

دراسة الخصائص الديناميكية للمباني البيتونية باستخدام قياسات تجريبية للاهتزاز المحيط والنمذجة الرقمية

د. م. أمجد الحلواني⁽¹⁾

د. محمد خير عبد الواحد⁽²⁾

الملخص

تعد الطرائق التجريبية هي الأساس في تعريف السلوك الصحيح للمنشآت خلال الزلازل، وذلك من أجل تدعيم المنشآت الموجودة التي هي عرضة للخطر بسبب عدم موافقتها لاشتراطات التصميم الزلزالي العصرية ومن أجل تصميم منشآت مقاومة للزلازل مستقبلاً. إلا أن الكلفة العالية جداً لاختبار هذه المنشآت أو نماذج لها تجعل من الصعب جداً إجراء تجارب في هذا الصدد. وهنا تبرز أهمية النمذجة الرقمية التي تقوم على أساس محاكاة الواقع رقمياً باستخدام الطرائق المطورة لهذه الغاية من مثل طريقة العناصر المحدودة. ولأن الحصول على نموذج رقمي لمنشأ لا يعني الحصول على محاكاة دقيقة لسلوك هذا المنشأ تحت تأثير الأحمال المعتبرة في التصميم إلا في حالة مقارنة نتائج المحاكاة الرقمية بنتائج تجريبية ناتجة من المنشأ مباشرة كان لا بد من الاعتماد على طرائق اقتصادية وسريعة في استخراج النتائج التجريبية، وهنا برزت طريقة قياس الضجيج المحيط، ومعالجة معطيات هذا التسجيل من أجل الحصول على خصائص السلوك الديناميكي للمنشأة الذي يعد حجر الأساس في تقدير السلوك الديناميكي الخطي واللاخطي للمنشأة تحت تأثير الزلازل. ومن ثم فنتائج المقارنة بين الخصائص المستنتجة تجريبياً باستخدام هذه الطريقة، مع الخصائص المستنتجة رقمياً عن طريق النمذجة سوف تعطي المصادقية اللازمة لاعتماد النموذج الرقمي، أو تعديله بغية الحصول على النموذج الأدق. نفذت في هذا البحث الطريقة التجريبية المعتمدة على قياس الضجيج المحيط للمبنى، فضلاً عن تطوير نموذج رقمي أعطى نتائج قريبة من تلك النتائج التي أعطتها قياسات الضجيج المحيط عن طريقين، الأول هو دراسة أنماط الاهتزاز، أو ما يسمى بحل مسألة القيم المميزة. والثاني عبر إجراء اختبار نمطي Modal Testing للنموذج بعد تحريضه بزلزال ومن ثم معرفة تواترات التجاوب الأعظمي للمنشأ خلال مدة التحريض بعد إجراء التحويلات المناسبة.

الكلمات المفتاحية: الخصائص الديناميكية، مسألة قيم ذاتية، تحليل أنماط، نمذجة العناصر المحدودة، تحليل تاريخ- زمن لاختي، الاستقراء النمطي، قياسات الاهتزاز المحيط، النسب الطيفية.

(1) مدرس في المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية جامعة دمشق.

(2) باحث في هيئة الطاقة الذرية - الجمهورية العربية السورية

Extraction of Dynamic Properties of R/C Buildings using Experimental Ambient Vibration Measurements and Numerical FEM Modeling Simulation

Dr. Eng. Amjad Al Helwani⁽¹⁾

Dr. Mohamad Khir Abdul-wahed⁽²⁾

Abstract

Experimental studies are the basis for obtaining the actual response of structures under seismic forces during earthquakes, this is very important when retrofitting existing structures that are vulnerable to earthquakes because of lack of compliance with modern seismic provisions and to design an earthquake resistant structures in the future. Nevertheless, the high cost of such experiments on actual structures or scaled models makes it unfeasible to conduct such experiments. Therefore, numerical modeling of structures that simulate the actual ones using numerical simulation methods such as finite element method became invaluable. However obtaining a numerical model of a structure needs to be validated against erroneous analysis results. In this research a validation study to compare the numerical simulation results with experimental results are needed. These experiments should be cost-effective to obtaining the desired results. Ambient vibration measurements followed by processing offered accurate dynamic properties of the structures. These properties are the basis in assessing the dynamic linear and nonlinear response of the structure under earthquakes. And thereby comparing the experimental results with the numerical simulation results validated the accuracy of the numerical model and justified the usage of it as it demonstrated the model to be accurate. The ambient vibration measurements which were performed in this research; and the numerical model which was developed gave satisfactorily close results when they were compared. In the numerical modeling methods two approaches were conducted. The first one is by performing a direct frequency extraction analysis i.e. vibration eigenvalue problem solving, and the second one is by performing a modal testing procedure on the response of the structure after applying seismic excitation on the building.

Key Words: Dynamic Properties, Eigenvalue problem, Frequency analysis, Finite element modeling, Time-history nonlinear analysis, Modal testing, Ambient Vibration measurements, Spectral Ratios

⁽¹⁾Higher Institute of Earthquake Research and Studies, Damascus University Syria.

⁽²⁾Dept. of Geology, Atomic Energy Commission, Syria.

