مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (21) العدد (8) 1999
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (21) No (8) 1999

الكشف الديناميكي عن تردّ الأبنية الخاضعة للزلازل
(الأبنية القابلة للتمثيل بدرجة حرية واحدة)

الدكتور محمود سعيد*

(ورد إلى المجلة في 1998/5/19، قبل للنشر في 1999/1/9)

□ الملخّص □

يعرض هذا البحث طريقة بسيطة للكشف الديناميكي الأولي عن تردّ الأبنية القابلة للتمثيل ديناميكياً بدرجة حرية واحدة، والمعرضة لتأثير الزلازل. تستند هذه الطريقة إلى استقراء تسجيلات تحريض واستجابات المبنى أثناء الهزات الطبيعية أو الاصطناعية. فتقوم بالكشف عن السلوك غير المراوح في هذه التسجيلات، وبذلك تكشف التغيرات التي تطرأ على العوامل المميزة لهذه الأبنية، مثل التواتر الطبيعي الأول الذي يتناسب مع الجذر التربيعي لصلابة المبنى على الانعطاف الأفقي الجانبي، والتخامد اللزج المكافئ للمبنى. وقد تم اختبار هذه الطريقة على تسجيلات حقيقية لهزات أرضية. فأثبتت النتائج التي حصلنا عليها فعالية هذه الطريقة في حالة الأبنية المنتظمة.

* أستاذ مساعد في قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (21) العدد (8) 1999
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (21) No (8) 1999

Dynamic Identification of Degradation in Building Subjected to Earthquakes (Buildings Represented by One Degree of Freedom)

Dr. Mahmoud SAID*

(Received 19/5/1998, Accepted 9/1/1999)

❐ ABSTRACT ❐

This Paper presents a simple method for identifying the degradation in building represented by one degree of freedom and subjected to earthquake effects. This method is based on records of building excitation and responses during natural or artificial earthquakes. It can identify non-stationary behavior in these records, and then detect the variation of the building characteristics, such as the first natural frequency related to the building the lateral bending stiffness, and the equivalent viscose damping. This method was tested by real earthquake records and has been proved efficient in the case of regular buildings.

* Associate Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia – SYRIA.

1- مقدمة:

تتبدى الأضرار التي يحدثها تكرار تحميل الإنشاءات أثناء خدمتها، بتناقص في مميزات مقاومتها، كالصلابة أو التخميد (القدرة على تبديد الطاقة). ويمكن لهذه الأضرار، إذا لم تكشف في الوقت المناسب ولم تتم معالجتها، أن تتراكم إلى درجة الانهيار الكارثي لهذه الإنشاءات. لذا بدأ الأدب العلمي المختص منذ مطلع السبعينيات، يسمي ظاهرة التناقص هذه بالتردو *degradation* ، وراح الباحثون يهتمون بتطوير تقنيات دراسة تردو الإنشاءات، وكشف التغيرات الزمنية لمميزات الصلابة والتخميد فيها.

فأجريت في فرنسا تجارب مخبرية متعددة على عناصر إنشائية من البيتون المسلح، تعرضت لتحميل دوري [1]، كما أجريت تجارب تحميل متناوب على وصلات المنشآت البيتونية [2]. وقد بينت جميع هذه التجارب ظاهرة التردو الإنشائي اللاعكوس، والذي يمكن أن يقاس مباشرة بواسطة مراقبة ميل محور حلقات البطاء *hysteresis loops* المتناقص مع الزمن.

كما تم إيضاح الظاهرة نفسها، عندما جرت في الولايات المتحدة الأمريكية مراقبة مجموعة من الأبنية خضعت لتأثير العديد من الزلازل، وعلى فترات متباعدة من الزمن. فمثلاً بينت الدراسة [3]، لمبنى "The Milikan Library" في كاليفورنيا، أن تواتر اهتزازته الذاتية الأول، المقاس قبل وبعد زلزال"San Fernando,1971"، قد انخفض من 1.5Hz إلى 1Hz. وهذا ما يقابل خسارة 56% من صلابته المتناسبة مع مربع هذا التواتر. أما الدراسة [4]، فقد دلت على انخفاض التواتر الذاتي الأول لمبنى " Telephon Building " من 3.6Hz إلى 2.7Hz، وذلك قبل زلزال " Morgan Hill,1984 " وبعد زلزال " Loma Prieta,1989 " .

