

## التقييم الزلزالي المبني على الأداء لمبنى سكني إطارى من الخرسانة المسلحة باستخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي والتحليل الديناميكي اللاخطي السريع

م. رانية الأحمر (1)      أ.د. ميادة الأحمد الكوسا (2)  
د.م. أمجد الحلواني (3)

### الملخص

تناول هذا البحث إجراء التقييم الزلزالي وفق طريقة الأداء لنموذج مبنى سكني إطارى من الخرسانة المسلحة موجود في إيطاليا ومُصمم على الأحمال الشاقولية فقط، وذلك باستخدام طريقتي التحليل الستاتيكي اللاخطي Pushover والتحليل الديناميكي اللاخطي النمطي السريع FNA. ولهذا الغرض تم تعريف هذا النموذج لثلاثة زلازل متوسطة حدثت في إيطاليا بشدة زلزالية متقاربة وبأنواع صدوع مختلفة، اثنان منها ناتجة عن حركات ارتدادية. أظهرت نتائج الدراسة الحالية أن التحليل الديناميكي اللاخطي السريع أعطى قيماً أخطر من أجل التقييم الزلزالي المبني على الأداء وهو الشيء المتوقع، ومع ذلك كان للزلازل المدروسة تأثيرات مختلفة على المنشأ فأعطى الزلازل الأساسي غير الارتدادي سلوكاً أخطر على المنشأ بالاتجاهين، وهذا يؤكد ضرورة اختيار الزلازل بشكل منهجي يعتمد على جيولوجية المنطقة وآلية الصدوع المتشكلة وغير ذلك من الشروط حسب ماتنص عليه الكودات والأبحاث.

**الكلمات المفتاحية:** التقييم الزلزالي المبني على الأداء، التحليل الستاتيكي اللاخطي Pushover، التحليل اللاخطي السريع FNA، مستويات الأداء، الإشغال الفوري (IO)، أمان الحياة (LS)، منع الانهيار (CP)، الانهيار (CO).

(1) طالبة دكتوراه في قسم الهندسة الإنشائية الزلزالية في المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية - جامعة دمشق

(2) أستاذة في قسم الهندسة الإنشائية ونائب العميد للشؤون العلمية في كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

(3) مدرّس في قسم الهندسة الإنشائية الزلزالية في المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية - جامعة دمشق

## Performance based Seismic Evaluation of a Residential Reinforced Concrete Frame Building Using Nonlinear Static Analysis and Fast Nonlinear Analysis

<sup>(1)</sup>Eng. Rania Al-Ahmar1

<sup>(2)</sup>Prof. Mayada Al Ahmad Al Kousa

<sup>(3)</sup>Dr. Amjad Al-Helwani

### Abstract

In this paper, a performance-based seismic evaluation of a residential reinforced concrete frame building located in Italy which was designed only for gravity loads is performed using Nonlinear Static Analysis and Fast Nonlinear Analysis (FNA). This building within the current study is subjected to three moderate earthquakes that occurred in Italy with a close magnitude level and different types of faults, two of them are aftershock earthquakes. The current investigation has shown that the Fast Nonlinear Analysis has given more critical values for performance-based seismic evaluation, which is expected. However, the used earthquakes have different effects on the structure, where the non-aftershock primary earthquake has given a more critical behavior for the building in both directions. This confirms the necessity of selecting earthquakes methodically depending on site geology, mechanisms of faults formed, and other conditions as codes and researches refer.

**Keywords:** Performance based Seismic Evaluation, Nonlinear Static Analysis (Pushover), Fast Nonlinear Analysis (FNA), Performance levels, Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), Collapse Prevention (CP), Collapse (CO).

---

<sup>(1)</sup> Eng., PhD student in the Structural Earthquake Engineering Department of the Higher Institute of Earthquake Studies and Research (HIESR)- Damascus University

<sup>(2)</sup> Prof., Professor in the Structural Engineering Department and Vice Dean for Scientific Affairs at the Civil Engineering Faculty- Damascus University.

<sup>(3)</sup>Dr., Lecturer in the Structural Earthquake Engineering Department of the Higher Institute of Earthquake Studies and Research (HIESR)- Damascus University.

For the abstract in Arabic see pages.( - )

## 1-المقدمة:

لاخطية مبسطة لتقدير التشوهات الإنشائية الزلزالية، ويُسمح باستخدامه في المنشآت التي لا تكون تأثيرات الأنماط العليا فيها مهمة<sup>[4]</sup>. يتم تحويل التحليل اللاخطي إلى سلسلة من التحليلات الخطية مع مكافئة النظام متعدد درجات الحرية بنظام وحيد درجة الحرية، ويتم تعريض النظام متعدد درجة الحرية إلى نموذج تحميل جانبي أو أكثر يحاكي في معظم الحالات التسارعات النسبية المرتبطة بالنمط الأول للاهتزاز، حيث يتم زيادة الحمل الجانبي المطبق تدريجياً حتى يصل المنشأ إلى نهاية مرحلة المرونة ثم دخوله مرحلة اللدونة مع أي زيادة في الحمل الجانبي ويبدأ عندها تشكل المفاصل اللدنة مع تغير الصلابة وزيادة كل من الدور وانتقال سقف المنشأ حتى الوصول إلى الانتقال الأعظمي الممكن، لينتج عن تحليل الدفع الجانبي منحنياً يمثل الاستجابة الفعلية للمبنى. إن الانتقال الهدف يمثل الانتقال الأعظمي المحتمل حدوثه أثناء الزلزال التصميمي، كما أن القوى الداخلية المحسوبة ستكون تقديرات تقريبية معقولة للقوى المتوقعة أثناء الزلزال التصميمي وذلك نظراً لأن النموذج الرياضي يحسب استجابة المواد اللاخطية بشكل مباشر<sup>[4]</sup>.

قام كل من Rostam Alilou and Pouraminian<sup>[2]</sup> (2019) بتقييم الهشاشة الزلزالية باستخدام كل من تحليل السجل الزماني اللاخطي (NLTHA) Nonlinear Time History Analysis باعتماد التكامل المباشر والتحليل اللاخطي السريع (FNA) Fast Nonlinear Analysis باعتماد تحليل الأنماط وذلك لإطار من الخرسانة المسلحة بجملتين مقاومتين للزلازل وهما: إطار مقاوم للعزوم (MRF) Moment Resistant Frame فقط، وإطار مقاوم للعزوم مزوّد بمخمدات اللزوجة المرنة (MRF-VD) المرنة MRF equipped by Visco-elastic Dampers.

يعد التنبؤ بالاستجابات الزلزالية اللامرنة وتقييم الأداء الزلزالي لمنشآت الأبنية من المواضيع المهمة جداً في التصميم الزلزالي وفق طريقة الأداء<sup>[1]</sup>. كما تعد مسألة انخفاض التكلفة الحسابية ووقت التحليل من العوامل المهمة للمهندسين الإنشائيين. يتميز التحليل اللاخطي السريع (FNA) بالسرعة مقارنة بالتحليلات اللاخطية الأخرى<sup>[2]</sup>. ويمكن استخدام تحليل FNA للجمل الإنشائية بافتراض أن عدد العناصر اللاخطية المعرّفة مسبقاً محدود، حيث يتم في هذه الطريقة استخدام أشعة ريتز Ritz المتعامدة للكتلة والصلابة للجملة الإنشائية المرنة من أجل تخفيض لاخطية الجملة.