1- المقدمة:

تعتمد الطرق التجريبية في دراسة خصائص الأبنية على قياس اهتزاز المبنى الناجم عن عدة مصادر مثل الزلازل الطبيعية (القوية والخفيفة)، والتفجيرات الاختبارية، والاهتزاز القسري، والاهتزاز الناجم عن أي مصدر طبيعي (حركة أرض، حركة مواصلات وأشخاص ...) في موقع البناء المعروف باسم الضجيج المحيط (Ambient Noise). تتوع هذه الطرائق ناجم عن اختلاف ظروف التطبيق فمثلاً في البلدان الهادئة زلزالياً قد يكون من الصعب تنفيذ تسجيلات لاهتزاز الأبنية تحت تأثير الحركة الزلزالية القوية، وقد يكون من غير المعقول تنفيذ تفجيرات اختبارية في المدن والمناطق المأهولة. وتحتاج تقانة الاهتزاز القسري وهي غير متاحة حالياً في بلدنا. بالمقابل تظهر طريقة تسجيل الضجيج الطبيعي المسماة طريقة ناكامورا [1]، كوسيلة سريعة واقتصادية وذات كفاءة. صُممت طريقة ناكامورا أصلاً لتقدير الاستجابة الزلزالية في المواقع، وخصوصاً ذات الطبقات الرسوبية المفككة والهشة حيث، إذ تقوم هذه الطبقات بتضخيم سعة الاهتزاز الزلزالي عند بعض الأدوار، وتطيل مدة الاهتزاز [2]. في مراحل لاحقة وسّع عددٌ من الباحثين تطبيق الطريقة ليشمل تقدير الاستجابة الزلزالية في الأبنية والمنشآت [3]. يعدّ الضجيج المحيط في هذه الحالة إشارة دخل (Input signal) إلى البناء الذي يضخمها عند بعض الأدوار اعتماداً على خصائصه الديناميكية. قدّم Nakamura في عام 2000 شرحاً محتملاً للتوافق بين نتائج هذه الطريقة والطرائق الأخرى بأنّ المركبة الشاقولية للضجيج تنتقل عبر هيكل البناء، وتصل ذروته دون أي تضخيم (عملياً) [4] وذلك لاستناد المبنى إلى، الأرض ومن ثمّ تقييد حركته الشاقولية بهذا الاستناد، في حين أنّ المركبات الأفقية ستخضع لتضخيم مهم لأنّ البناء لا يوجد تقييد لحركته الأفقية سوى

قساوته الجانبية. وقد عدّ العديد من الباحثين مثل (Celebi, 2006) [5] أنّ النسبة الطيفية (H/V) المحسوبة وفق طريقة ناكامورا تمثل دالة التحويل المقيسة (Observed Transfer Function) إذ عدّ أنّ المركبة الشاقولية تمثل الإشارة الداخلة إلى البناء، في حين تمثل المركبة الأفقية الإشارة الخارجة منه. فضلاً عن ذلك فقد وجد Caselles وآخرون في 2010 [6] أنّ هذه النسبة الطيفية تمثل دالة تحويل حقيقية (Real Transfer Function)، وذلك عندما طبق طريقة ناكامورا في مدينة فالنسيا البرتغالية. استخدمت هذه الطريقة لتحديد الدور الطبيعي لسدين في إيطاليا، والدور الطبيعي لسد في المكسيك، كما استخدمت لتحديد الدور الطبيعي، ومعامل التخمد في بعض الأبنية في إيطاليا [7] والبرتغال [8]. بالمقابل فإنّ الطرائق التحليلية التي تعتمد على بناء نماذج حاسوبية رقمية بطرائق النمذجة المعروفة التي تعدّ طريقة العناصر المحدودة (FEM) أشهرها والأكثر تداولاً في نمذجة منشآت الأبنية، تستطيع أن تنتبأ ليس فقط بالخصائص الديناميكية للمنشآت، بل أيضاً بالسلوك التجاوبي لهذه المنشآت تحت أشكال التحميل الرأسية والأفقية الاستاتيكية كلّها (متغيرة ببطء) والديناميكية التي تأخذ بالحسبان تأثيرات العطالة، والتغيرات السريعة. وفيها يمكن تضمين معايير مختلفة للمواد المستخدمة في المبنى من ناحية المرونة، واللدونة، وسلوك المواد (إجهاد-انفعال) تحت تأثير التحميل، وإزالة التحميل، وإعادة التحميل. ممّا سبق المسائل الهندسية بحسب (S. H. Krandall 1956) [9] يمكن أن تصنف إلى ثلاث فئات:

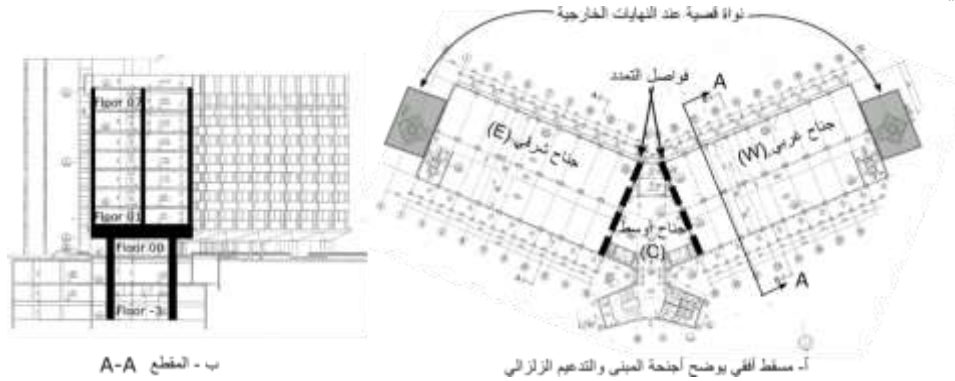
- مسائل توازن equilibrium
- مسائل قيم مميزة eigenvalue
- مسائل الانتشار propagation