تشكل الدراسة الأخيرة حلقة في سلسلة من الأبحاث:[7,6,5]. أجريت في المخبر المركزي للجسور والطرق في باريس. عُنيت هذه الدراسة بتحليل تسجيلات اهتزاز مجموعة من المباني الأمريكية، منها المبنيان المذكوران، أثناء كافة الزلازل التي حدثت منذ مطلع السبعينيات والتي جمعت من قبل ما يُعرف ببرنامج التجهيزات الكاليفورني لقياس الحركات القوية "California Strong Motion Instrumentation program" ووزعت بغية مشاركة دولية في هذه الأبحاث الهامة على الكثير من مراكز البحث العالمية، ومنها المخبر الفرنسي المذكور الذي بينت أعمال باحثيه المشار إليها، أن سلوك مباني البيتون المسلح الخاضعة للزلازل القوية، هو سلوك لاخطي متغيّر مع الزمن يرافقه تناقص في صلابات هذه الإنشاءات. لقد استخدمت هذه

الأعمال تقنية رياضية يمكن تسميتها *الكشف (أو التعرف والتحديد) المنوالي* *Modal Identification* ، لدراسة اهتزازات المبنى على مجالات زمنية متنقلة. إن هذه التقنية تقوم على فكرة *استصغار* *Minimization* الفرق بين استجابات المبنى الحقيقية المسجلة أثناء الزلزال، واستجابات نموذجه *المستطرَد* *Linearized* على مجالات زمنية محددة من مدة الزلزال، علماً أن الاستجابات الحقيقية، وتلك الناتجة عن النموذج الرياضي والممتدة على كامل مدة الزلزال، تظهر سلوكاً غير طردي (غير خطي).

إن تطبيق هذه التقنية الرياضية بهدف تحديد قيم مميزات الصلابة والتخميد للمبنى، ودراسة تغييرات هذه المميزات مع الزمن أثناء الزلزال، يتطلب تقديراً تقريبياً مسبقاً لهذه المميزات[8]. كما أن الخطأ الناتج عن عملية الاستصغار المذكورة، يتبع بصورة غامضة كيفية تقسيم مدة الزلزال إلى مجالات زمنية جزئية.

ولتلافي هاتين الصعوبتين قمنا باقتراح وتطبيق طريقة مبسطة لإجراء عملية التعرف والتحديد لمميزتي المنشأ الرئيستين، وهما تواتره الطبيعي الأول، وعامل تخامده اللزج المكافئ، ولدراسة تغيير هذين العاملين مع الزمن أثناء مدة الزلزال. كما أن لهذه الطريقة المبسطة أهمية خاصة في البلدان النامية، حيث يمكن مراقبة الأبنية، باستعمال جهازين اثنين فقط من أجهزة تسجيل الاهتزازات الطبيعية أو الاصطناعية، يوضع أحدهما في أعلى المبنى، ويوضع الثاني بالقرب من أساساته.

2- الكشف (أو التعرف والتحديد) بطريقة الاستطراد المكافئ:

أثبتت عدة أبحاث ومنها [5]، أن سلوك الأبنية متوسطة الارتفاع والمنتظمة هندسياً، وخصوصاً عند مستوى سطحها العلوي، قابل للتمثيل بالمنوال الذاتي الأول للمبنى. لذلك سنقتصر في المرحلة الأولى من بحثنا على تطبيق هذه الطريقة على هذه الفئة من المباني التي يمكن تمثيلها بهزاز غير طردي (غير خطي)، علماً أن تعميمها لتشمل جملاً لها أكثر من درجة حرية ليس صعباً، وسنحاول معالجته في بحث آخر.

في كتابتنا لمعادلة حركة الهزاز غير الطردي (أو غير الخطي) الممثل للمبنى، سنستخدم بدلاً من قوتي الصلابة والتخميد، مفهوم القوة الداخلية $f(x,\dot{x})$ في واحدة الكتلة، وهي تابع غير طردي لكل من الانتقال والسرعة، يساوي حسب قانون نيوتن الثاني الفرق بين التحريض الزلزالي $-\ddot{x}_g$، والتسارع $\ddot{x}$. أي أن:

$$f(x,\dot{x}) = -\ddot{x}_g - \ddot{x} \qquad (1)$$

إن هذه القوة قابلة للقياس، وتسجل فعلياً في المباني المزودة بالتجهيزات، كتابع للزمن أو للانتقال، مما يسمح لنا بالتعرف على السلوك غير الطردي للاهتزازات المدروسة. وكي نوضح عدم مراوحة هذا