إن طريقة FNA هي طريقة بسيطة تعتمد على المعادلات الديناميكية (توازن، تشوه-قوة، توافق)، ويتم التعبير عن معادلة الحركة للمنشأ في الزمن (t) بواسطة المعادلات المصفوفية التالية:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) + R(t)_{NL} = R(t) \quad (1)$$

حيث تعبر  $K$ ,  $C$ ,  $M$  على التوالي عن مصفوفات الكتلة والتخميد النسبي والصلابة. إن حجم هذه المصفوفات المربعة الثلاث يساوي إلى العدد الكلي لانتقالات النقاط المفقودة ( $Nd$ )، مع الإشارة إلى أن مصفوفة الصلابة المرنة  $K$  لا تأخذ في الاعتبار صلابة العناصر اللاخطية. إن الأشعة التابعة للزمن  $\ddot{u}(t)$ ,  $\dot{u}(t)$ ,  $u(t)$ ,  $R(t)$  هي القوة الخارجية المطبقة والانتقال والسرعة والتسارع اللحظي على التوالي، أما  $R(t)_{NL}$  فيمثل شعاع القوة المُعطى من مجموع القوى في العناصر اللاخطية ويتم حسابه في أي نقطة زمنية بالتراجع المتكرر<sup>[3]</sup>.

إن التحليل الستاتيكي اللاخطي أو ما يسمى بتحليل الدفع الجانبي (Pushover analysis) يستخدم تقنيات

ولإنجاز هذا العمل تم استخدام برنامج Sap2000، حيث أظهرت الدراسة أنه يمكن استخدام تحليل FNA في الحالات التي ينوي فيها المصمم مراقبة السلوك اللاخطي لمنشآت ذات عامل أهمية صغير نسبياً بالإضافة إلى عدد أقل من العناصر اللاخطية، وأن تحليل FNA لديه سرعة تشغيل تصل إلى (7-9) مرات من سرعة تحليل NLTHA، كما بينت الدراسة [2] أن النتائج التي يمكن الحصول عليها باستخدام تحليل FNA من أجل المنشآت بإطارات خرسانة مسلحة فقط يمكن أن تكون مقبولة نظراً لمحدودية العناصر اللاخطية ودرجات الحرية لهذه الجملة، بينما كانت نتائج الإطارات المزودة بمخمدات أقل موثوقية من القيم الحقيقية التي تم الحصول عليها من تحليل NLTHA: تم تأكيد هذه النتيجة من خلال الفحص البصري لمنحنيات الهشاشة المتعلقة بهذه الجملة الإنشائية، كما أعطى تحليل FNA قيمة أعلى للضرر الذي يلحق بالمنشأة من القيم الحقيقية مقارنة مع تحليل NLTHA.

## 2-الهدف من البحث:

إن الهدف الرئيسي من هذه الورقة هو التقييم الزلزالي المبني على الأداء لمبنى سكني إطارى من الخرسانة المسلحة موجود في إيطاليا ومُصمم فقط على الأحمال الشاقولية (الحية والميتة)، حيث سيتم التقييم الزلزالي للمبنى ودراسة السلامة الإنشائية له باستخدام طريقتين للتحليل اللاخطي وهما: طريقة التحليل الستاتيكي اللاخطي Nonlinear Static Analysis (أو الدفع الجانبي Pushover) وهي الطريقة الأكثر استخداماً وشيوعاً بين المهندسين الإنشائيين، وطريقة التحليل الديناميكي اللاخطي السريع Fast Nonlinear Analysis (FNA) المعتمد على الأنماط. تعرف التحليلات الديناميكية بشكل عام بدقتها لاعتمادها على سجلات زمنية لتسارعات أرضية فعلية. ما يعود السبب في اختيار مبنى من خارج سوريا إلى توافر هزات أرضية حقيقية فعلية لهذا المبنى بالإضافة إلى توفر معظم المعطيات والمواصفات المطلوبة لإنجاز الدراسة، وهي مباني سكنية تشبه إلى حد كبير المباني السكنية الموجودة في سوريا من حيث الجمل الإنشائية والأحمال والمواد. تم إخضاع المبنى لثلاث هزات زلزالية متوسطة حدثت في إيطاليا بمقدار متقارب وبأنواع صدوع مختلفة، تميّز اثنان منها بأنها حركات ارتدادية. تم إخضاع المبنى لكل هزة من هذه الهزات الثلاثة على حدة على اعتبار أنها الهزة الأولى التي يتعرض لها المبنى،

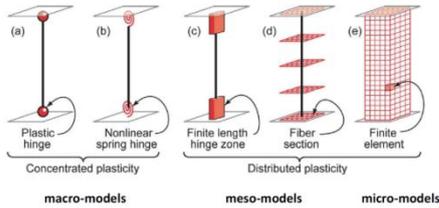
ولإنجاز هذا العمل تم استخدام برنامج Sap2000، حيث أظهرت الدراسة أنه يمكن استخدام تحليل FNA في الحالات التي ينوي فيها المصمم مراقبة السلوك اللاخطي لمنشآت ذات عامل أهمية صغير نسبياً بالإضافة إلى عدد أقل من العناصر اللاخطية، وأن تحليل FNA لديه سرعة تشغيل تصل إلى (7-9) مرات من سرعة تحليل NLTHA، كما بينت الدراسة [2] أن النتائج التي يمكن الحصول عليها باستخدام تحليل FNA من أجل المنشآت بإطارات خرسانة مسلحة فقط يمكن أن تكون مقبولة نظراً لمحدودية العناصر اللاخطية ودرجات الحرية لهذه الجملة، بينما كانت نتائج الإطارات المزودة بمخمدات أقل موثوقية من القيم الحقيقية التي تم الحصول عليها من تحليل NLTHA: تم تأكيد هذه النتيجة من خلال الفحص البصري لمنحنيات الهشاشة المتعلقة بهذه الجملة الإنشائية، كما أعطى تحليل FNA قيمة أعلى للضرر الذي يلحق بالمنشأة من القيم الحقيقية مقارنة مع تحليل NLTHA.

