى الطاقة المتبددة للعنصر الانشائي.

اعتمد الباحثون كاو فان واخرون (Cao Van, Ronagh, Ashraf, and Baji 2011) [11] في المعادلة رقم (5) على قيمة التشوه الدائم الذي يحصل للهيكل الانشائي بعد نهاية الزلزال (الازاحة المتبقية) وقد اشتق منها معادلة رقم (6) والتي تعتمد على الطاقة الهستيرية والطاقة القابلة للاسترداد في احتساب دليل الضرر. في عام (2008) اقترح الباحثان داتا وغوش (Datta and Ghosh 2008) [12] معادلة رقم (7) تعتمد على نفس المبدأ الذي اعتمد عليه Park في المعادلة رقم (1)، اذ انها تتشابه في الحد الثاني والذي يأخذ بنظر الاعتبار الطاقة الهستيرية المتبددة كمؤشر للضرر التراكمي ولكنها تختلف في تعريفها للحد الأول والذي يعبر عن مقدار التشوه الحاصل في المبنى ككل.

ادخل الباحثون هايت واخرون (Hait, Sil and Choudhury 2020) [13] على معادلة رقم (8) عدة عوامل ، مثل اقصى نسبة إزاحة نسبية تحدث بين الطوابق وكذلك قيمة الازاحة العظمى واعلى تشوه يحدث في الدوران بالنسبة للمفاصل اللدنة. في هذه الدراسة تم اقتراح معادلة رقم (9) والتي تعتمد على مبدأ الشغل الذي يحدث للزلزال قياسا الى قابلية الهيكل الاستيعابية للشغل الذي يسبب فيه حالة الفشل والانهيان وقد تم حساب دليل الضرر للحالات المختلفة وفق هذه المعادلة واعطت نتائج مقبولة جدا كما سيتم توضيحه لاحقا.

2. الأسس النظرية للتحليل الانشائي

1.2. التمثيل الانشائي للهيكل الخرساني المسلح

1.1.2. النموذج الرياضي

يجب تبسيط النموذج الرياضي للهيكل الانشائي الذي يتعرض لأي نوع من الأحمال، بحيث يكون قادراً على تمثيل السلوك الحقيقي للهيكل. في هذه الدراسة، تم تمثيل هيكل انشائي ثنائي الأبعاد من الخرسانة المسلحة ، باستخدام عنصر الهيكل (عتبة - عمود) (Beam-Column Element) مكون من عقدتين، كل عقدة تمتلك ثلاثة مركبات قوى (القوة المحورية، قوة القص والعزم) وثلاث درجات من حرية الحركة وهي (الإزاحة في اتجاه المحور الطولي للعنصر (u)، والأخر عمودياً على محور العنصر (v) ، والثالث هو زاوية الدوران (theta_z)) حول المحور العمودي على المستوى الذي يوجد فيه عنصر الهيكل)، كما هو مبين في الشكل رقم (1) [14].

2.1.2. النموذج التحليلي

النموذج التحليلي المعتمد في هذه الدراسة لتمثيل السلوك غير الخطي للعضو الهيكلي يتضمن نموذج الدونة

3.2.2. علاقة الإجهاد- الانفعال للحديد

إنَّ العلاقة المبسطة لمنحني (الإجهاد - الانفعال) لقضبان التسليح تحت قوى الشد موضحة في الشكل رقم (4)، إذ تم اعتماد العلاقة التي اقترحها كوليز وبوراس (Collins and Porasz) (1989) [17]، حيث ان هناك ثلاث مناطق تحكم سلوك حديد التسليح وهي منطقة المرونة ومنطقة المرونة - اللدونة ومنطقة اللدونة التامة. يتم استخدام معادلات مختلفة لتحديد منحني الإجهاد في كل منطقة، وكما موضح في ادناه:

for $\varepsilon \leq \varepsilon_y$ (elastic region)

$$f = E_s \varepsilon \quad \dots\dots\dots (9-2)$$

for $\varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh}$ (perfectly plastic region)

$$f = f_y \quad \dots\dots\dots (10-2)$$

for $\varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq \varepsilon_u$ (Park region)

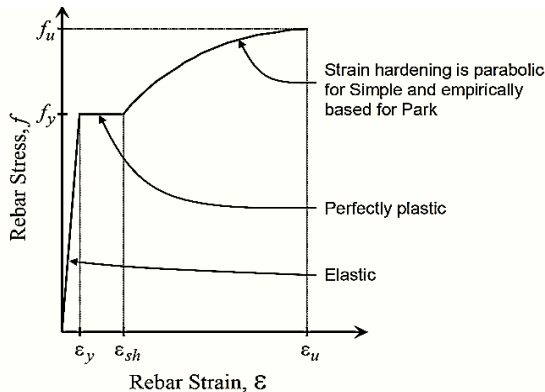
$$f = f_y \left(\frac{m(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) + 2}{60(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right) \dots (11-2)$$

$$r = \varepsilon_u - \varepsilon_{sh} \quad \dots\dots\dots (12-2)$$

$$m = \frac{\left(\frac{f_u}{f_y}\right) (30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \quad \dots\dots\dots (13-2)$$

اذ ان:

- E_s : معامل المرونة لقضبان التسليح.
- f : إجهاد قضبان التسليح خلال التحميل
- f_y : إجهاد الخضوع لقضبان التسليح.
- ε_y : انفعال الخضوع لقضبان التسليح.
- ε : انفعال قضبان التسليح خلال التحميل
- f_u : الإجهاد الأقصى لقضبان التسليح.
- ε_{sh} : بداية تصلب الانفعال قضبان التسليح
- ε_u : الانفعال الأقصى لقضبان التسليح.



الشكل رقم (4) يوضح علاقة (الإجهاد - الانفعال) لقضبان التسليح

4.2.2. منحني الخضوع

تم اعتماد منحني الخضوع المتمثل بعزم (الانحناء-القوة المحورية) أو (P-M₃) في رسم الحد الفاصل بين التصرف المرن واللدن أثناء سلوك الأعمدة الخرسانية إزاء القوة (P) المسالطة بموازاة المحور الطولي للعمود مع عزم الانحناء (M) وكما موضح في الشكل (5). بينما اعتمد عزم الخضوع (M_y) كمحدد لخضوع الاعتاب الخرسانية والانتقال من حالة السلوك المرن الى اللدن.