إمكانية التنبؤ بخصائصها الديناميكية، بغض النظر عن حالتها في أثناء التجاوب مع التحريض أكانت خطية السلوك أم لا؟ بينما في تحليل الأنماط المباشر (حل مسألة القيم المميزة) فحسباً يتم في المنشأة ضمن حالتها الخطية. واقعياً مع أنّ إجراء قياسات تجريبية لخصائص المنشآت الديناميكية ممكن، وبعداً اقتصادي التكلفة إلا أنّ إجراء تجارب تحميل على مبان فعلية، أو نماذج مصغرة عن الفعلية من أجل استنتاج سلوكها تحت تأثير حمل زلزالي مثلاً يعدّ بالغ الصعوبة وبالغ الكلفة في المادة والزمن، وهنا تأتي طرائق النمذجة الرقمية لتحل هذا الإشكال اقتصادياً بزمن قصير نسبياً.

2- وصف المبنى المنمذج:

المبنى مؤلف من ثلاث كتل (أجنحة)، يفصل بينهم فاصلاً تمتد الشكل (1):

يمكن استنتاج الخصائص الديناميكية للمنشآت عن طريق حل مسائل القيم المميزة التي تعطي بشكل مباشر القيمة المميزة للنمط eigenvalue، وتواتر الجملة الإنشائية والسرعة الزاوية لها فضلاً عن إسهامات الكتل الفعالة بحسب نمط الاهتزاز الموافق. وتتوفر ثلاث طرائق وهي Subspace، و [10] Lanczos، وطريقة AMS لحل مسألة إيجاد القيم المميزة. وجميعها مستخدمة في برامج الـ FEM المتوفرة. من جهة ثانية يمكن عن طريق حل مسألة توازن للنماذج التحليلية استنتاج الخصائص الديناميكية استنتاجاً غير مباشر؛ وذلك عن طريق إجراء اختبار نمطي Modal testing [11] للسلوك الديناميكي للمنشأة تحت تأثير أحمال تحريض ديناميكية، ثم يحول سلوك هذه المنشأة التشوهي من المجال الزمني إلى المجال الترددي؛ وبذلك يتم تعرّف الترددات السائدة للمنشأة (القمم المميزة من مخطط التشوه في المجال الترددي). ما يميز الاختبار النمطي لسلوك منشأة بعد تحليلها ديناميكياً هو



الشكل (1): مبنى وزارة التعليم العالي مع التدعيم الزلزالي له المنفذ

وغيرها. بني بين عامي 1981 و 1985 وبسبب كونه أنشئ قبل مدة تطور الكود لعربي السوري زلزالياً، كان من الطبيعي عدم توافقه مع كثير من الاشتراطات الزلزالية؛ لذلك أعدت دراسة لتدعيمه زلزالياً عام 2001 [12]. ونقذ التدعيم بعد ذلك بحسب شروط الوزارة في عدم إمكانية إخلاء المبنى خلال عملية التدعيم، دعم المبنى خارجياً

ويتألف من سبعة طوابق متكررة: تستخدم مكاتب الطابق الأرضي: يستغل كمدخل رئيس وقاعة خدمة المراجعين، طابق القبو الأول: قاعات للمحاضرات والندوات العلمية وغيرها، طابق القبو الثاني: مكاتب ومستودع لتخزين الكتب، طابق القبو الثالث: يشتمل على مرآب وخدمات عامة وأقسام تدفئة، ومولدات كهرباء

للضجيج المحيط في الطابق العلوي من البناء، تشكل طريقة فعّالة وجيدة للحصول على الدور الطبيعي للبناء وفق محوريه الأفقيين الطولي والعرضي وكذلك للحصول على معامل التخميم لكل منهما، كما أنّها تعدّ طريقة اقتصادية منخفضة التكلفة إذ يمكن الاكتفاء بلاقط زلزالي واحد فقط. وقد أصبحت تسجيلات الضجيج المحيط جزءاً من عمليات المراقبة المستمرة للأبنية الحديثة، وخاصة العالية منها لمعرفة مدى التدهور الذي يعاني منه المبنى خلال دورة حياته، وعلى وجه الخصوص، في مواجهة الزلازل [14]

بحسب طريقة ناكامورا المشروحة سابقاً ورّعت لواقط الحركات الخفيفة على خمس نقاط في الطابق السابع (الأعلى) لمبنى وزارة التعليم من أجل رصد تجاوب المبنى مع المؤثرات الضعيفة. ومن تحليل المعلومات المرصودة لاستنتاج الخصائص الديناميكية. ورّعت اللواقط خلال ثلاث عمليات تسجيل متتالية، غير تموضع اللواقط فيها في كل عملية. يوضح الشكل (2) كيفية أخذ أحد القياسات خلال إحدى عمليات التسجيل من الطابق السابع للبناء.