قام كل من Khan and Khalid [5] (2019) بإجراء مقارنة بين تقنيات النمذجة اللامرنة باستخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي وتحليل السجل الزمني اللاخطي وذلك اعتماداً على التحليل الديناميكي المتزايد IDA، حيث تم زيادة شدة الحركات الأرضية المستخدمة تدريجياً حتى الوصول إلى مرحلة انهيار المنشأ. قام الباحثان بنمذجة إطار خرساني مسلح ثنائي البعد 2D مؤلف من 3 طوابق باستخدام طريقتين لتمثيل اللدونة وهما: اللدونة المركزة (باستخدام برنامج SAP2000) واللدونة الموزعة (باستخدام برنامج Seismostruct2014). تبين من هذه الدراسة أن منحنيات IDA تعطي لطريقتي نمذجة اللدونة توافقاً أكبر فيما بينها مقارنة مع منحنيات الدفع الجانبي، مع ملاحظة صلابة أكبر قليلاً للاستجابة الناتجة من نموذج اللدونة المركزة عند استخدام IDA؛ بينما لوحظ صلابة أكبر

#### 4- نوع النموذج المستخدم لنمذجة العناصر

##### الخرسانية المسلحة وتعريف المفاصل اللدنة:

يوضح الشكل (3) أنواعاً مختلفة من نماذج المكونات الإنشائية التي يمكن استخدامها لمحاكاة سلوك (جائز - عمود). على اليسار من الشكل (a, b) توجد نماذج لدونة مركزة من خلال تراكب جميع التأثيرات اللاخطية والتشوهات اللامرنة في نهايات العناصر، إما من خلال مفاصل لدنة صلبة أو نابض غير مرن يتميز بدرجة حرية واحدة (مثلاً: عزم - دوران) أو نابض متعدد المحاور. على اليمين الشكل (e) نموذج تفصيلي للعناصر المحدودة المستمرة، والذي قد يتضمن تمثيلات صريحة ثلاثية الأبعاد لجميع المكونات، وأما (c, d) فتمثل أنواع مختلفة من عناصر ألياف اللدونة الموزعة والتي توفر تمثيلات هجينة بين طرفي العنصر المحدود واللدونة المركزة [8].



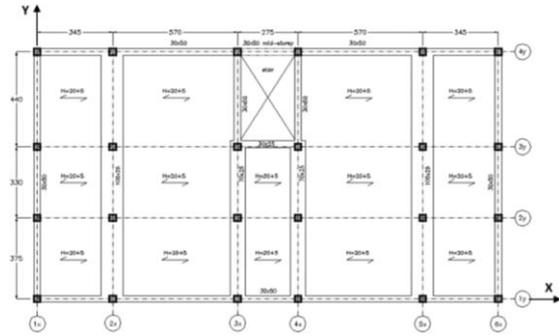
الشكل (3) أنواع نماذج المكونات الإنشائية / نماذج

مثالية لعناصر (جائز - عمود) [9].

تم الاعتماد في هذا البحث على النموذج (a) الموضح في الشكل (3)، وذلك لتركيز اللدونة في عدد محدود من العناصر اللاخطية المعروفة مسبقاً من أجل استخدام تحليل FNA بالإضافة إلى تحليل Pushover، حيث تم تعريف خواص المفاصل اللدنة لعناصر الإطارات كما هو معرف ضمن برنامج ETABS 19 وذلك باعتماد القيم الافتراضية وفقاً لجدول ASCE 41-13 [10]، وتم إسناد مفاصل على العزم (M3) إلى نهايات الجوائز ومفاصل على تراكب القوة المحورية مع العزم (P-M2-M3) إلى نهايات الأعمدة، حيث P: هي القوة المحورية باتجاه المحور

وذلك لمعرفة هل للهزة الارتدادية أثر أكبر على المنشأ من الهزة الأساسية في حال جاءت هذه الهزات كهزة أولى فقط، ولم يتم أخذ تأثير الهزات المتتالية على المنشأ في هذه الدراسة.

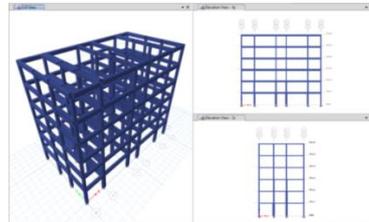
#### 3- توصيف المبنى المدروس والبرنامج المستخدم في النمذجة:



الشكل (1) المسقط الأفقي للمبنى المدروس [6]

يوصف المبنى المدروس بأنه مبنى سكني متوسط الارتفاع من الخرسانة المسلحة مؤلف من ستة طوابق، اعتمده لجملته الإنشائية إطارات (جوائز مع أعمدة) بجوائز ساقطة على الأطراف الخارجية للمبنى، وجوائز مخفية في الاتجاه القصير (Y) داخل المبنى، وأعمدة بدون جوائز في الاتجاه الطويل (X) داخل المبنى، ويبين الشكل (1) المسقط الأفقي للمبنى المدروس.

تم الاعتماد على برنامج ETABS v19.0.0 [7] لنمذجة المبنى المدروس وإنجاز التحليلات المطلوبة. يبين الشكل (2) واجهات ومنظور إنشائي لنموذج المبنى المدروس ضمن برنامج ETABS 19.

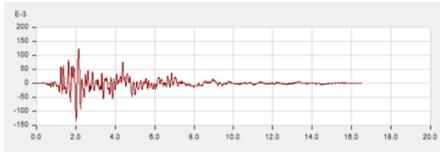


الشكل (2) واجهات ومنظور إنشائي لنموذج المبنى

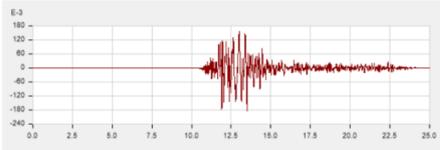
المدروس ضمن برنامج ETABS 19

وردت بيانات الزلازل الثلاث المدروسة في موقع PEER Ground Motion Database - PEER Center [11]. ويبين الجدول (2) البيانات الوصفية لزلازل إيطاليا الثلاثة المستخدمة في تحليلات السجلات الزمنية. يُلاحظ أن هذه الزلازل لها مقدار magnitude متقارب (محصور بين 5.0 و 5.9) والذي يصنف هذه الزلازل بأنها متوسطة حسب مقياس ريختر، بينما يُلاحظ أنواع صدوع مختلفة لتشكل هذه الزلازل وهي على التوالي: عادي ومعكوس ارتدادية وهي الزلازل: Umbria Marche (aftershock 3) و L'Aquila (aftershock 1)، مع التنويه إلى أن الهزات الأولية التي سبقت الحركات الارتدادية المختارة كانت عبارة عن هزات قوية بمقدار يبلغ 6 و 6.3 لكل من زلازل Umbria Marche و L'Aquila على التوالي.

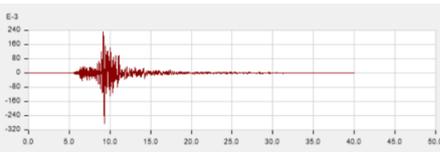
توضح الأشكال الثلاث (5-6-7) تباعاً السجلات الزمنية للمركبات الأفقية للزلازل المستخدمة في الدراسة.



الشكل (5) المركبة الأفقية H2 لزلازل Friuli.

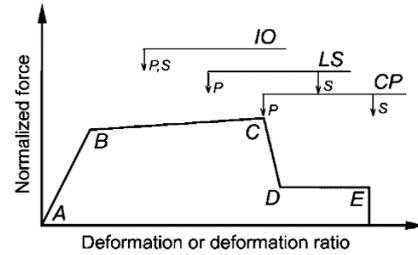


الشكل (6) المركبة الأفقية H2 لزلازل Umbria Marche (aftershock 3).



الشكل (7) المركبة الأفقية H1 لزلازل L'Aquila (aftershock 1).

المحلي 1 الموازي لطول العنصر، M2-M3: العزوم حول المحاور المحلية للمقطع العرضي للعنصر المدروس وهي المحور الرئيسي 3 والثانوي 2 على التوالي. ويبين الشكل (4) سلوك المفصل اللدن ومعايير القبول وفقاً للكوود ASCE 41-13.



الشكل (4) سلوك المفصل اللدن ومعايير القبول وفقاً لـ ASCE 41-13 [10].