أما الجزء الخطي من المنحني عندما $\varepsilon_u < \varepsilon < 2\varepsilon'_c$ فيعبر عن إجهاد الخرسانة غير المحصورة عند أي مرحلة من التحميل بالمعادلة التالية:

$$f = \left(\frac{2f'_c \times r}{r-1+2r} \right) \times \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - 2\varepsilon'_c} \right) \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

إنَّ:

- ε : انفعال الخرسانة غير المحصورة
- f : إجهاد الخرسانة غير المحصورة
- E : معامل المرونة
- f'_c : مقاومة الانضغاط للخرسانة غير المحصورة.
- ε'_c : انفعال الخرسانة عند مقاومة الانضغاط f'_c
- ε_u : قابلية انفعال الخرسانة القصوى

2.2.2. الخرسانة المحصورة

الشكل (3) يوضح نموذج ماندر Mander لمنحني العلاقة (الإجهاد - الانفعال) للخرسانة المحصورة، ويعبر عن إجهاد الخرسانة المحصورة من المعادلة التالية [16].

$$f_c = \frac{f'_{cc} \times x \times r}{r-1+xr} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

$$\varepsilon_{cc} = \left\{ 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) + 1 \right\} \times \varepsilon'_c \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

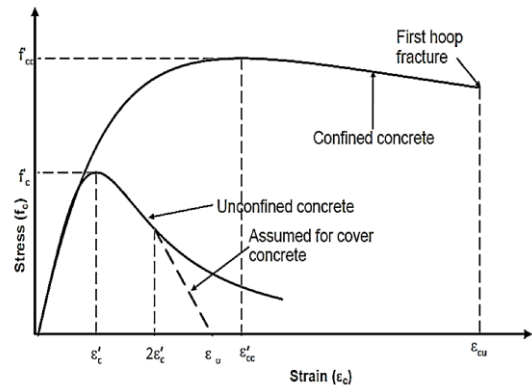
$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_{cc}} \quad \dots\dots\dots (6-2)$$

$$r = \frac{E}{E - E_{sec}} \quad \dots\dots\dots (7-2)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon'_{cc}} \quad \dots\dots\dots (8-2)$$

إنَّ:

- f'_{cc} : مقاومة الانضغاط للخرسانة المحصورة.
- ε'_{cc} : انفعال الخرسانة من مقاومة الانضغاط للخرسانة المحصور.
- ε'_u : الانفعال الأقصى للخرسانة غير المحصورة، وانفعال التهشم للخرسانة المحصورة.
- f_c : إجهاد الخرسانة المحصورة.
- E_{sec} : معامل المرونة القاطع.



الشكل رقم (3) نموذج Mander لمنحني (الإجهاد - الانفعال) للخرسانة المحصورة وغير المحصورة

ويتيح برنامج ETABS للمستخدم إعداد نموذج منحني (الإجهاد - الانفعال)، أو استخدام النماذج المخزونة في البرنامج إذ يعد نموذج Mander من النماذج المخزونة في مكتبة البرنامج الذي اعتمد في الدراسة الحالية.

حيث تقسم مستويات الأداء حسب (FEMA-356) إلى ثلاثة مستويات:

1- Immediate Occupancy (IO): يتوقع أن تعمل المنشآت بشكل مقبول ولكن ليس من الضروري أن تكون قادرة على تأدية الخدمات كلها حيث من الممكن أن تتضرر قسم من المحتويات.

3- Life Safety (LS): يرافق هذا المستوى حالة من الضرر مع احتمالية منخفضة جداً لتهديد سلامة الحياة.

4- Collapse Prevention (CP): يحدث في هذا المستوى أضرار كبيرة في المنشأ بالإضافة إلى إمكانية انهيار بعض الأجزاء ويصبح المنشأ غير قادر على تأدية وظائفه.

3. منهجية البحث

1.3. تصميم الهيكل الخرساني

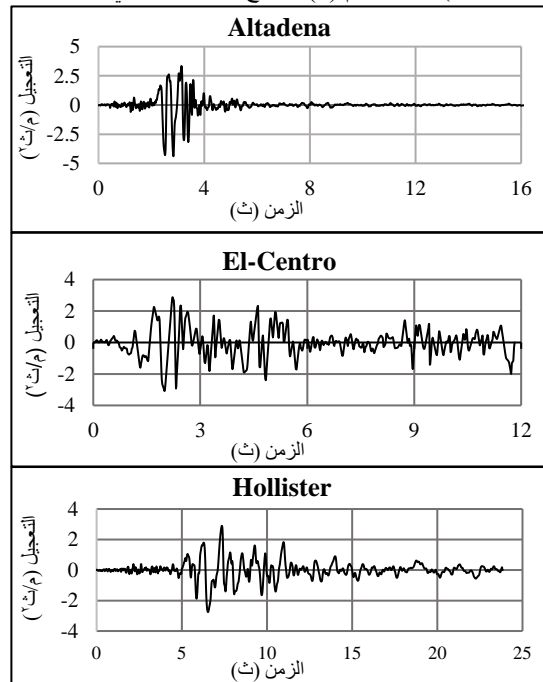
صمم هيكل خرساني مسلح ثنائي الأبعاد مكون من عشرة طوابق بارتفاع (4م) للطابق الواحد، وثلاثة فضاءات بمسافة (5م) لكل فضاء، بالاعتماد على مدونة (ETABS Version 19.0.0). وقد تم التصميم وفق الاحتمال والمحددات الموضحة في الجدول رقم (2). والشكل رقم (8) يوضح التفاصيل الإنشائية للمقاطع وحديد التسليح الخاصة بالهيكل.

جدول رقم (2) يوضح المحددات التي استخدمت في التصميم

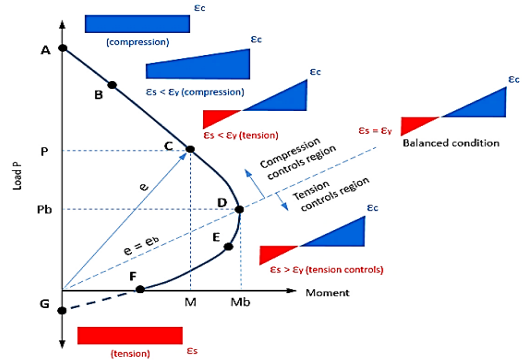
المحددات	القيمة
كثافة الخرسانة (kg/m^3)	2400
نسبة بواسون Poisson's ratio	0.2
الحمل الميت Dead Load (kN/m)	15
الحمل الحي Live Load (kN/m)	12
اجهاد الخضوع لحديد التسليح (MPa) (fy)	414
مقاومة انضغاط الخرسانة (MPa) (fc')	40

2.3. تسليط الحمل الزلزالي

تم تعريض الهيكل الخرساني لثلاثة أنواع من الاحمال الزلزالية لغرض التعرف على استجابة المنشأ لها والتغير الحاصل في سلوك الهيكل الخرساني من خلال تغير القوى الزلزالية المسلطة عليه ومعرفة نسبة الضرر في كل حالة، وقد تم الاستعانة بمكتبة برنامج (ETABS) للحصول على سجلات تلك الزلازل التي جرى تسليطها على الهيكل الخرساني وهي: (El-Centro)، (Altadena)، (Hollister) والشكل رقم (9) يوضح السجل الزلزالي لكل حالة.