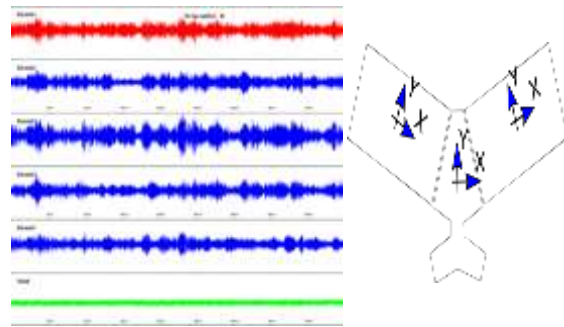
- معالجة التسجيلات:

أفترحت في السنوات الأخيرة تقنيات عدّة لتحليل الإشارة المسجلة في الأبنية، بهدف تقدير سلوكها الديناميكي، ولتقدير التفاعل الديناميكي بين تلك الأبنية وبين التربة التي تحتها، وذلك بعد أن أستخدمت تحويلات فورييه (Fourier Transforms) مدّة طويلة من الزمن [11]. شكلت تحويلات فورييه إحدى التقنيات الأكثر استعمالاً في تقدير الخصائص الديناميكية للأبنية والمنشآت عند تعرضها للحركة الزلزالية عبر حساب الأطياف السعوية من التسجيلات المنفذة في تلك الأبنية [15]. ولكنّ تحويلات فورييه تخضع لفرضية جوهريّة؛ وهي استقرار الإشارة المحللة (Stationarity)؛ وهذا يحد من تطبيقها على

إقدر الإمكان] عن طريق إضافة كتلة نواة صلبة إلى كلّ من الجناحين الشرقي والغربي عند الأطراف الخارجية لهذه الأجنحة، وأيضاً استكمل بناء الجدران الحاملة الموجودة عند منطقة فواصل التمدد في الجناح الشرقي والغربي لتعمل كجدران قص وذلك بتأمين استمراريتها حتى مستوى التأسيس، إذ بحسب التصميم المعماري كانت في الطوابق السبعة العلوية فقط. من أجل التأكد من دقة النموذج من ناحية نتائج التحليل الخاصة به أجرى الباحثان تجربة قياس الاهتزاز المحيط لمبنى وزارة التعليم العالي (Ambient Vibration)؛ وبعدها عولجت هذه القياسات لاستخراج الخصائص الديناميكية لهذا المبنى. ومن ثم قورنت هذه الخصائص التجريبية بالخصائص المستنتجة من النموذج الرقمي (نموذج FEM) الذي سيشرح لاحقاً.

3- الاهتزاز المحيط Ambient Vibration:

قارن Navarro وآخرون في 2006 بين الطرائق التجريبية، والطرائق التحليلية من خلال تقدير الخصائص الديناميكية لبناء من الإسمنت المسلح معزول زلزالياً [13]، فوجد أنّ طريقة ناكامورا، بوصفها تقنية للقياس الموضوعي



الشكل(2): إلى اليمين: توزيع اللواقط على محوري كل جناح، إلى اليسار: تسجيلات اللواقط

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \quad (2)$$

إذ تعبر $w(t-\tau)$ عن نافذة زمنية متحركة ذات عرض زمني (τ) ، ويُفترض أن الإشارة المسجلة مستقرة ضمن هذه النافذة الزمنية. $h(t)$ يمثل الإشارة الزلزالية في مجال الزمن (t) ضمن النافذة $w(t-\tau)$ و $STFT(f)$ يمثل الإشارة الزلزالية في مجال التردد (f) . يجب أن يختار عرض النافذة الزمنية بعناية لأنه يحدد الدقة الزمنية والترددية في حساب الأطياف. فإذا كان عرض النافذة قصيراً جداً حصلنا على دقة جيدة في المجال الزمني. أما في المجال الترددي فستكون الدقة منخفضة. بالمقابل إذا كان عرض النافذة كبيراً جداً حصلنا على دقة منخفضة في المجال الزمني. أما في المجال الترددي فستكون الدقة جيدة. يمكن عرض الأطياف المحسوبة متراكبةً فوق بعضها بتابعية التردد بهدف إظهار وجود استقرار في الإشارة المسجلة عندما تتطابق الأطياف مع بعضها.

تقنية أخرى يمكن استخدامها للتغلب على محدودية تحويلات فورييه؛ وهي تقنية النسبة الطيفية (Horizontal to Vertical Spectral Ratio HVSR) بين مركبتي التسجيل الأفقية والشاقولية، كما عرفها Nakamura. حسب هذه التقنية فإن تردد الاهتزاز للنمط الأساسي للبناء يوافق تردد السعة العظمى للنسبة الطيفية. طبق باحثون هذه التقنية على تسجيلات الضجيج المنفذة في عدد من الأبنية [18] بأخذ وسطي النسبة الطيفية لعدد من النوافذ الزمنية القصيرة وكانت هذه النوافذ غير متراكبة وطول كل منها 30 ثانية. أعطى هذا التطبيق نتائج متوافقة مع تقنيات أخرى. ثم درس باحثون آخرون منهجية للعوامل المؤثرة في تقنية النسبة الطيفية (HVSR) من خلال المشروع الأوربي لتقدير الاستجابة الزلزالية للموقع باستخدام الضجيج المحيط بالموقع (SESAME) [19].

الإشارة الزلزالية التي تعدّ إشارة عابرة ومؤقتة (transient)، فضلاً عن ذلك فإن الخصائص الديناميكية للبناء متغيرة مع الزمن، ويعود ذلك إلى السلوك اللاخطي للبناء وإلى التفاعل الديناميكي بين البناء، والترتبة التي تحته، وتأثر هذا البناء بالحركة الاهتزازية للأبنية المجاورة [16].