السلوك ضمن المجال الزمني $(0,T)$، لكامل فترة الزلزال التي تم فيها تسجيل كل من $x,\dot{x},\ddot{x},\ddot{x}_g$، نقرب هذه القوة المقيسة بالفرق (1)، بقوة $\hat{f}$ نعرفها كمجموع قوتين إحداهما قوة مرونة داخلية والأخرى قوة لزوجة داخلية وذلك بمساعدة العاملين ω,ξ المتغيرين مع الزمن. ونكتب:

$$f(x,\dot{x}) \approx \hat{f}(x,\dot{x}) = \omega^2(t)x + 2\xi\omega(t)\dot{x} \qquad (2)$$

أي أننا نمثل الهزاز بكتلة ثابتة M، معلقة إلى نابض متغير الصلابة $M\omega^2(t)$، وإلى مخمد لزج يطبق قوة متغيرة مع الزمن أيضاً. ونحاول تحديد قيم للتابعين $\omega(t),\xi(t)$، في مجالات زمنية جزئية من المجال $(0,T)$. إن شدة تغيير هذه القيم من مجال إلى آخر سيوضح مقدار التضرر الذي أصاب المنشأ في صلابته المتناسبة مع مربع $\omega(t)$، أو في قدرته على التخميد $\xi(t)$. إذا قسمنا المجال الزمني الكلي إلى n مجال جزئي يكون المجال رقم i محدداً بـ (T_{i-1},T_i)، علماً أن: $T_0=0,T_n=T,0\le i\le n$. إذا اخترنا عدداً كافياً من المجالات الجزئية يمكننا اعتبار العاملين ω,ξ ثابتين في كل مجالٍ منها. ومن ثم نقوم بتحديد هذين العاملين في المجال المعني عبر تطبيق شرطيّ *استصغار minmization* تابعيّ *functional* الخطأ التالي:

$$\chi_i^2 = \frac{\int_{T_{i-1}}^{T_i}(f-\hat{f})^2dt}{\int_{T_{i-1}}^{T_i}f^2dt}$$

$$\chi_i^2 = \frac{\int_{T_{i-1}}^{T_i}[(\ddot{x}+\ddot{x}_g)+2\xi(t)\omega(t)\dot{x}+\omega^2(t)x]^2dt}{\int_{T_{i-1}}^{T_i}(\ddot{x}+\ddot{x}_g)^2dt} \qquad (3)$$

بالنسبة للمتحولين: $(\omega^2),(2\xi\omega)$. إن هذا التابعيّ يعبر عن الفرق التربيعي المنظم *squared normed difference* بين المتوسط الزمني ضمن المجال الجزئي i، للقوة الداخلية الحقيقية f وللقوة الداخلية $\hat{f}$ التي يعطيها نموذج الهزاز المرن اللزج الخاص بهذا المجال الجزئي.

يعطي شرطا الاستصغار المذكوران الجملةَ التاليةَ من المعادلات الطردية (الخطية)، بالنسبة للمتحولين $(\omega^2),(2\xi\omega)$:

$$\left.\begin{aligned}(\omega^2)\int_{T_{i-1}}^{T_i} x^2 dt + (2\xi\omega)\int_{T_{i-1}}^{T_i} x\dot{x}dt &= -\int_{T_{i-1}}^{T_i} x(\ddot{x}+\ddot{x}_g)dt \\ (\omega^2)\int_{T_{i-1}}^{T_i} x\dot{x}dt + (2\xi\omega)\int_{T_{i-1}}^{T_i} \dot{x}^2 dt &= -\int_{T_{i-1}}^{T_i} \dot{x}(\ddot{x}+\ddot{x}_g)dt\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

والتي يمكننا إعادة كتابتها، بعد حساب التكاملات التي تشكل أمثال المتحولين $(\omega^2),(2\xi\omega)$، وتغيير رموزها، على النحو التالي:

$$\left.\begin{aligned}I_{xx}(\omega^2)+I_{x\dot{x}}(2\xi\omega) &= I_{xf} \\ I_{\dot{x}x}(\omega^2)+I_{\dot{x}\dot{x}}(2\xi\omega) &= I_{\dot{x}f}\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

وبحلها نحصل على قيمتي المتحولين ξ_i, ω_i، المعرّفين للنموذج المبسط الممثل للمبنى. وهاتان القيمتان هما:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{I_{xf}I_{\dot{x}\dot{x}} - I_{\dot{x}f}I_{x\dot{x}}}{I_{xx}I_{\dot{x}\dot{x}} - I_{\dot{x}x}I_{x\dot{x}}}} \quad (5)$$

$$\xi_i = \frac{I_{xx}I_{\dot{x}f} - I_{\dot{x}x}I_{xf}}{2\sqrt{(I_{xf}I_{\dot{x}\dot{x}} - I_{\dot{x}f}I_{x\dot{x}})(I_{xx}I_{\dot{x}\dot{x}} - I_{\dot{x}x}I_{x\dot{x}})}} \quad (6)$$

وبتعويضهما في (3) نحصل على القيمة الدنيا لتابعيّ الخطأ χ_i^2.