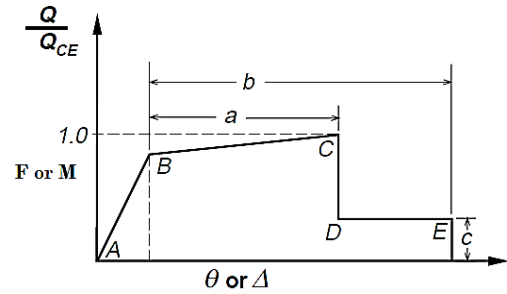
الشكل (9) السجلات الزلزالية لحالات التحميل الثلاث



الشكل رقم (5) منحنى الخضوع يوضح تداخل القوة المحورية مع العزم

5.2.2. سلوك المفصل اللدن

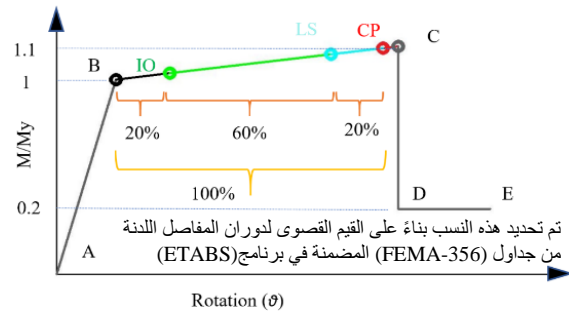
يُعرّف المفصل اللدن بأنه الانتقال من مرحلة المرنة إلى مرحلة اللدونة في حالة السلوك (المرن - اللدن) للعناصر الإنشائية، ويمتد المفصل اللدن على الطول القصير للعنصر الإنشائي، وتعتمد القيم الحقيقية لطول المفصل اللدن على المقطع الإنشائي وتوزيع الحمل فيه. وفي الدراسة الحالية تم تمثيل المفصل اللدن في برنامج ETABS على شكل نقطة مفصلية تحدث فيها جميع التشوهات اللدنة. وأُعد منحنى (عزم-دوران) والموضح في الشكل رقم (6)



الشكل رقم (6) يوضح العلاقة (العزم - دوران)

في تمثيل سلوك المفصل اللدن في مراحل متعددة وحسب ما حُدد في مدونة (ATC-40) [18] و (FEMA-356) [19] حيث ان النقاط (A,B,C,D,E) المبينة في الشكل تُحدد على أساس خصائص المقطع الإنشائي من حيث كمية التسليح والابعاد ومقاومة الانضغاط وغيرها من الخصائص والموضحة في جداول خاصة في المدونة اعلاه.

يوضح الشكل (7) مستويات الأداء المختلفة والنسب المئوية لحالات الأداء بعد تكون المفصل اللدن في الأعضاء الإنشائية،

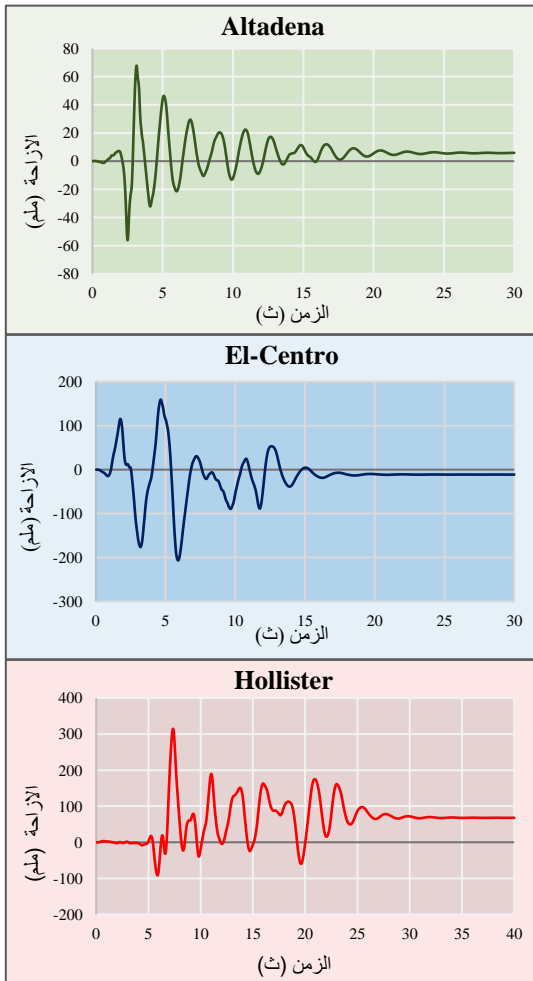


الشكل رقم (7) يوضح مراحل تطور المفصل اللدن وعلاقة (العزم - الدوران) مع مستويات الاداء

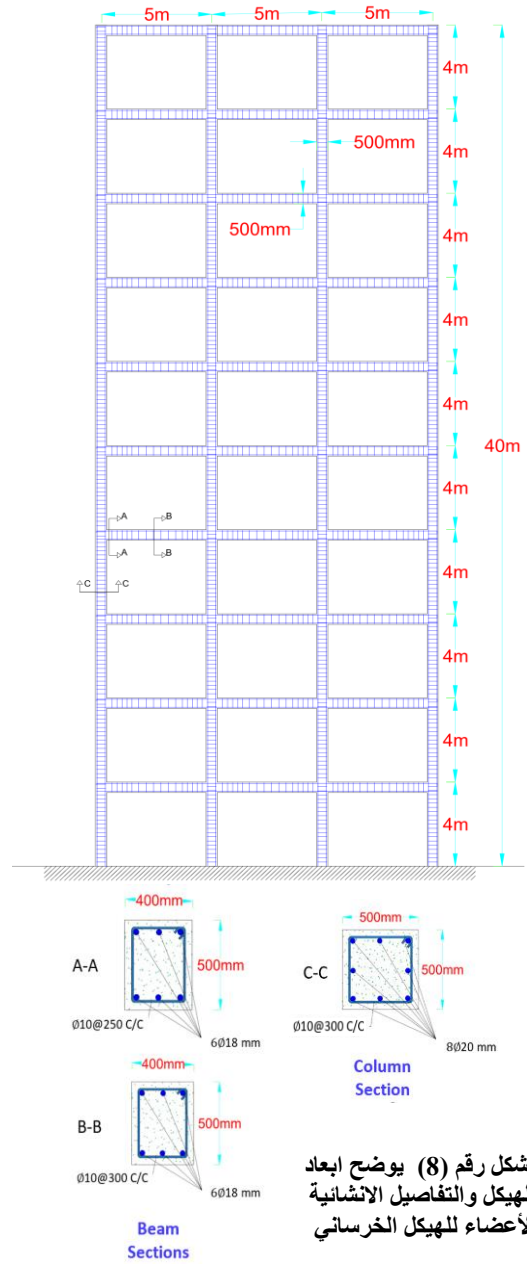
جدول رقم (3) يوضح بعض المحددات المستخدمة في عملية التحليل الديناميكي غير الخطي