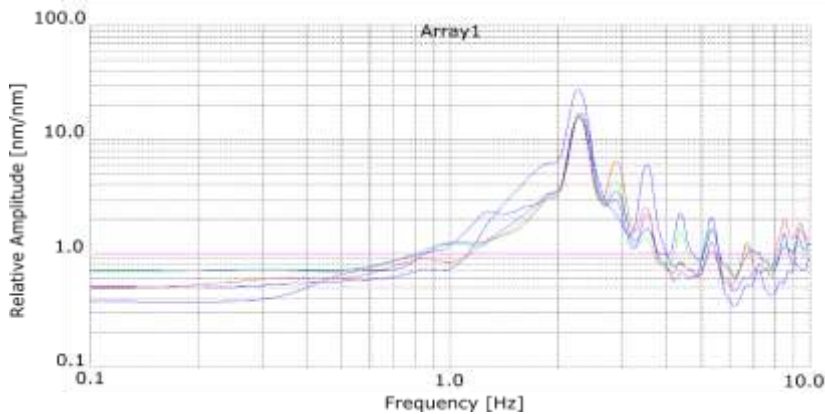
درس التطور الزمني للخصائص الديناميكية لنظام ما سابقاً بطريقة تقريبية، وذلك بالافتراض أن اهتزازها مستقر. يمكن تحت هذه الفرضية تطبيق تحويلات فورييه المعطاة بالعلاقة الآتية:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \quad (1)$$

$h(t)$ الإشارة الزلزالية في مجال الزمن (t) ، $H(f)$ الإشارة الزلزالية في مجال التردد (f) .

يمكن الحصول على نتائج مرضية بتطبيق تحويلات فورييه على الأجزاء المستقرة من التسجيلات، واستبعاد الأجزاء غير المستقرة [17]. إن تطبيق تحويلات فورييه على إشارة غير مستقرة سيزودنا فقط بوسطي محسوب لكل سعة طيفية على كامل الإشارة كلها ومن ثم سنخسر المعلومات التفصيلية عن التغيرات الطيفية اللحظية، أي التغيرات اللحظية للسلوك الديناميكي. وقد أمكن التغلب هذه المحدودية باستخدام تحويل فورييه قصير الأمد (Short Time Fourier Transform STFT)، إذ تقسم الإشارة المسجلة إلى نوافذ زمنية قصيرة تطبق عليها تحويلات فورييه كل على حدة. يضبط عرض هذه النوافذ الزمنية تبعاً للتردد الأصغري المراد دراسته وبما يتوافق مع الدقة المطلوبة في مجالي الزمن والتردد [15]. يسمح التحويل (STFT) بمعرفة التغيرات الزمنية للخصائص الطيفية في الإشارة المسجلة ويعرف هذا التحويل بالشكل الآتي:

السابقة باستخدام البرنامج (BuldRes.exe) [20] للحصول على الخصائص الديناميكية لمبنى وزارة التعليم العالي من خلال حساب الأطياف والنسب الطيفية. حُسبت الأطياف باستخدام نوافذ زمنية مدة كل منها 30 ثانية تحقيقاً لبعض المعايير التي نصح بها المشروع الأوربي (SESAME)، وهذا يسمح بتحري ترددات تراوح من 0.03 Hz إلى 50 Hz. اختيرت النوافذ الزمنية في الأجزاء المستقرة من التسجيلات. وصُقلت الأطياف المحسوبة باستخدام طريقة (Hanning). سمح طول التسجيل بحساب تلك الأطياف بعدد كبير من النوافذ (لا يقل عن 20 نافذة زمنية) تحقيقاً لبعض المعايير التي نصح بها المشروع الأوربي (SESAME)، ومن ثم فإنّ الأطياف الوسطية ستكون أكثر تعبيراً عن الخصائص الفعلية لتلك التسجيلات المستقرة زمنياً من جهة ، وأقل تأثراً بمصادر التشويش الطارئة، كعبور آلية ثقيلة مثلاً.



الشكل(3): النسب الطيفية للتسجيل الأول للواقظ

الجدول(1): نتائج المعالجة لأطياف فورييه وطريقة ناكامورا للتسجيل الأول

النسب الطيفية (ناكامورا)		أطياف فورييه		الاتجاه	اللاقظ-الجناح
التضخيم	التردد Hz	نسبة التخمد %	التردد Hz		
15.25	2.29±0.03	4.81±0.69	2.29±0.02	X	E-H1
16.57	2.29±0.03	4.81±0.65	2.29±0.03	Y	E-H2
27.51	2.27±0.02	4.30±0.52	2.27±0.02	Y	C-H3
17.64	2.31±0.03	4.26±0.63	2.29±0.02	X	E-H4
16	2.27±0.02	4.30±0.39	2.27±0.01	Y	E-H5

وقد سمحت هذه الدراسة بتحري موثوقية طريقة النسبة الطيفية وفق ناكامورا، وتحديد تأثير الشروط التجريبية ومعاملات طرائق المعالجة اللاحقة، وأعطت نتائج مهمة تسمح بإعطاء موثوقية عالية لهذه الطريقة.