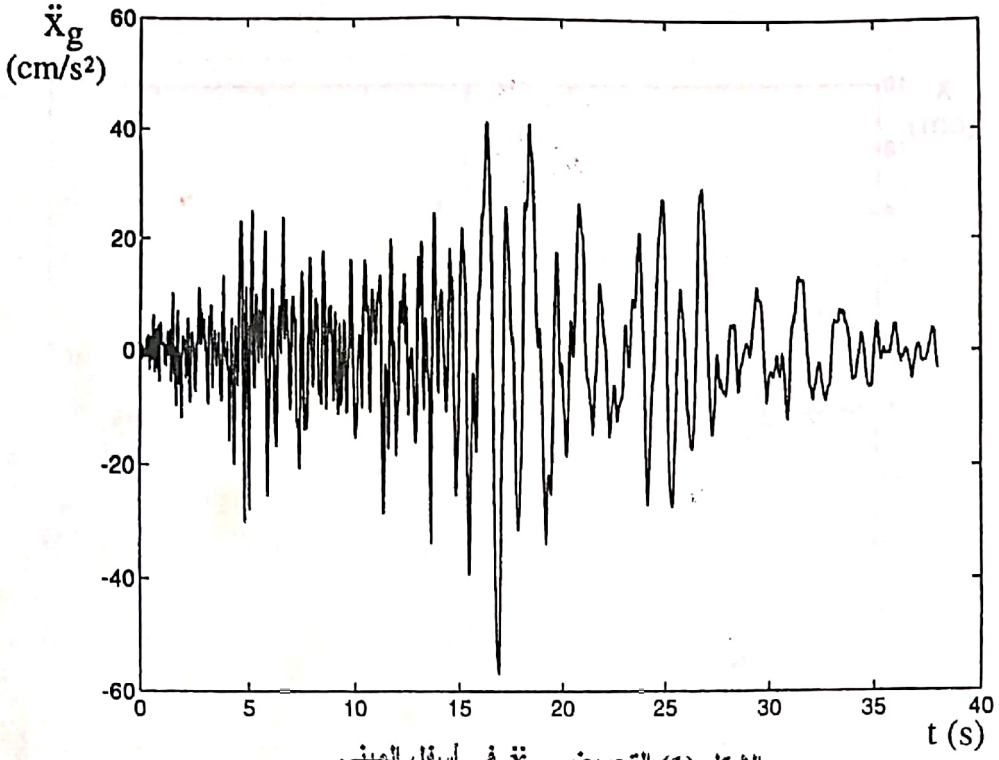
ولاختبار صلاحية طريقة الاستطراد المكافئ هذه، سنطبقها على مثال عددي. إذ نأخذ التسارع $(-\ddot{x}_g)$ المسجل[1] في أسفل مبنى " Great Western Saving Building" أثناء زلزال " Morgan Hill, 1984" الذي دام $T = 38\ Sec.$ ، انظر الشكل (1). ونحرض به هزازاً غير مراوح ثابت تخامده ξ ثابت، ونبضه الذاتي $\omega(t)$ تابع متناقص للزمن من الشكل:

$$\omega(t) = 0.5\ \omega_0 [1 + (T - t)^2 / T^2] \quad (7)$$

والذي نكتب معادلة حركته وفق قانون نيوتن الثاني بالشكل:

---

[1] وزع هذا التسجيل من قبل برنامج التجهيزات الكاليفورني لقياس الحركات القوية California Strong Motion Instrumentation program على العديد من مراكز البحث في العالم ومنها المخبر الفرنسي LCPC حيث اطلع عليها الباحث.