المحددات	القيمة
طريقة التحليل	تحليل سجل التاريخ الزمني غير الخطي Time History Analysis
طريقة حل معادلة الحركة	نيومارك Newmark Direct Integration ($\beta=0.25$ $\gamma=0.5$)
حجم الخطوة	0.02
نسبة الاخماد	%5
مصدر الكتلة	الحمل الميت + 0.25 الحمل الحي
قيمة الصلابة الفعالة للعتبات	(0.5EI)
قيمة الصلابة الفعالة للاعمدة	(0.7EI)
التحميل الابتدائي	هيكمل مجهد Stressed frame

اظهر التحليل الديناميكي غير الخطي للهيكل الخرساني المسلح أنماط مختلفة من الاستجابة تجاه الاحمال الزلزالية المسلطة عليه كما موضح في الشكل رقم (10). وقد سجل زلزال (Hollister) اكبر إزاحة عظمى للهيكل عند اعلى نقطة في الطابق العاشر (314.6mm)، بينما كانت بقية الازاحات بمقدار (68.7mm) و (-206.6 mm) للحالات الزلزالية (Altadena) و (El Centro) على التوالي كما موضح في الشكل رقم (11).



الشكل (10) يوضح استجابة الهيكل لتأثير الاحمال الزلزالية

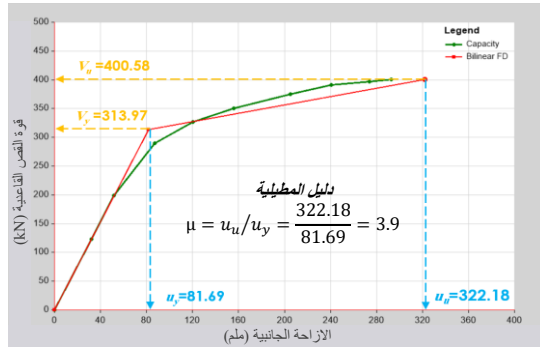


الشكل رقم (8) يوضح ابعاد الهيكل والتفاصيل الانشائية لأعضاء للهيكل الخرساني

3.3 التحليل الديناميكي غير الخطي للمنشأ

لغرض الحصول على منحنى القوى العزوم وقيم التشوهات العظمى والمتبقية التي تحدث في الهيكل الخرساني أثناء وبعد انتهاء فترة الهزة الأرضية، تم تحليل المنشأ تحليلًا ديناميكيًا غير خطي وتم استخدام أسلوب (Time History Analysis) بطريقة (Newmark) المتنبئة المصححة والتي يدعمها برنامج (ETABS) في التحليل غير الخطي. الجدول رقم (3) يوضح بعض المحددات والقيم التي جرى اعتمادها في برنامج (ETABS) أثناء عملية التحليل.

اعتمد تخفيض صلابة الإنشاء للأعضاء الانشائية بمقدار %50 للاعتاب وبمقدار %30 للأعمدة حسب توصيات (ATC-40) و (FEMA-356) في تحليل الأبنية المعرضة للزلازل، لكون الأعضاء مصممة مسبقًا بطريقة (Ultimate Strength).



الشكل رقم (12) يوضح المنحني الحقيقي والافتراضي للتحليل السكوني غير الخطي

4. نتائج التحليل والمناقشة

1.4 دليل الضرر ومستويات الأداء

عند معاينة الشكل رقم (13) والذي يوضح طبيعة ومواضع تشكل المفاصل اللدنة بعد انتهاء احمال الهزات الارضية نلاحظ ما يلي:

- بالنسبة للمفاصل اللدنة في حالة زلزال (Altadena) ، فان جميع المفاصل اللدنة كانت ضمن المرحلة من (B-IO) ، وهذا ما يفسر نسب الضرر المتدنية التي سيتم الحصول عليها لاحقاً.
- كما لوحظ تشكل مفصل لدن في حالة الانهيار (CP) لحالة الزلزال (Hollister) عند الطابق الثالث ليصل الى المرحلة (D-E) مما يعني انهيار العضو الانشائي عند هذا الطابق، في حين كانت مستويات الضرر في حالة التحميل (El Centro) متوسطة الضرر لوقوعها ضمن المرحلة (IO-LS) ، وذلك بالرغم من ان قيمة ذروة التعجيل (Peak) لزلزال (El Centro) اعلى من ذروة زلزال (Hollister) ، الا ان استجابة الهيكل كانت مختلفة وحقت ازاحة عظمية اعلى في حالة (Hollister) كما لوحظ في الشكل رقم (10) مما انعكس على شكل ضرر اكبر بالأعضاء الانشائية.

- لوحظ بان معظم الضرر تركز في الطابق الثالث والرابع للهيكل لجميع الحالات، مما انعكس على قيم الازاحة النسبية بين الطوابق (Drift Ratio) والتي تجاوزت القيم المسموح بها حسب مدونة (ASCE 7-16) [6] والتي حددت بمقدار (0.01) على افتراض فئة الاشغال الخاصة بالمنشأ هي الفئة (IV) وكما موضح في الشكل رقم (14).