أما بالنسبة إلى تقدير معامل التخمد بالطرائق التجريبية فتتوافر طرائق عدّة نذكر منها: طريقة تلاشي الاهتزاز الحر (Free-vibration Decay method)، وطريقة منحى طيف الاستجابة الترددي، وطريقة ضياع الطاقة بالدورة (Energy Loss per cycle method). يمكن تطبيق طريقة منحى طيف الاستجابة بتقنية (Half-power bandwidth) حسب العلاقة الآتية [13]:

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (3)$$

إذ يمثل ξ معامل تخمد البناء. f_1 و f_2 هما الترددان الموافقان لسعة تعادل 70% من سعة تردد الطنين، ومجاوران مباشرة لهذا التردد. طبقت تقنيات المعالجة

- تقييم جودة التسجيلات:

يمكن أن نستنتج من المعاينة البصرية لأشكال الأطياف قبل حساب الوسطي لها مدى استقرار التسجيلات المنفذة، وفي هذه الحالة فإن أطياف فورية المحسوبة يمكن أن تستخدم مباشرة لتقدير السلوك الديناميكي للمبنى وزارة التعليم العالي لتحقق فرضية استقرار التسجيل [21]. تشير قيم الانحراف المعياري المنخفضة في الجدول (1) إلى أن الأطياف والنسب الطيفية المحسوبة في النوافذ العشرين متوافقة توافقاً جيداً فيما بينها.

4- النمذجة الرقمية لأجنحة المبنى:

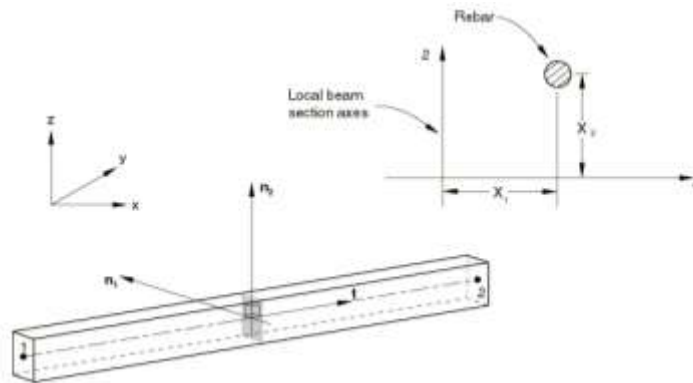
من غير الاقتصادي إجراء أي تجربة تحميل (وخصوصاً زلزالياً) على مبنى فعلي أو نموذج مصغر عنه، بل يستحيل عملياً إجراء مثل هذه التجارب إلا في نطاق ضيق وبكلفة عالية جداً على نماذج بمقياس واقعي، أو مقياس مصغر، وباستخدام طاولة اهتزاز عملاقة على الأرجح وتكون غاية ذلك إعطاء فكرة عامة عن السلوك والاستطاعة الزلزالية (Capacity) في المرحلة ما بعد المرنة لمواد هذه المنشأة وعناصرها. فالاستعانة بالطرائق التجريبية لمعرفة السلوك الزلزالي للأبنية ينطوي على صعوبة بالغة بسبب الأوزان الهائلة لهذه المباني ومن ثم الحاجة إلى طاقة كبيرة لتحريكها فضلاً عن التجهيزات الضخمة والقوية التي تتحمل تسارعات تشابه تلك التي تحدث في الواقع، لذلك لا يلجأ لمثل هذه التجارب إلا في حالات نادرة، وتكون كلفتها باهظة لا تستطيعها إلا الدول الغنية التي هي عرضة لزلزال مدمر بشكل متكرر مثل اليابان التي بنيت فيها أكبر طاولة اهتزاز على نطاق العالم المسماة E-Defence [22] بعد الزلزال المدمر الذي ضرب مدينة Kobe، وراح ضحيته نحو 6000 نسمة في العام 1995.

من أجل ذلك لجأ المهندسون منذ سبعينيات القرن الماضي إلى محاكاة الواقع تحليلياً عن طريق نمذجة رقمية تعتمد اعتماداً أساسياً على طريقة العناصر المحدودة FEM، وهي طريقة صممت لحل المعادلات التفاضلية الجزئية التي تمثل حلولها توابع الحالة للمنشآت كقوى وانتقالات وإجهادات وتشوهات وغيرها من المتحولات المعتمدة في تصميم المنشآت. تتميز هذه الطريقة بتجزئة المنشأ إلى عدد محدد من العناصر ترتبط فيما بينها بعقد بحيث تشكل شبكة توصف هندسة المنشأة، وتتوافق فيها الانتقالات عند العقد، وتعبّر من خلالها مسارات القوى المماثلة لمسارات القوى في المنشأ الأصلي المراد محاكاته. تطورت هذه الطريقة تطوراً سريعاً بحيث أصبحت النمذجة الرقمية حالياً تعطي نتائج بالغة الدقة من أجل إجراء دراسات تتضمن التحميل الديناميكي اللاخطي على الجمل الإنشائية بأشكالها المتعددة.