## 5- السجلات الزلزالية المستخدمة في

### تحليلات السجلات الزمنية:

تم اختيار ثلاث مركبات أفقية لثلاثة زلازل متوسطة حدثت في إيطاليا وتطبيقها في كل من الاتجاهين X و Y للمبنى المدروس، حيث تم الحفاظ على نفس المركبة الأفقية للزلازل (ذات التسارع الأكبر) في الاتجاهين وذلك لمعرفة الاتجاه الأضعف للمبنى. إن المركبات الأفقية للزلازل المستخدمة في الدراسة موضحة ضمن جدول البيانات رقم (1) كالتالي:

الجدول (1) المركبات الأفقية للزلازل المستخدمة في الدراسة.

| المركبة الأفقية المستخدمة                | الزلازل                                    |
|--|--|
| H2/ Horizontal-2 Component/ B-SRO270.AT2 | <b>Friuli, Italy-02</b>                    |
| H2 /Horizontal-2 Component/ C-CLC270.AT2 | <b>Umbria Marche (aftershock 3), Italy</b> |
| H1 /Horizontal-1 Component/ EF068XTE.AT2 | <b>L'Aquila (aftershock 1), Italy</b>      |

الجدول (2) البيانات الوصفية Metadata لزلزال إيطاليا الثلاثة المستخدمة في تحليل السجلات الزمنية [11].

| Event                               | Year | Station               | Mag  | Mechanism      | Rjb (km) | Rrup (km) | Vs30 (m/s) | Lowest useable freq (Hz) |
|-------------------------------------|------|-----------------------|------|----------------|----------|-----------|------------|--------------------------|
| Friuli, Italy-02                    | 1976 | San Rocco             | 5.91 | Reverse        | 14.37    | 14.5      | 649.67     | 0.2875                   |
| Umbria Marche (aftershock 3), Italy | 1997 | Colfiorito-Casermette | 5.3  | Normal         | 2.58     | 4.71      | 405        | 0.125                    |
| L'Aquila (aftershock 1), Italy      | 2009 | GRAN SASSO (Assergi)  | 5.6  | Normal Oblique | 13.01    | 16.4      | 488        | 0.125                    |

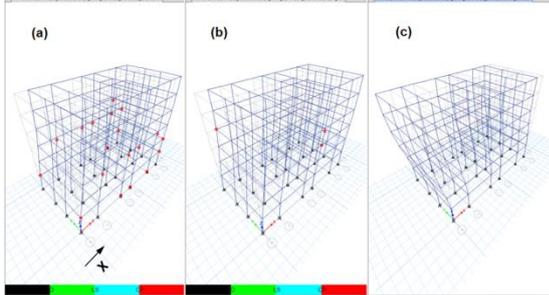
## 6- تقييم أداء المبنى:

### 6-1- تقييم أداء المبنى باستخدام التحليل

#### الديناميكي اللاخطي السريع FNA:

#### • تشكل المفاصل اللدنة في المبنى:

يبين الشكل (8) تشكل المفاصل اللدنة في المبنى نتيجة استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي FNA حيث تم تطبيق الزلازل في الاتجاه X وفق التالي: (a) زلزال Friuli، (b) زلزال Umbria Marche (aftershock 3)، (c) زلزال L'Aquila (aftershock 1). يُلاحظ حصول ضرر في المبنى نتيجة تجاوز عدد من الأعمدة لمستوى منع الانهيار Collapse Prevention (CP) في الطوابق الأربعة السفلية للإطارين بجوائز ساقطة في طرفي المبنى على المحورين 1y و 4y من أجل زلزال Friuli كما هو موضح في الشكل (8a)، بينما يُلاحظ وصول ثلاثة مفاصل لدنة إلى مرحلة الانهيار Collapse (CO) في عمودين أحدهما بالطابق الرابع على المحور 1y والآخر في الطابق الخامس على المحور 4y من أجل الزلزال الارتدادي Umbria Marche (aftershock 3) كما هو موضح في الشكل (8b)، بينما بقيت المفاصل اللدنة للمبنى ضمن المجال الخطي المرن من أجل الزلزال الارتدادي L'Aquila (aftershock 1) كما هو موضح في الشكل (8c).



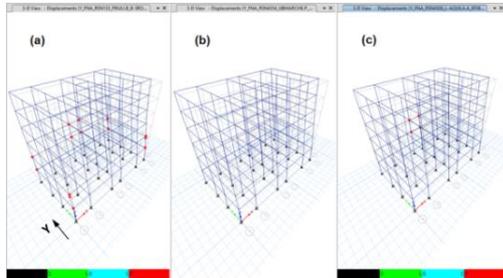
الشكل (8) تشكل المفاصل اللدنة في المبنى نتيجة

استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي FNA بالاتجاه X

للمبنى تحت تأثير: (a) زلزال Friuli، (b) زلزال Umbria

Marche (aftershock 3)، (c) زلزال L'Aquila

(aftershock 1).



الشكل (9) تشكل المفاصل اللدنة في المبنى نتيجة

استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي FNA بالاتجاه Y

للمبنى تحت تأثير: (a) زلزال Friuli، (b) زلزال Umbria

Marche (aftershock 3)، (c) زلزال L'Aquila

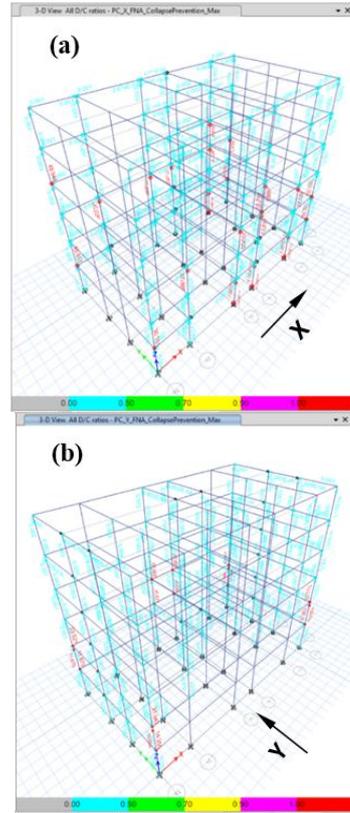
(aftershock 1).

أسفل الطابق الثالث والرابع، بينما بقي المبنى مرناً من أجل الزلزال الارتدادي Umbria Marche (aftershock 3) كما هو موضح في الشكل (9b)، في حين دخل المبنى إلى مابعد مستوى منع الانهيار عند عمودين عند درج المبنى على المحورين  $3x$  و  $4x$  حيث الإطارات بجوائز مخفية بالاتجاه Y وذلك في أسفل الطابق الثالث والرابع من أجل الزلزال الارتدادي L'Aquila (aftershock 1) كما هو موضح في الشكل (9c).

وهذا يشير إلى أن استجابة الزلزال الأساسي Friuli غير الارتدادي كانت أخطر للمنشأ من الزلزالين الارتدائيين بالاتجاهين X و Y لحالة المبنى مقارنة بالزلزالين الآخرين. يبين الشكل (10) نتائج تحقيق الأداء للمبنى من خلال (D/C Ratios : نسب مطلب/قدرة) لحالة المطلب الأعظمي Maximum Demand للزلزال الثلاثة باستخدام التحليل الديناميكي اللاخطي السريع FNA، حيث يُلاحظ أن عدد العناصر التي وصلت إلى الانهيار بالاتجاه X (الشكل 10a) كان أكثر منها بالاتجاه Y (الشكل 10b) وذلك عند أخذ الاستجابة العظمى للزلزال الثلاثة، مما يؤكد أن الاتجاه X هو الاتجاه الأضعف للمبنى وهو الذي يحوي أعمدة بدون جوائز داخل المبنى.