2.4 حساب دليل الضرر

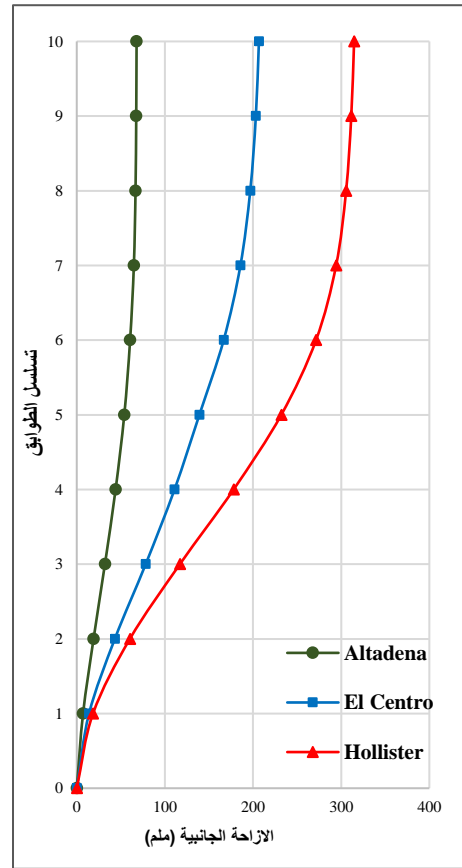
تم احتساب دليل الضرر بالطرق الواردة في الجدول رقم (1) بالاعتماد على القيم المتحصلة من التحليل السكوني غير الخطي والتحليل الديناميكي غير الخطي بالإضافة الى الاستعانة بمخرجات قيم الطاقة الهستيرية المتبددة ومقدار التشوهات في المفاصل اللدنة التي تضمنتها جداول برنامج (ETABS).

اعتمدت في هذه الدراسة استخدام منهجية جديدة في تحسين وتحديد نسبة ضرر العضو الانشائي، اذ تم مقارنة قيمة الضرر في مفاصل كل عضو على حدة واعتماد قيمة ضرر المفصل اللدن الذي حصل فيه اعلى ضرر لتمثل قيمته الضرر الفعلي للعنصر، مع اهمال القيمة الأصغر في نفس العضو، على اعتبار ان أداء العنصر الانشائي وصل الى نفس المرحلة التي وصلت اليها اكبر قيمة للضرر حدثت في مفاصله اللدنة.

كما تم استخدام الطريقة التي اقترحها (Powell and Allahabadi 1988) [9] والموضحة في المعادلة (1-4) في عملية تجميع اضرار الأعضاء الانشائية لتمثل الضرر الكلي للمنشأ (Global Damage) وذلك في جميع المعادلات المصنفة كي تعطي نتائجها ضرر محلي (Local Damage).

$$DI_t = \frac{\sum_{i=1}^n DI_i^2}{\sum_{i=1}^n DI_i} \quad \dots \dots \dots (1-4)$$

4.3 التحليل السكوني غير الخطي للمنشأ

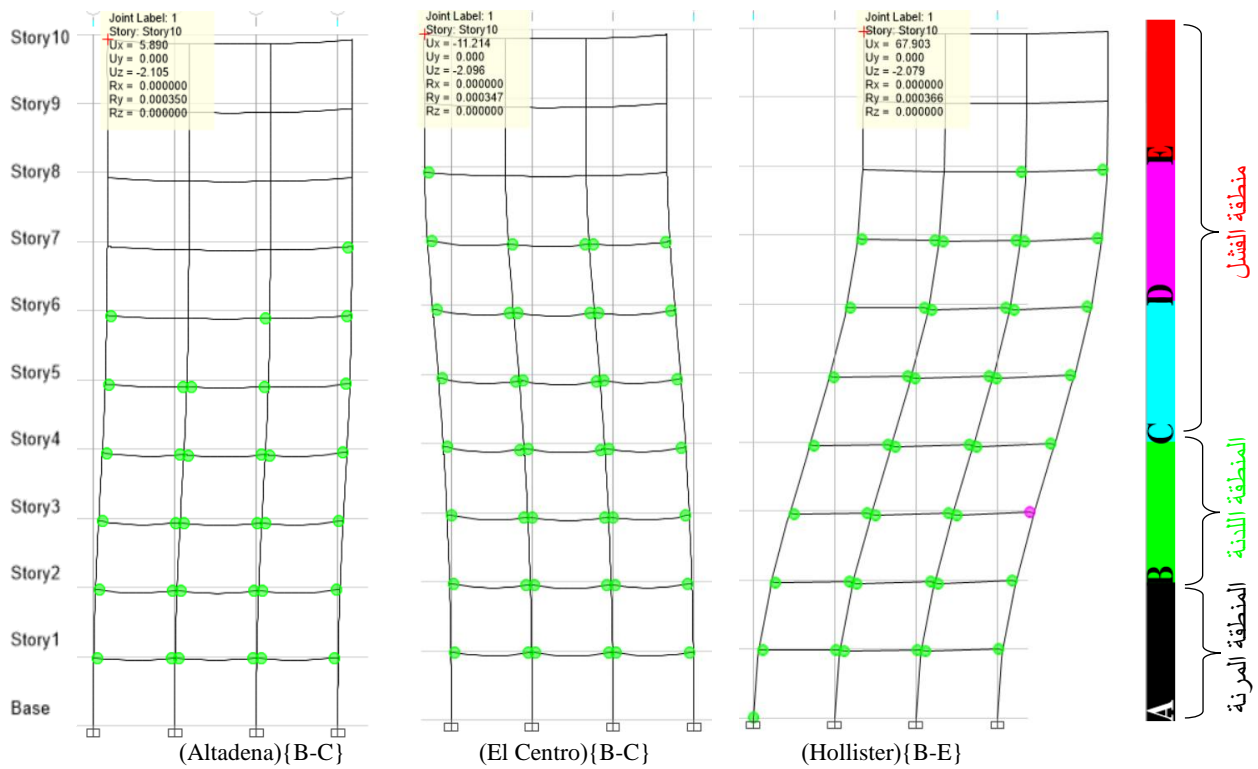


الشكل (11) يوضح قيم الازاحات العظمى التي حصلت للهيكل خلال الحالات الزلزالية المختلفة