- خصائص النموذج للمبنى المدروس:

من أجل تحديد الخصائص الديناميكية عن طريق المحاكاة الرقمية لنموذج FEM يماثل في أبعاده الهندسية وخصائصه وشروط تحميله واستناده إلى مبنى وزارة التعليم العالي في الوضع الاستثماري له، شكّل نموذج FEM للمبنى كُله (الكتلتان المتناظرتان الغربية والشرقية فضلاً عن الوسطى) على برنامج Abaqus (ABAQUS) (2014) [22]؛ وهو برنامج نمذجة رقمية باستخدام العناصر المحدودة متعدد المهام قادر على محاكاة معظم الظواهر الفيزيائية الميكانيكية والحرارية والكهربائية إدراجها ضمن النموذج عندما تقتضي الحاجة، بما في ذلك لا خطية المواد، واللاخطية الهندسية في النموذج تحت تأثير الأحمال (P-Δ effect). ويحتوي البرنامج أيضاً على مكتبة واسعة من العناصر وسلوك المواد سريعة

- الانهيار والمطاوعة. كل جناح من أجنحة المبنى الثلاثة يتألف بحسب النمذجة من:
- جزء إطاري يحتوي على العناصر الخطية ذات الأطوال الكبيرة نسبياً بالنسبة إلى مقاطعها التي تشكّل أعمدة المنشأ وجوائزها. استخدم في ذلك العنصر المنتهي الفراغي B31 (يرمز الحرف إلى نوع العنصر Beam، والرقم 3 إلى تمثيله ضمن فضاء ثلاثي البعد. أما الرقم 1 فيشير إلى التابع الخطي الممثل لسلوك العنصر)، وهو عنصر جانزي (يتشوه بفعل القوى المحورية والقص والعزم فضلاً عن الفتل) يصلح هذا العنصر لنمذجة الجوائز والأعمدة النحيلة فضلاً عن الجوائز العميقة؛ لأنه يتبع نظرية Timoshenko للجوائز التي تأخذ تشوهات القص بالحسبان. قسّمت الأعمدة والجوائز إلى عناصر من هذا النوع مع فرض طول العنصر 500 mm وسطياً في النموذج، وهو بعد صغير بشكل كافٍ من أجل أن تكون نتائج التحليل مستقلة عن حجم التقسيمات للعناصر في النموذج.
 - جزء صفائحي يحتوي على العناصر السطحية ذات المساحات الكبيرة بالنسبة إلى سماكتها وهي تؤلف بلاطات المنشأ وجدرانها على مختلف أنواعها. وفيها استخدم العنصر الصفائحي الفراغي S4R، وهو عنصر قشري يتحمل القوى في مستويه وخارج مستويه، يرتبط مع باقي العناصر بأربع عقد على زواياه، ذو نقاط تكامل مخفضة Reduced Integration Points. فرضت أبعاده بحيث تكون 1000x1000 mm تقريباً.
- ربط رباطاً كاملاً بين الجزء الإطاري والجزء الصفائحي عند أماكن الالتقاء، وبحيث ترتبط درجات الحرية في هذه النقاط ارتباطاً كاملاً وهو ما يفرضه حالة الصب في المكان.
- هناك فرضيتان لنمذجة سلوك بلاطات الطوابق، الفرضية الأولى: هي فرضية الحجاب الطابقي الصلب Rigid Diaphragm؛ وهي فرضية مستخدمة على نطاق واسع عند نمذجة أبنية البيتون المسلح؛ خصوصاً تلك الحاوية على أنظمة البلاطات عالية التساوية في مستويها (البلاطات المعصبة، والبلاطات الصلدة). وأمّا الفرضية الثانية فهي فرضية الحجاب الطابقي ذي الصلادة المحددة، وتطبق بحيث تؤخذ تشوهات البلاطات ضمن مستويها بالحسبان في أثناء التحليل الديناميكي تحت تأثير هزات زلزالية قوية على المنشأ. في نموذج مبنى وزارة التعليم اعتمد على نموذج الحجاب ذي الصلادة المحددة من أجل أخذ تأثير عدم انتظام أبعاد البلاطات في الاتجاهين فضلاً عن وجود فتحات في بعض البلاطات.
 - استخدم تسليح طولي وعرضي مساوٍ للتسليح الوارد في المذكرة الحسابية للمبنى وذلك لعناصر الجزء الإطاري (جوائز وأعمدة) بموجب أمر Rebar حيث توقع قضبان التسليح في المقطع العرضي للعنصر الجانزي كل قضيب على حدة. أمّا تسليح العناصر الصفائحية (بلاطات وجدران) فتم عن طريق أمر Rebar Layer لمقاطع العناصر القشرية.



الشكل (4): متحولات إدراج التسليح في مقاطع الجوائز (ABAQUS 2014)

العربي السوري تقدر الحمولات الخدمية للأبنية الحكومية بـ 5 KN/m^2 بما يكافئ تقريباً 0.5 Ton/m^2 . لذلك فرضت على شكل كتل بغية إدخال أثرها العطالي في التحليل الديناميكي الخطي النمطي، وتحليل التاريخ الزمني (Time-History) لهزات زلزالية تصميمية، وهو ما يتوافق مع استخدام فرضية الحجاب الطابقي المحدد الصلادة.

استخلصت خصائص المواد من بيتون وتسليح فولاذي من المذكرة الحسابية للمبنى التي أنجزت من أجل تدعيم المبنى زلزالياً.

- أهمل التفاعل المشترك بين التربة والمنشأ في أثناء التحليل الزلزالي في هذه الدراسة لذلك لم يلجأ إلى نمذجة الأساسات بشكلها الفراغي وفرضت وثائق تامة أسفل الأعمدة والجدران عند قاعدة المنشأ (الكود السوري للزلازل). الوثيقة التامة تعني منع الإنتقالات الثلاثة في الإتجاهات x و y و z ، ومنع الدورانات حول المحاور السابقة لعقد أسفل الأعمدة وعقد أسفل الجدران.