#### مكونات الطاقة التراكمية في المبنى:

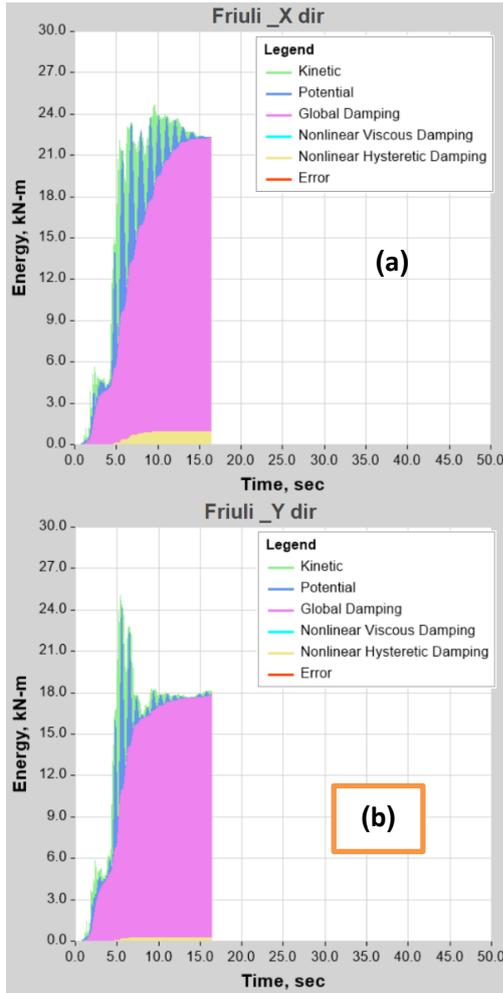
تبين الأشكال (11-12-13) مكونات الطاقة التراكمية في المبنى المدروس نتيجة استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي السريع FNA بالاتجاه: (a) X، (b) Y للمبنى تحت تأثير كل من زلزال Friuli، و زلزال Umbria (aftershock3) Marche، و زلزال L'Aquila (aftershock 1) على التوالي، ويُلاحظ حسابياً من هذه الأشكال وجود أربعة أنواع من الطاقة التراكمية المتشكلة عند استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي السريع وهي: الطاقة الحركية Kinetic والطاقة الكامنة Potential



الشكل (10) نتائج تحقيق الأداء للمبنى من خلال نسبة المطلب على القدرة D/C لحالة المطلب الأعظمي للزلزال الثلاثة: (a) بالاتجاه X للمبنى، (b) بالاتجاه Y للمبنى.

يبين الشكل (9) تشكل المفاصل اللدنة في المبنى نتيجة استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي FNA حيث تم تطبيق الزلازل في الاتجاه Y وفق التالي: (a) زلزال Friuli، (b) زلزال Umbria Marche (aftershock 3)، (c) زلزال L'Aquila (aftershock 1). يُلاحظ أنه من أجل زلزال Friuli كما هو موضح في الشكل (9a) حصل ضرر في المبنى نتيجة تجاوز عدد من الأعمدة لمستوى منع الانهيار (CP) في الطابق الثاني والثالث للإطارين الطرفيين بجوائز ساقطة على المحورين  $1x$  و  $6x$ ، بالإضافة إلى عمودين عند درج المبنى على المحورين  $3x$  و  $4x$  حيث الإطارات بجوائز مخفية بالاتجاه Y وذلك في

العام المتعلق بالأنماط GD عندها نسبة 48.30%، بينما كان للتخميد الهستيرتي اللاخطي NHD المتعلق بنوع المادة وشكل تشوه الجملة النسب الدنيا لأغلب الحالات حيث وصلت أعلى نسبة له إلى 3.60% فقط وذلك عند تطبيق زلزال Friuli بالاتجاه X.

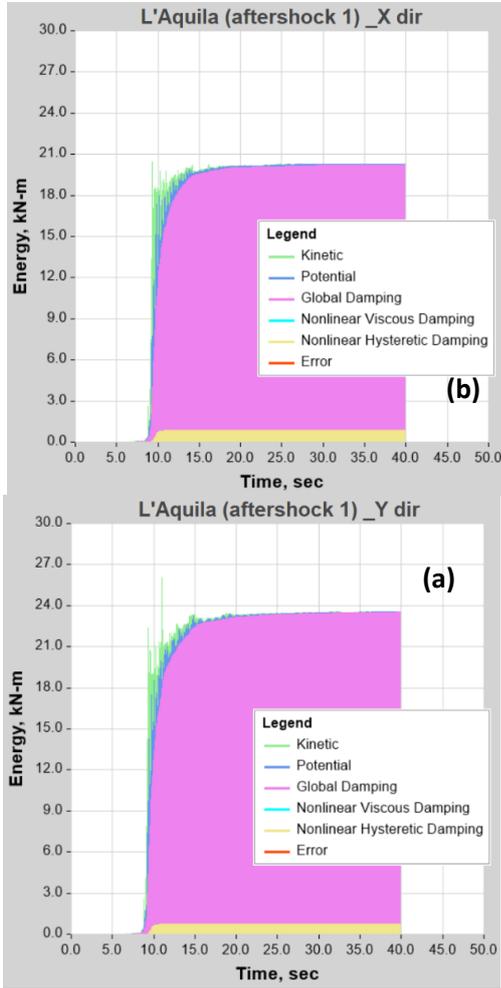


الشكل (11) مكونات الطاقة التراكمية نتيجة استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي السريع FNA تحت تأثير زلزال Friuli بالاتجاه: (a) X، (b) Y للمبنى.

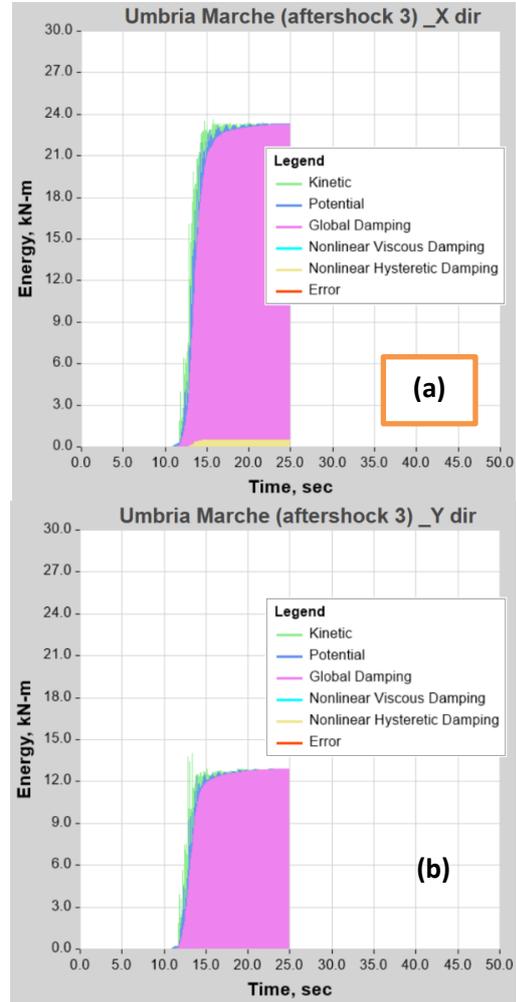
(a)

والتخميد العام المتعلق بالأنماط Global Damping والتخميد الهستيرتي اللاخطي Nonlinear Hysteretic Damping والذي يمثل التخميد الإنشائي المتعلق بنوع المادة وشكل تشوه الجملة.