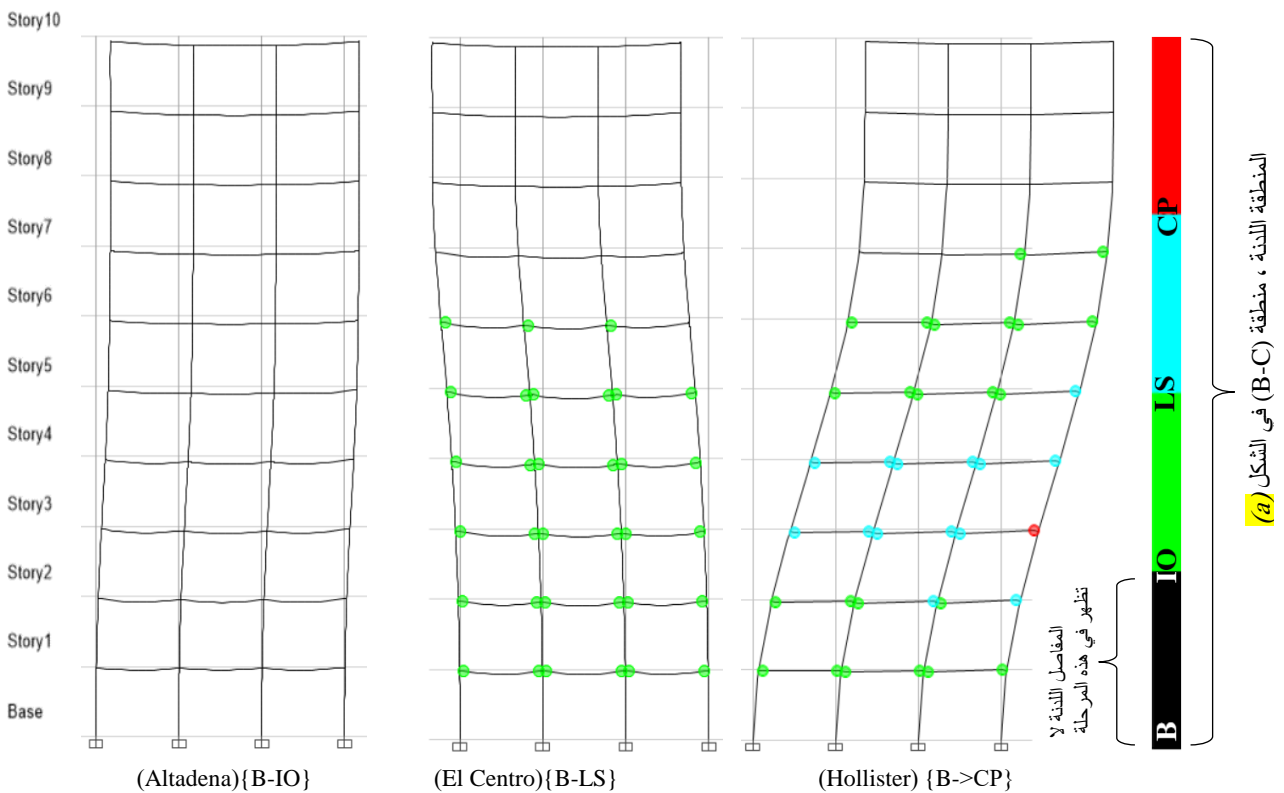
تتطلب قسم من معادلات حساب دليل الضرر ايجاد القيم القصوى وقيم الخضوع لكل من الازاحات وقوى القص الخاصة بالهيكل الانشائي، وحيث انه لا يمكن من خلال التحليل الديناميكي الحصول عليها، تم اجراء تحليل سكوني لا خطي يحاكي التحليل الديناميكي (Pushover Analysis) للهيكل، وتم افتراض المحددات الواردة في الجدول رقم (4) لأجراء التحليل وفقاً للمواصفات الواردة في مدونة (ASCE-7) حيث تم استخدام طريقة (ASCE 41-13 NSP) في رسم منحنيات (Actual Pushover & Idealized Curves) والتي يدعمها برنامج (ETABS) وكانت النتائج كما موضح في الشكل رقم (12).

جدول رقم (4) يوضح بعض المحددات المستخدمة في عملية التحليل السكوني غير الخطي

المحددات	الصف أو القيمة
نوع الرسم (Plot Type)	ASCE 41-13 NSP
المصدر (Spectrum Source)	ASCE7-10 General
تعجيل $S_s(g)$	1
تعجيل $S_i(g)$	0.4
صنف الموقع	D
نسبة الاجماد	5%
طول الفترة، Long Period	8
$T_1(sec.)$	



(a) مستويات المرونة - اللدونة - الفشل



(b) مستويات الأداء خلال السلوك اللدن

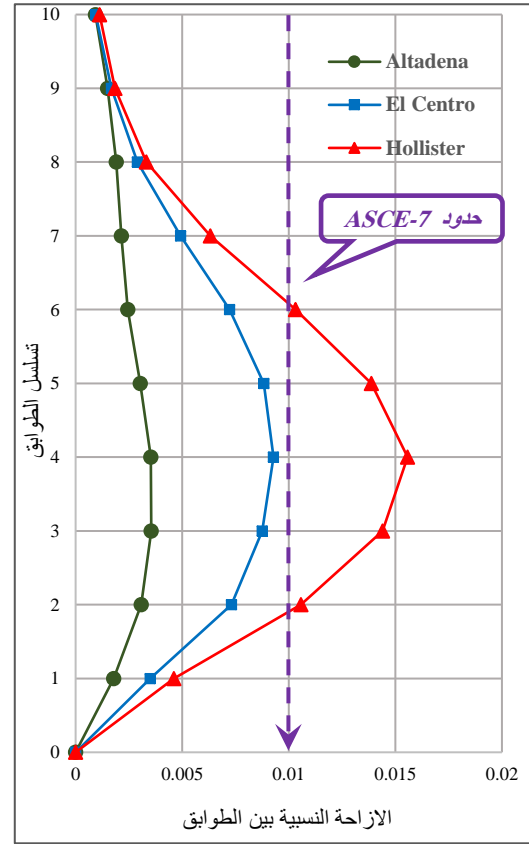
شكل رقم (13) يوضح حالة وتصرف المفاصل اللدنة نهاية التحليل الحركي

اعتمدت قيمة دليل الضرر (0%) لقسم من المعادلات التي اظهرت نتائج اقل من صفر، كما تم اعتماد قيمة دليل الضرر 100% للمعادلات التي ظهر فيها دليل الضرر اكبر من 100%، تجدر الإشارة الى ان ظهور هكذا نتائج تتجاوز حدود دليل الضرر المفترض ان يكون محصورا بين (0) و(100) تعد من العيوب الأكثر شيوعا لكون ان لهذه المعادلات بعض القيود وقد لا تعكس حالة الضرر بشكل مناسب حيث ان معظم مؤشرات الضرر الحالية لا تفي بهذه المعايير [11]. وكانت النتائج كما موضح في الشكل رقم (15).