الشكل (1) التحريض $\ddot{x}_g$ في أسفل المبنى.

$$\ddot{x} + 2\xi\omega(t)\dot{x} + \omega^2(t)x = -\ddot{x}_g \qquad (8)$$

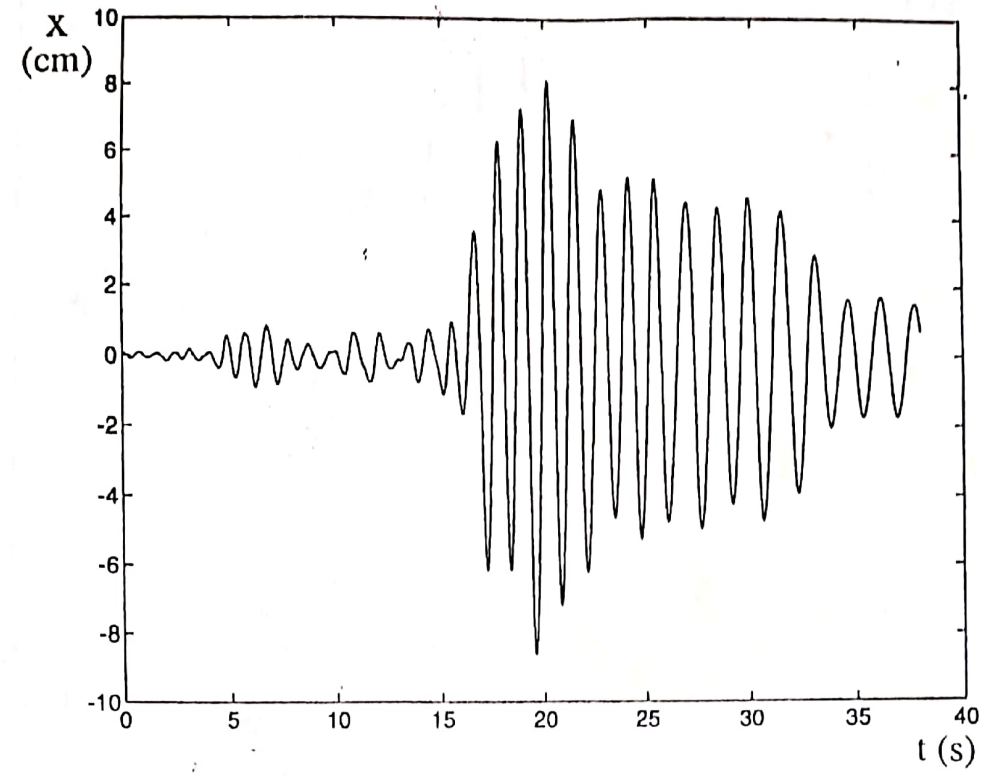
وهي معادلة تفاضلية من المرتبة الثانية ذات أمثال غير ثابتة وغير خطية. يمكننا مكاملتها عددياً بطريقة Runge-Kutta من المرتبة الرابعة (التي يمكن مراجعة خوارزمياتها في العديد من المراجع ومنها[9])، فنحصل على التسارع، السرعة والانتقال: $\ddot{x}, \dot{x}, x$. التي مثلناها على الأشكال (2)، (3)، (4) من أجل الحالة:

$$\omega_0 = 8\ Rad/Sec,\ \xi = 0.05.$$

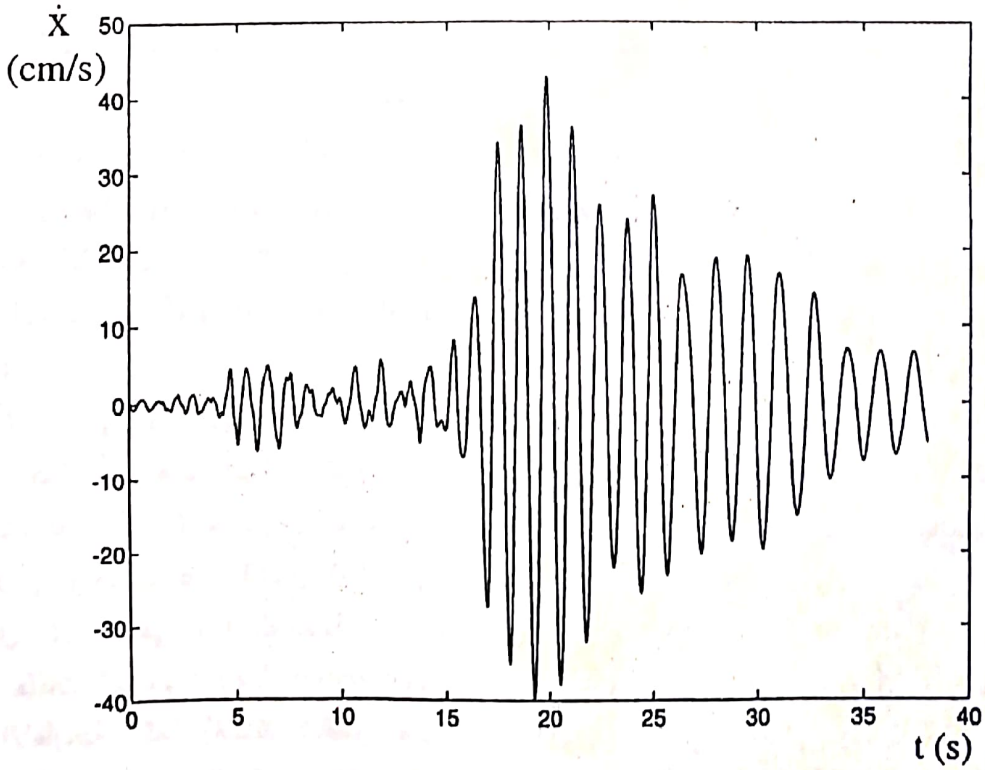
كما أن هذه التوابع تسمح لنا بمساعدة المعادلة (2) بحساب القوة الداخلية $f(x,\dot{x})$ وتمثيلها على الشكل (5) كتابع للانتقال x. وعلى هذا المخطط يُلاحظ تشكل *حلقات البطاء Hysteresis loops* شبه الاهليجية. كما يُلاحظ تناقص ميل المحور الرئيسي لهذه الحلقات، دلالةً على تردؤ الصلابة للمبنى الممثل بالهزاز.