وبين الجدول (3) الزمن الذي حدثت عنده أعظم قيمة لمجموع الطاقة التراكمية في المبنى لكل زلزال مطبق بالإضافة إلى قيم هذه الطاقات ونسبها. يُلاحظ من الجدول (3) والأشكال (11-12-13) انخفاض قيم مجموع الطاقة العظمى بنسب (1.64 – 36.64%) عند تطبيق الزلزال الارتدادي (3) Umbria Marche (aftershock 3) عن قيمها عند تطبيق الزلزال الأساسي Friuli بالاتجاه X، Y على التوالي، بينما يُلاحظ ازدياد قيم مجموع الطاقة العظمى بنسب (16.07 – 14.85%) عند تطبيق الزلزال الارتدادي (1) L'Aquila (aftershock 1) عن قيمها عند تطبيق الزلزال الأساسي Friuli بالاتجاه X، Y على التوالي، كما يُلاحظ أن التخميد العام GD أخذ أكبر نسب بين أنواع الطاقة التراكمية عند استخدام تحليل FNA من أجل زلزالي Friuli و Umbria Marche (aftershock 3) حيث وصل للنسب (72.40 - 80.30%) وبقيم مقابلة لطاقة التخميد GD بحدود (17.889 – 19.513) kN.m على التوالي من أجل الزلزالين المذكورين، بينما كان للطاقة الحركية K أكبر النسب من أجل زلزال L'Aquila (aftershock 1) حيث وصلت نسبته إلى 82.50% وبقيمة 28.687 kN.m للطاقة إذ لم تدخل مفاصل المنشأ ضمن اللدونة بشكل معتبر وإنما بقي معظمها ضمن المرحلة الخطية المرنة في المجال (AB) كما هو موضح في الشكل (4) الذي يبين سلوك المفصل اللدن، وهو ما تمت ملاحظته أيضاً عند تطبيق زلزال Umbria Marche (aftershock 3) بالاتجاه Y حيث كانت نسبة الطاقة الحركية K كبيرة نوعاً ما إذ وصلت إلى 45.70% من الطاقة الكلية، وكان للتخميد



الشكل (13) مكونات الطاقة التراكمية نتيجة استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي السريع FNA تحت تأثير زلزال L'Aquila (aftershock 1) بالاتجاه: (a) X، (b) Y للمبنى.

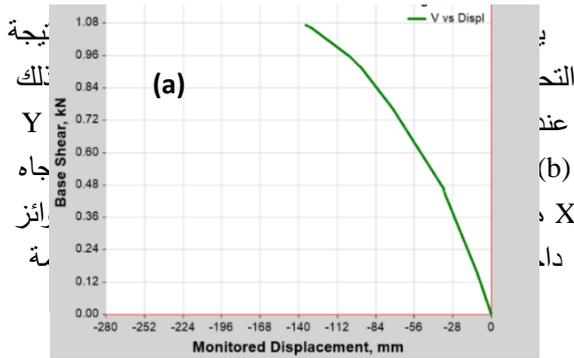


الشكل (12) مكونات الطاقة التراكمية نتيجة استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي السريع FNA تحت تأثير زلزال Umbria Marche (aftershock 3) بالاتجاه: (a) X، (b) Y للمبنى.

الجدول (3) قيم الطاقة التراكمية في المبنى ونسبها لكل زلزال مطبق.

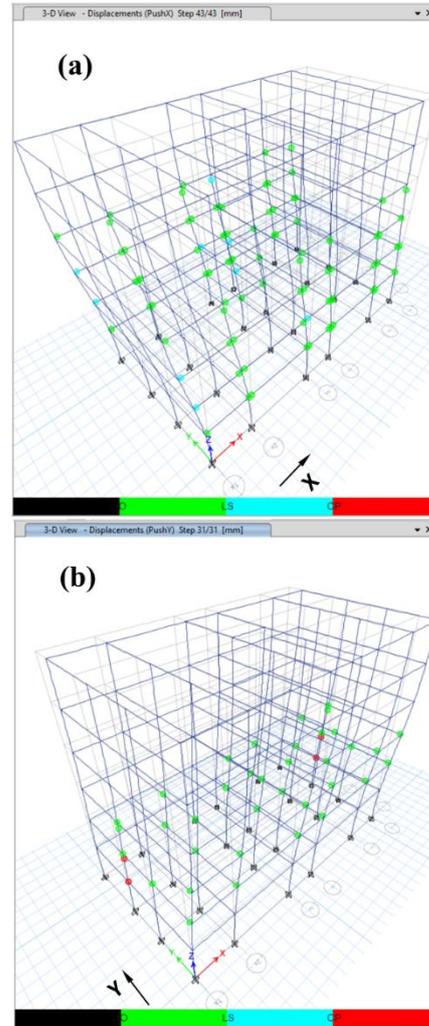
| الزلزال                            | الاتجاه المطبق | الزمن<br>sec | مجموع<br>الطاقة<br>العظمى<br>التراكمية<br>kN.m | الطاقة الحركية K |       | الطاقة الكامنة P |       | التخميد العام GD |       | التخميد<br>الهستيري<br>اللاخطي<br>NHD |      |
|------------------------------------|----------------|--------------|--|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|---------------------------------------|------|
|                                    |                |              |  | kN.m             | (%)   | kN.m             | (%)   | kN.m             | (%)   | kN.m                                  | (%)  |
| Friuli                             | X dir          | 9.665        | 24.714   | 5.795            | 23.40 | 0.127            | 0.50  | 17.889           | 72.40 | 0.888                                 | 3.60 |
|                                    | Y dir          | 5.425        | 25.036   | 6.693            | 26.80 | 7.779            | 31.10 | 10.457           | 41.80 | 0.098                                 | 0.40 |
| Umbria<br>Marche<br>(aftershock 3) | X dir          | 14.715       | 24.308   | 3.810            | 15.70 | 0.492            | 2.00  | 19.513           | 80.30 | 0.487                                 | 2.00 |
|                                    | Y dir          | 13.450       | 15.862   | 7.249            | 45.70 | 0.943            | 5.90  | 7.658            | 48.30 | 0.011                                 | 0.10 |
| L'Aquila<br>(aftershock 1)         | X dir          | 9.220        | 28.687   | 23.660           | 82.50 | 2.972            | 10.40 | 2.037            | 7.10  | 0.016                                 | 0.10 |
|                                    | Y dir          | 9.220        | 28.755   | 22.985           | 80.00 | 3.498            | 12.20 | 2.264            | 7.90  | 0.004                                 | 0.00 |