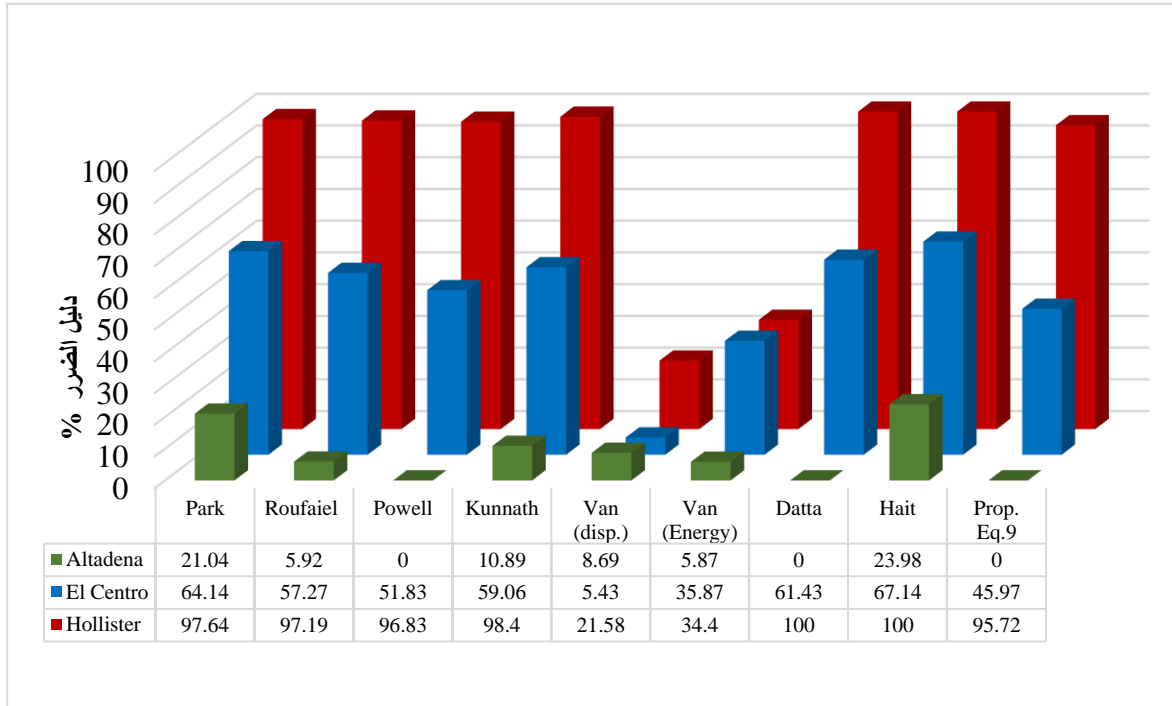
3.4 تقييم طرق حساب دليل الضرر

عند مقارنة نسب الضرر التي تم الحصول عليها لوضع:

- وجود تجانس وتقارب كبيرين في مؤشرات الضرر لحالات التحميل الزلزالي المختلفة وذلك باستثناء طريقة (Cao Van) في المعادلة رقم (5,6) حيث يمكن اعتماد معدل هذه الطرق المتقاربة لنحصل على نسب ضرر (8.83%) و(58.12%) و(97.9%) للحالات (Altadena) و (El Centro) و (Hollister) على التوالي
 - يلاحظ بان نسبة الضرر التي ظهرت باستخدام المعادلة رقم 5 والتي تعتمد على مبدأ الازاحة المتبقية، اذ كانت نسبة الضرر لحالة الزلزال (El Centro) اقل من نسبة الضرر للحالة (Altadena)، وهذا غير منطقي إذا ما قورنت النتائج مع عدد وطبيعة المفاصل المتكونة في كلا الحالتين.
- يمكن تفسير هذا التفاوت في القيم اذا ما اخذنا بنظر الاعتبار فلسفة العمل التي تحكم هذه الطريقة، اذ ان عدم وجود ازاحة متبقية بعد تأثير الحمل الزلزالي يعني بان الهيكل ما يزال في حالة المرونة وان الضرر الذي لحق بالهيكل يساوي صفر، وكذلك اذا كانت قيمة الازاحة المتبقية مساوية لقيمة الازاحة العظمى فيعني ذلك بان دليل الضرر يساوي واحد وان الهيكل وصل الى حد الانهيار التام، ولكن كل ذلك يكون صحيحا عندما تكون القوة المسلطة في اتجاه واحد، وهذا ما لا ينطبق على الحمل الزلزالي الذي تكون القوة الجانبية المؤثرة عليه وكذلك الازاحات هي ذات قيم موجبة وسالبة نتيجة الاهتزازات المتكررة اثناء الهزة الأرضية.



شكل رقم (14) يوضح الازاحة النسبية للطوابق (Drift)



شكل رقم (15) يوضح نتائج دليل الضرر التي تم الحصول عليها بالطرق الواردة في الجدول رقم (1)