ولتوضيح عملية التعرف والتحديد نعتبر الآن أن المعلوم هو الاستجابات: $x, \dot{x}, \ddot{x}$، والتحريض: $\ddot{x}_g$. ونحاول باستخدام المعادلة (5) حساب النبض الذاتي ω_i على عشرة مجالات زمنية جزئية متساوية تغطي فترة الزلزال: $T = 38\ Sec$.

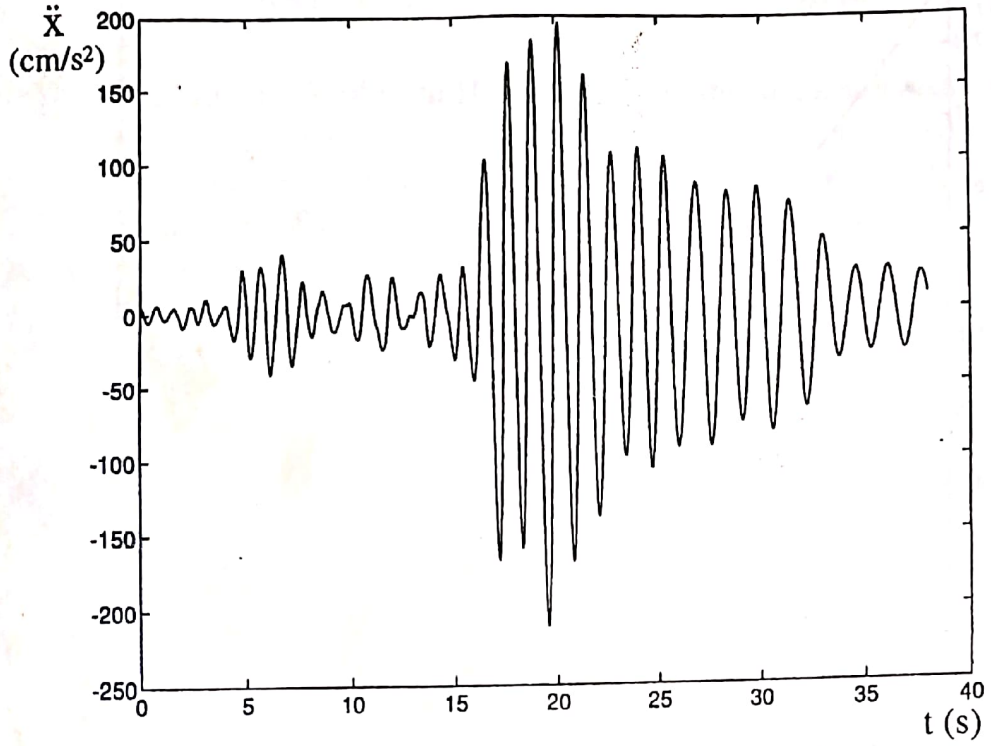
وعلى الشكل (6) نبين هذه القيم المحسوبة والمشار إليها بنجيم (*)، والمنحني المستمر الممثل للمعادلة (7) كتابعين للزمن. وتوضح المقارنة التقارب بين القيم المحسوبة والمنحني المستمر، إذ لايتجاوز أكبر خطأ 13 %، وهذا ما يدل على صلاحية طريقة الاستطراد المكافئ في التعرف على خصائص الهزاز الممثل الأولي والبسيط للمبنى وتحديد قيم هذه الخصائص.