هذه الأشكال أن الدفع الجانبي للمبنى قد أدى إلى تشكل عدد أكبر من المفاصل اللدنة بالاتجاه X منه بالاتجاه Y حيث انتشرت المفاصل اللدنة ضمن الطوابق الأربعة السفلية في الاتجاه X بينما اقتصر انتشار المفاصل اللدنة في الاتجاه Y ضمن الطابقين الثاني والثالث فقط بالإضافة إلى تشكل مفصلين لدنيين بمستوى الإشغال الفوري (IO) Immediate Occupancy في أسفل عمودين في الطابق الرابع على المحاور 1x و 6x عند التقائها مع المحور 3y. إن مستوى أداء المبنى بقي ضمن مستوى أمان الحياة (LS) Life Safety من أجل الدفع الجانبي بالاتجاه X، أما من أجل الدفع بالاتجاه Y فقد تجاوز المبنى مستوى منع الانهيار Collapse Prevention الثاني على المحاور 1x و 6x عند التقائها مع المحور 3y وذلك بعد عدد خطوات أكبر من الدفع الجانبي مقارنة مع الاتجاه X، في حين بقيت كافة العناصر الأخرى للمبنى التي تشكلت فيها مفاصل لدنة ضمن مستوى الإشغال الفوري (IO).



الشكل (15) منحنى الدفع الجانبي للمبنى: (a) بالاتجاه X للمبنى، (b) بالاتجاه Y للمبنى.

للقص القاعدي مساوية إلى 630.196 kN من أجل صلابة منخفضة مقارنة مع المنحنى بالاتجاه Y الذي تصرف من خلاله المبنى بشكل شبه مرن حيث لم يُلاحظ



الشكل (14) تشكل المفاصل اللدنة في المبنى نتيجة استخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي: (a) بالاتجاه X للمبنى، (b) بالاتجاه Y للمبنى 2-6- تقييم أداء المبنى باستخدام التحليل الستاتيكي

#### اللاخطي Pushover Analysis:

#### • تشكل المفاصل اللدنة في المبنى:

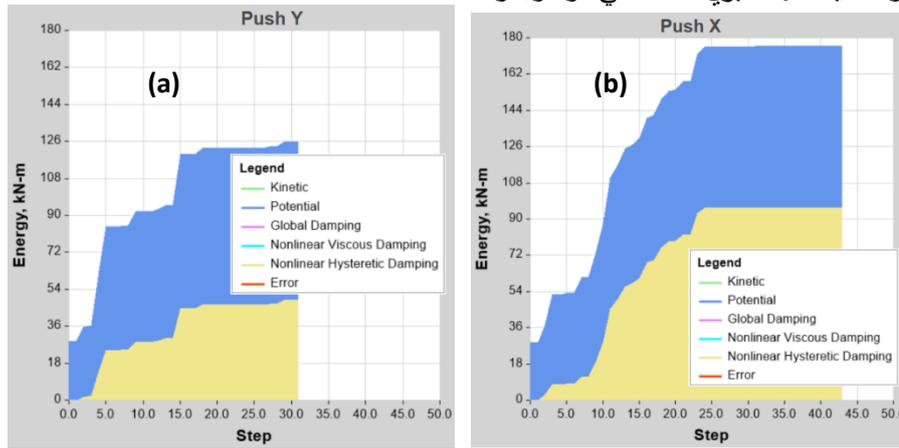
يبين الشكل (14) ميكانيزمات تشكل المفاصل اللدنة في المبنى نتيجة استخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي وذلك عند الدفع الجانبي للمبنى بالاتجاه X في الشكل (14-a) ثم بالاتجاه Y في الشكل (14-b)، ويتضح من

للمطاقة الحركية هنا كون التحليل ستاتيكي، كما أنه لا وجود للتخميد العام المتعلق بالأنماط. ويبين الجدول (4) قيم الطاقة التراكمية في المبنى ونسبها من أجل تحليل الدفع الجانبي. يُلاحظ من الجدول (4) والشكل (16) ازدياد قيمة مجموع الطاقة العظمى بنسبة %39.67 عند تطبيق الدفع الجانبي بالاتجاه X عن قيمته عند تطبيق الدفع الجانبي بالاتجاه Y. كما يُلاحظ أن التخميد الهستيرتي اللاخطي NHD أخذ أكبر نسبة من أجل الدفع الجانبي بالاتجاه X للمبنى بقيمة 54.50% بقيمة 95.718 kN.m لطاقة التخميد NHD، بينما أخذت الطاقة الكامنة K أكبر نسبة %61.40 من أجل الدفع الجانبي بالاتجاه Y للمبنى بقيمة مساوية إلى 77.223 kN.m .

تدهور مهم في الصلابة بعد الصلابة المرنة الابتدائية، ووصلت قيمة القص القاعدي عند الدفع بالاتجاه Y (حيث يحوي المبنى داخله على إطارات بجوائز مخفية) إلى القيمة 1073.937 kN (عند وصول العمودين في الطابق الثاني إلى الانهيار) وهي تزيد بمقدار %70.41 عن القيمة العظمى لمنحنى الدفع الجانبي بالاتجاه X.

#### مكونات الطاقة التراكمية في المبنى:

يبين الشكل (16) مكونات الطاقة التراكمية نتيجة استخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي Pushover Analysis: (a) بالاتجاه X للمبنى، (b) بالاتجاه Y للمبنى، يُلاحظ من الشكل وجود نوعين من الطاقة المتشكلة عند استخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي وهما الطاقة الكامنة والتخميد الهستيرتي اللاخطي، ولا وجود



الشكل (16) مكونات الطاقة التراكمية نتيجة استخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي: (a) بالاتجاه X للمبنى، (b) بالاتجاه Y للمبنى الجدول (4) قيم الطاقة التراكمية في المبنى ونسبها من أجل التحليل الستاتيكي اللاخطي.

| تحليل الدفع الجانبي<br>Pushover | الاتجاه<br>المطبق | الخطوة | مجموع<br>الطاقة<br>العظمى<br>التراكمية | الطاقة الكامنة P |       | التخميد الهستيرتي اللاخطي NHD |       |
|---------------------------------|-------------------|--------|--|------------------|-------|-------------------------------|-------|
|                                 |                   |        | kN.m                                   | kN.m             | (%)   | kN.m                          | (%)   |
|                                 | X dir             | 43     | 175.738                                | 80.011           | 45.50 | 95.718                        | 54.50 |
|                                 | Y dir             | 31     | 125.827                                | 77.223           | 61.40 | 48.604                        | 38.60 |

النمطي السريع، حيث تم تعريض المبنى لتأثير ثلاثة زلازل متوسطة بمقدار متقارب وبأنواع صدوع مختلفة، اثنان من هذه الزلازل عبارة عن حركات ارتدادية. يمكن تلخيص نتائج هذه الدراسة كالتالي:

#### 7- النتائج:

تم في هذا البحث إجراء تقييم زلزالي مبني على الأداء لمبنى سكني إيطالي من الخرسانة المسلحة مُصمم على القوى الشاقولية فقط، وذلك باستخدام كل من طريقتي التحليل الستاتيكي اللاخطي والتحليل الديناميكي اللاخطي