- buildings* (Earthquake spectra, no. 1). 2000, pp. 227-239.
- [5] C. Rojahn, "ATC-20-1 field manual: Postearthquake safety evaluation of buildings," *Applied Technology Council: Redwood City, CA, USA*, 2005.
- [6] ASCE, "Minimum design loads for buildings and other structures," 2013: American Society of Civil Engineers.
- [7] Y.-J. Park and A. H.-S. Ang, "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete," *Journal of structural engineering*, vol. 111, no. 4, pp. 722-739, 1985.
- [8] M. S. Roufaiel and C. Meyer, "Analytical modeling of hysteretic behavior of R/C frames," *Journal of Structural Engineering*, vol. 113, no. 3, pp. 429-444, 1987.
- [9] G. H. Powell and R. Allahabadi, "Seismic damage prediction by deterministic methods: concepts and procedures," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 16, no. 5, pp. 719-734, 1988.
- [10] S. K. Kunnath, A. M. Reinhorn, and R. Lobo, *IDARC Version 3.0: A program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures*. National Center for Earthquake Engineering Research Buffalo, NY, 1992.
- [11] V. Cao Van, H. Ronagh, M. Ashraf, and H. Baji, "A new damage index for reinforced concrete structures subjected to seismic loads," *structure*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2011.
- [12] D. Datta and S. Ghosh, "Estimating Park-Ang damage index using equivalent systems," in *Proc. of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.
- [13] P. Hait, A. Sil, and S. Choudhury, "Damage Assessment of Reinforced Concrete-Framed Building Considering Multiple Demand Parameters in Indian Codal Provisions," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 121-139, 2020.
- [14] F. Mazza and M. Mazza, "Nonlinear analysis of spatial framed structures by a lumped plasticity model based on the Haar-Kàrmàn principle," *Computational Mechanics*, vol. 45, no. 6, pp. 647-664, 2010.
- [15] G. H. Powell and P. F.-S. Chen, "3D beam-column element with generalized plastic hinges," *Journal of engineering mechanics*, vol. 112, no. 7, pp. 627-641, 1986.
- [16] J. B. Mander, M. J. Priestley, and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of structural engineering*, vol. 114, no. 8, pp. 1804-1826, 1988.
- [17] M. P. Collins and A. Porasz, "Shear design for high strength concrete," *CEB Bulletin d'information*, vol. 193, pp. 77-83, 1989.
- [18] A. T. Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Report No. SSC 96-01: ATC-40*, vol. 1, 1996.
- [19] B. S. S. Council, "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings," *Report FEMA-356, Washington, DC*, 2000.
- يلاحظ أيضا بان نتائج طريقة كاو فان (Cao Van) في المعادلة رقم (6) والتي تعتمد على الطاقة الهستيرية بشكل كامل في إيجاد نسبة الضرر تعد مقبولة لحالة الزلزال (Altadena) ومتوافقة أيضا مع بقية نتائج الطرق الأخرى، اما في حالة الزلزال (El Centro) فنلاحظ وجود اختلاف نسبي، إذ أعطت نتائج تقل عن معدل بقية الطرق بنسبة 38% عن المعدل العام، بينما يزداد الفارق للحالة (Hollister) بشكل كبير ليصل الى بنسبة 65% عن معدل باقي الطرق تقريبا، مما يعني عدم فعالية المعادلة كلما كانت نسبة الضرر متزايدة في المبنى. وقد يعود ذلك الى اعتماد المعادلة بشكل أساسي على الطاقة الهستيرية دون بقية العوامل الأخرى التي تضمنتها المعادلات الأخرى.
- ### 5. الاستنتاجات
- يمكن من خلال هذه الدراسة استنتاج النقاط التالية:
- ان حساب دليل الضرر بالطرق المركبة (combined methods) والتي تأخذ بنظر الاعتبار المتغيرات الفيزيائية والهندسية للمنشأ وتجمع بين الطاقة الهستيرية واقصى تشوه يحصل للعضو او المنشأ اثناء الزلزال، تتطابق الى حد كبير مع الطرق المعتمدة على المطيلية والازاحة القصوى التي تصل اليها اعلى نقطة في المبنى، وتعكس الى حد كبير حالة المفاصل اللدنة المتشكلة ومستويات الاداء وكذلك الازاحات النسبية (Drifts) التي تحصل في كل حالة من حالات التحميل، وهذا ما ينطبق أيضا على المعادلة التي تم اقتراحها في هذه الدراسة والتي اعتمدت على اعلى قيمة للازاحة وقوة قص القاعدة التي يصل اليها المنشأ.
 - الحذر من استخدام المعادلات التي تقوم بحساب دليل الضرر على أساس الازاحات المتبقية (u_{res})، حيث ان قيم هذه الازاحات تختلف باختلاف نوع وطبيعة الزلزال المسلط، وهذا ما ظهر واضحا في معادلة (Cao Van) للازاحة المتبقية، وعليه يمكن ان تكون هذه الطريقة كفاءة في الاحمال الصدمية الأخرى كالأحمال الانفجارية، ولكنها ليس كذلك في الاحمال الزلزالية.
 - الاعتماد على المعادلات التي تقوم على اساس الطاقة الهستيرية فقط في حساب دليل الضرر قد يكون غير كفوء في حالة الاضرار المتوسطة والكبيرة للمنشأ، وهذا ما حصل في معادلة رقم (Cao Van) للطاقة، إذ لم تعكس هذه المعادلة مستوى الضرر الفعلي عندما يزداد الضرر بتغير الحمل الزلزالي.
 - قيمة الازاحات النسبية بين الطوابق (Drift) تعد مؤشرا واضحا لمستوى الاداء وللتكهن بنسبة الضرر التي وصل اليها المنشأ حسب تصنيفات مدونة (ASCE 7-16) وغيرها من المدونات.
 - يستحسن حساب الضرر لاي منشأ بأكثر من طريقة، للتأكد من سلامة المنشأ وعدم الاعتماد على طريقة واحدة تحدد بمتغيرات قليلة ربما تعطي نتائج غير دقيقة لنوع معين من الحمل الزلزالي، ويفضل اعتماد معدل قيم الضرر للنتائج المتقاربة. مع ضرورة ان تكون هذه القيم معيرة عن حالة المفاصل اللدنة المتشكلة وان تعكس بوضوح قيم الازاحات النسبية (Drifts) للطوابق، لكون ان جميع هذه المعادلات هي معادلات تقريبية، تقترب أبو تبتعد عن تمثيلها للقيمة الحقيقية تبعاً لنوع المنشأ وطبيعة الزلزال.
- ### المصادر
- [1] S. K. Duggal, *Earthquake resistant design of structures*. Oxford university press New Delhi, 2007.
- [2] K. Abaas, "Technical and Structural Evaluation of Damaged Reinforced Concrete Structures Using a Computer Program," Master degree, Damascus University, Syrian Arab Republic, 2015.
- [3] G. Grünthal, "European macroseismic scale 1998," European Seismological Commission (ESC), 1998.
- [4] D. Shapiro, C. Rojahn, L. D. Reaveley, J. R. Smith, and U. Morelli, *NEHRP guidelines and commentary for the seismic rehabilitation of*

Evaluation of the Methods Used to Calculate the Structural Damage Index for Reinforced Concrete Structures Exposed to Various Earthquakes

Ragheed Najeeb Abdullah

ragheed1976@yahoo.com

Sofyan Yonis Ahmed

dr.sofyan@yahoo.com

Civil Engineering Department, Collage of Engineering, University of Mosul

ABSTRACT

This study deals with the structural evaluation and comparison is made between the methods of calculating the damage index of a two-dimensional reinforced concrete structure. A three bay, ten storeys frame was designed based on the specifications of the American Concrete Institute (ACI 318-19), the structure was analyzed by non-linear dynamic analysis method by exposing the frame to three different types of earthquakes using (ETABS Version 19.0.0) program. Several methods proposed by researchers were used for calculating the total damage indices of the structure, another method was suggested in the present work, there was convergence in the values calculated on the basis of the composite methods of physical and engineering variables compared with the methods that depend on engineering variables only, such as ductility or displacement. The damage indices based on physical variables only, such as the hysterical dissipated energy, was considered ineffective in representing the real damage, especially in the case of medium and large damages, and it is advisable to adopt more than one method to ensure the safety of the structure and not to rely on one method determined by a few variables in order to express the exact and actual damage in all aspects.

keywords:

Damage Index; Seismic load; Performance levels; Nonlinear dynamic analysis; Plastic hinge