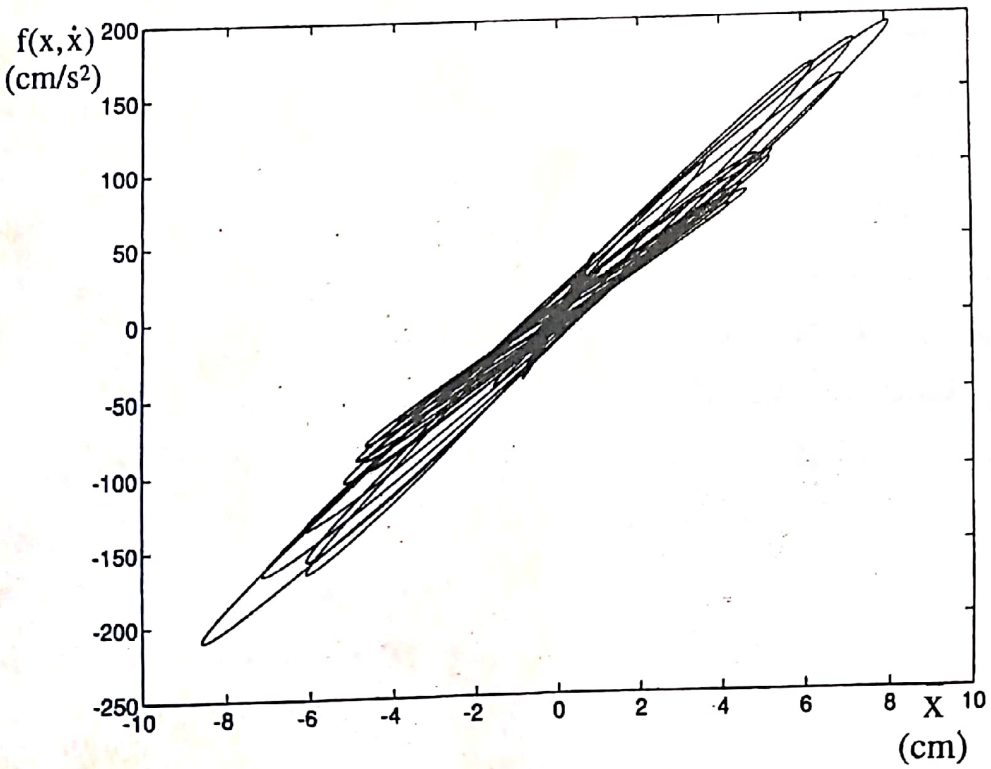
الشكل (2) استجابة الانتقال $x(t)$ في هزاز لزج مرن غير مراوح.



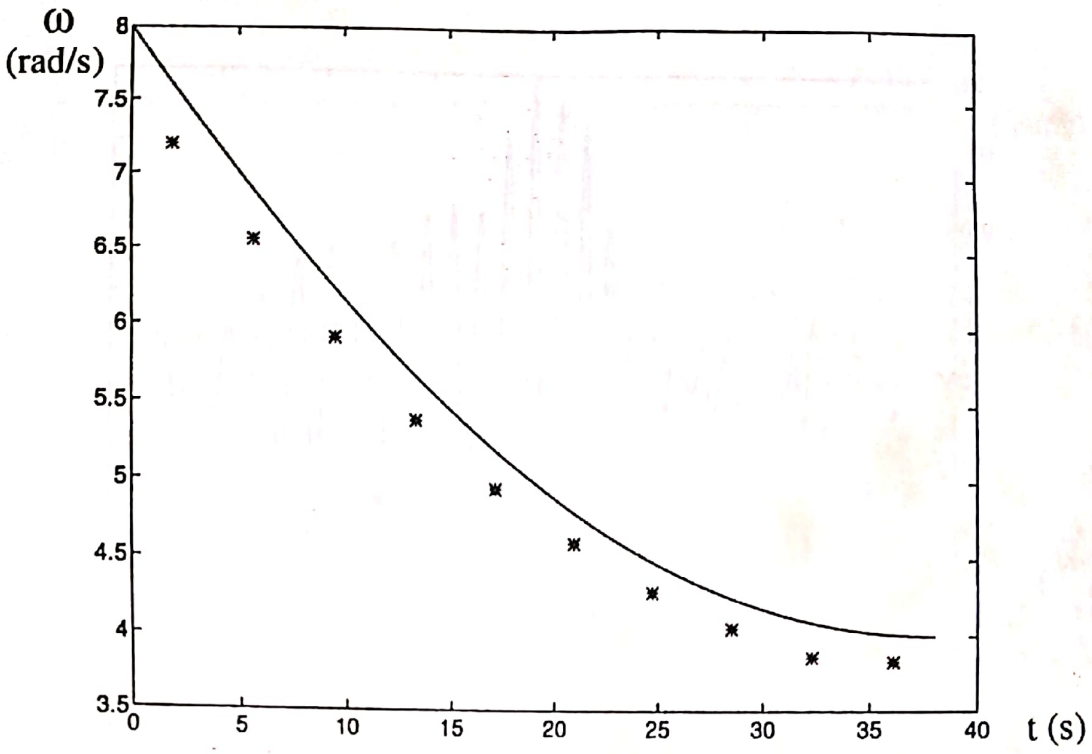
الشكل (3) استجابة السرعة $\dot{x}(t)$ في هزاز لزج مرن غير مراوح.