- 1- أعطى التحليل الديناميكي اللاخطي السريع FNA تقييماً أخطر من التحليل الستاتيكي اللاخطي، حيث تجاوز المبنى من أجل الاستجابة العظمى للزلازل الثلاثة مستوى منع الانهيار (CP) نتيجة وصول عدد من عناصره إلى الانهيار عند استخدام تحليل FNA، بينما لم يتجاوز المبنى مستوى أمان الحياة (LS) عند استخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي إلا عند الاستمرار بالدفع الجانبي بالاتجاه Y حيث وصل عمودين فيه بالطابق الثاني إلى الانهيار.
- 2- كان للزلازل المدروسة تأثيرات مختلفة على المنشأ، حيث أعطى الزلزال الأساسي غير الارتدادي استجابة أخطر للمنشأ من الزلازل الارتداديين بالاتجاهين X و Y وذلك لحالة المبنى المختار والزلزال المختارة، وهذا يؤكد ضرورة اختيار الزلازل بشكل منهجي يعتمد على جيولوجية المنطقة والصدوع المتشكلة وغير ذلك من الشروط حسب ماتنص عليه الكودات والأبحاث.
- 3- أثبت كل من تحليل FNA وتحليل الدفع الجانبي Pushover بأن الاتجاه X هو الاتجاه الأضعف للمبنى وهو الذي يحوي أعمدة بدون جوائز داخل المبنى، مقارنة مع الاتجاه Y الذي يحوي إطارات داخلية بجوائز مخفية، ماعدا وصول عمودين إلى الانهيار وذلك عند الاستمرار بالدفع الجانبي بالاتجاه Y دون تدهور مهم في الصلابة حيث تصرف المبنى بشكل شبه مرن وزادت قيمة القص القاعدي لمنحني الدفع الجانبي بالاتجاه Y بمقدار 70.41% عن القيمة العظمى له من أجل الاتجاه X، كما أن عدد العناصر التي وصلت إلى الانهيار بالاتجاه X كان أكثر منها بالاتجاه Y وذلك عند استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي السريع وأخذ الاستجابة العظمى للزلازل الثلاثة.
- 4- اختلف أنواع الطاقة المتشكلة والمبددة في المنشأ باختلاف نوع التحليل المستخدم، حيث لوحظ وجود أربعة أنواع من الطاقة التراكمية المتشكلة عند استخدام التحليل الديناميكي اللاخطي السريع وهي: الطاقة الحركية والطاقة الكامنة والتخميد العام والتخميد الهستيرتي اللاخطي، بينما لوحظ وجود نوعين فقط من الطاقة المتشكلة عند استخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي وهما الطاقة الكامنة والتخميد الهستيرتي اللاخطي، ولا وجود للتخميد العام المتعلق بالأنماط ولا للطاقة الحركية كون التحليل ستاتيكي ويتعلق فقط بالنمط الأول.
- 5- اختلف قيم ونسب الطاقات المتشكلة في المنشأ باختلاف نوع التحليل المستخدم، حيث زادت قيمة الطاقة العظمى التراكمية في المبنى عند تطبيق الدفع الجانبي بالاتجاه X بما يقارب 6 أضعاف قيمتها عند تطبيق الزلزال الارتدادي (1 aftershock) L'Aquila في الاتجاه X للمبنى باستخدام تحليل FNA، بينما كانت الزيادة بما يقارب 4 أضعاف من أجل الاتجاه Y، ويعود السبب في ذلك إلى انتشار اللدونة في المبنى بشكل أكبر عند استخدام التحليل الستاتيكي اللاخطي من خلال انتشار المفاصل اللدنة ضمن معظم عناصر المبنى وضمن مستويات أداء مقبولة (عدم تجاوز أمان الحياة)، بينما لم تنتشر اللدونة بشكل كافٍ ضمن المبنى عند استخدام تحليل FNA الديناميكي، حيث وصل عدد من عناصر المبنى إلى الانهيار قبل تطور المفاصل اللدنة في باقي العناصر لعدد من الزلازل المدروسة، وبقاء سلوك معظم المفاصل المسندة إلى العناصر ضمن المجال الخطي المرن عند تطبيق الزلازل الأخرى وذلك تبعاً لمواصفات الزلزال المطبق.

## 8- التوصيات:

- 6- الاعتماد على التحليل الديناميكي اللاخطي عند إجراء التقييم الزلزالي وفق طريقة الأداء للمباني القائمة، وعدم الاكتفاء باستخدام طريقة التحليل الستاتيكي اللاخطي وذلك لأن نتائجه لم تكن لصالح الأمان.
- 7- المقارنة بين نتائج التحليل اللاخطي السريع FNA وتحليل السجل الزمني اللاخطي NLTHA باعتماد التكامل المباشر.
- 8- دراسة سلوك المباني وسلامتها الإنشائية عند تعرضها لهزات أرضية متتالية.
- 9- المقارنة بين نتائج التحليل الديناميكي اللاخطي عند إخضاع المنشأ لتراكب المركبات الأفقية للزلازل في الاتجاهين X و Y.

## References

## المراجع

1. Boonyapinyo, V., Choopool, N. and Warnitchai, P., 'Seismic Performance Evaluation of Reinforced-Concrete Buildings by Static Pushover and Nonlinear Dynamic Analyses', The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 12-17 October, (2008).
2. Rostam Alilou, A. A. and Pouraminian, M., 'Seismic Fragility Assessment of RC Frame Equipped by Visco-Elastic Dampers Using NLTHA and FNA', American Journal of Engineering and Applied Sciences, 12 (3): pp. 359-367, (2019).
3. Wilson, Ed. L., 'Chapter 18. Fast Nonlinear Analysis', Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, Computers and Structures, Inc. University of California at Berkeley, pp. 18-(1-16), (2000).
4. FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., (2000).
5. Khan, S. and Khalid, F. 'Comparison of Inelastic Modeling Techniques using Static Pushover Analysis and Non-Linear Time History Analysis', First South Asia Conference on Earthquake Engineering (SACEE'19), Karachi, Pakistan, 21-22 February, (2019).
6. Ricci, P., Manfredi V., Noto F., Terrenzi, M., De Risi, M.T., Di Domenico, M., Camata, G., Franchin P., Masi, A., Mollaioli, F., Spacone, E., and Verderame, G.M. 'RINTC-E: Towards Seismic Risk Assessment of Existing Residential Reinforced Concrete Buildings in Italy', COMPDYN, 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Crete, Greece, 24-26 June, (2019).
7. ETABS v19.0.0, Computers and Structures, Inc. (2020).
8. NIST, 2013, Nonlinear Analysis Research and Development Program for Performance-Based Seismic Engineering, GCR 14-917-27, prepared by the NEHRP Consultants Joint Venture, a partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, for the National Institute of

- Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, (2013).
9. NIST, 2010d, Nonlinear Structural Analysis for Seismic Design, A Guide for Practicing Engineers, GCR 10-917-5, prepared by the NEHRP Consultants Joint Venture, a partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, (2010).
  10. ASCE 41, Seismic Rehabilitation of Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, (2013).
  11. [PEER Ground Motion Database - PEER Center \(berkeley.edu\)](http://www.peercenter.org)

|                    |           |                  |
|--------------------|-----------|------------------|
| Received           | 2021/5/9  | إيداع البحث      |
| Accepted for Publ. | 2021/5/18 | قبول البحث للنشر |