الشكل (4) استجابة التسارع $\ddot{x}(t)$ في هزاز لزج مرن غير مراوح.



الشكل (5) حلقات البطاء لهزاز لزج مرن غير مراوح.



الشكل (6) تغيير ω مع الزمن من أجل هزاز لزج مرن غير مراوح
(*) القيم المحسوبة من العلاقة (5)، الخط المستمر: القيم الدقيقة.

3- النتائج والتوصيات:

تشير النتائج التي توصلنا إليها إلى إمكانية تطبيق طريقة الاستطراد المكافئ البسيطة في مراقبة الأبنية المنتظمة أفقياً وشاقولياً وذات الارتفاعات المتوسطة، التي يمكن تمثيلها للغاية المحددة في مراقبة تردؤها، بهزاز ذي درجة حرية واحدة. ويحتاج تطبيق هذه الطريقة إلى عدد قليل من أجهزة تسجيل الاهتزازات، مما يجعل استعمالها في البلدان النامية أمراً ميسوراً.

كما أظهرت طريقة الاستطراد المكافئ المقترحة قدرة في المساعدة على تحديد القيم البدئية المميزة لخصائص المباني المراد الكشف عنها، باستخدام طريقة الكشف المنوالي المذكورة سابقاً، والتي تلزم لضمان حسن تقارب خوارزميات هذه الطريقة الأخيرة.

ومن المفيد متابعة هذا البحث، بغية تعميم الطريقة المقترحة على أبنية أكثر ارتفاعاً وأقل انتظاماً من الناحية الإنشائية، والتي تتطلب دراستها تمثيلها بعدد أكبر من درجات الحرية.

REFERENCES المراجع

[1]- C. Colodant, Voiles en Béton Armé Soumis à Cisaillement. Evolution de la Rigidité en Fonction de la Distorsion, comptes-rendus de la Conférence sur le Comportement non Linéaire des Structures en Béton Armé sous Sollicitation Sismiques, 25 Nov. 1978, St-Remy-les-Chevreuses, France, AFPS, pp.51-55.

[2]- R. Del. Toro Rivera, Comportement des noeuds en béton armé sous sollicitation alternées, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1988.

[3]- H. Iemura et P. C. Jennings, Hysteretic Response of a Nine Story Reinforced Concrete Building, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.3 1974, pp. 183-201.

[4]- p. Y. Bard, H. Afra et P. Argoul, 'Dynamic Behaviour of Building: Experimental Results from Strong Motion Data', *Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, V. Davidovici (ed.), Ouest Editions, 1992, VI-6, pp. 441-477.

[5]- H. Afra et P. Argoul, 'Identification du comportement sismique des bâtiments et comparaison avec les données réglementaires', *Annales des Ponts et Chaussées*, Vol. 53-54 1990, pp. 50-65.

[6]- H. Afra, *Identification du Comportement sismique de Bâtiments à Partir de leurs réponses Accelerometriques*, Thèse de Doctorat de l'Ecole National des Ponts et Chaussées, Paris 1991.

[7]- goul, *Identification des Structures vibrantes*, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1990.

[8]- goul, le Phénomène de dégradation de la rgidité dans le cmportement sismique de btiments en bton Armé, 3e Colloque National de Génie Parasismique, Mars 1993, St-Remy-les-Chevreuses, AFPS, Vol. II, BA, pp. 72-82, France.

[9]- W. H. Press & al, Numerical recipes, *the art of scientific computing*, 1992 Cambridge.