- فرضت حمولات خدمية ضمن المبنى، وهي الحمولات الإضافية الميتة والحية المتوقعة اعتيادياً (مماثلة لتلك عند أخذ التسجيلات من مبنى الوزارة) وبحسب الكود

الجدول (2): خصائص المواد المستخدمة

المادة	E [Mpa]	حد المرونة [Mpa]	المقاومة [Mpa]	معامل بواسون	السلوك التلدي
بيتون	31008.4	-	30	0.2	مرن-لدن تام
فولاذ التسليح	200000	392	-	0.3	مرن-لدن تام

5- التحليل النمطي (حل مسألة القيم المميزة):

تعدّ كثير من المنشآت الهندسية منخفضة التخميد كالأبنية البيتونية العادية، إذ تقدر نسبة التخميد وسطياً بـ $\xi = 5\%$ بحيث يكون التجاوب ذو الترددات المنخفضة لهذه المنشآت (الأنماط السائدة) متأثراً بتأثيراً أساسياً بالإسهامات الآتية عن طريق كتل هذا المنشأ وقساوته (دون التخميد) ومن ثمّ يستخدم نموذج الأنماط الطبيعية المعرفة:

$$-[M]\{\phi\}_r \omega_r^2 + [K]\{\phi\}_r = \{0\} \quad (4)$$

يكون حل مسألة القيم المميزة عبر خوارزميات عدّة، وقد استخدمنا خوارزمية Subspace من أجل تقليل المدخلات اللازمة لإجراء التحليل. وحلّل كل جناح على حدة، وأعطى النتائج الموضحة في الجدول

الجدول(3): الأنماط الأساسية لأجنحة مبنى وزارة التعليم تحليلياً.

النمط	الجناح E				الجناح C					
	التواتر [Hz]	الكتل الفعالة		الاتجاه	القيمة المميزة	التواتر [Hz]	الكتل الفعالة		الاتجاه	القيمة المميزة
		النسبة %	مجموعها [Ton]				النسبة %	مجموعها [Ton]		
1	2.24	97.26	16159	Y	198.62	2.25	95.90	5309.9	X	199.89
2	2.98	97.49	16198	X	350.1	2.56	95.99	5315.0	Y	259.17
3	3.87	-	-	Z(R)	590.38	4.38	-	-	Z(R)	755.85

• الجناح الوسطي Wing-C:

الأول للجناح E (والجناح W) مع خطأ في تحديد قيمة التردد بين القيمة التحليلية الرقمية (2.24 Hz) والقيمة التجريبية (2.27 Hz) قيمته 1.19%. كما أنّ النمط الأول للجناح الوسطي C أعطى بحسب قيم القياسات التجريبية المبيّنة في الجدول (1) قيمة تردد مساوية إلى (2.27 Hz) بقيمة قريبة بشكل ملفت من نمط الجناح E، وبالمقارنة بالقيم التحليلية الرقمية تبين أنّ قيمة هذا التردد للنمط الأول نفسه هو (2.25 Hz)؛ أي بخطأ قيمته 0.87%، ومن ثمّ أثبت التحليل الرقمي دقة القياسات التجريبية في هذه الحالة. من أجل الجناح الشرقي Wing-E نلاحظ أنّ نمط الاهتزاز الأول المسيطر هو اهتزاز انسحابي بالاتجاه Y الشكل (5) مع ظهور عدم تجانس في مقدار هذا الانسحاب بالاتجاه Y لطرفي الطابق في ذلك الاتجاه، وذلك يفسره التفاوت في القساوة الأفقية للمسقط بعد أن دعم زلزالياً الشكل (1) إذ إنّ عدم التناظر بتوزيع الجدار والنواة بالنسبة إلى المحور Y أدى إلى ظهور فارق بالمسافة بين مركزي العطالة والقساوة للمسقط الأفقي للجناح، وتحديدًا بالاتجاه X ممّا يفسر عدم حدوث قتل في النمط الثاني إذ يكون الانتقال انسحابياً على المحور X عند تحريض الجناح E بهذا الاتجاه.

النمط الثالث لهذا الجناح هو نمط دوراني يمثل حالة القتل الصافي حول المحور Z (الشاقولي). أمّا من أجل الجناح الوسطي Wing-C فنلاحظ أنّ النمط الأول المسيطر هو اهتزاز انسحابي باتجاه المحور X مترافق مع قتل ناشئ عن عدم انطباق مركز صلابة الطابق مع مركز عطالته.

• كتحقق أولي من دقة تحليل الأنماط نتحقق من كون مجموع الكتل الفعالة للمنشأ بالاتجاهات الأفقية المعتبرة بالتحليل تساوي 90% تقريباً من كتلة الجناح التي تساوي 5536.99Ton، ونتيجة لتحليل أنماط الاهتزاز وجد أن الكتلة الفعالة للجناح تساوي 5309.9 Ton و 5315.0 Ton في الاتجاهين X و Y على التوالي بما يساوي نسبة 95.9% و 95.99% على التوالي أيضاً. من ضمن الأنماط كان الإسهام الأكبر للقيمة المميزة الأولى التي توافق نمط الاهتزاز وفق الاتجاه X ثم القيمة المميزة الثانية التي توافق نمط الاهتزاز وفق الاتجاه Y. فضلاً عن النمطين السابقين هناك نمط دوراني حول المحور Z (الشاقولي) يتوافق مع حالة حدوث قتل في الجناح الوسطي في أثناء الاهتزاز بسبب عدم تطابق مركز عطالة الجناح مع مركز القساوة الجانبيه له.

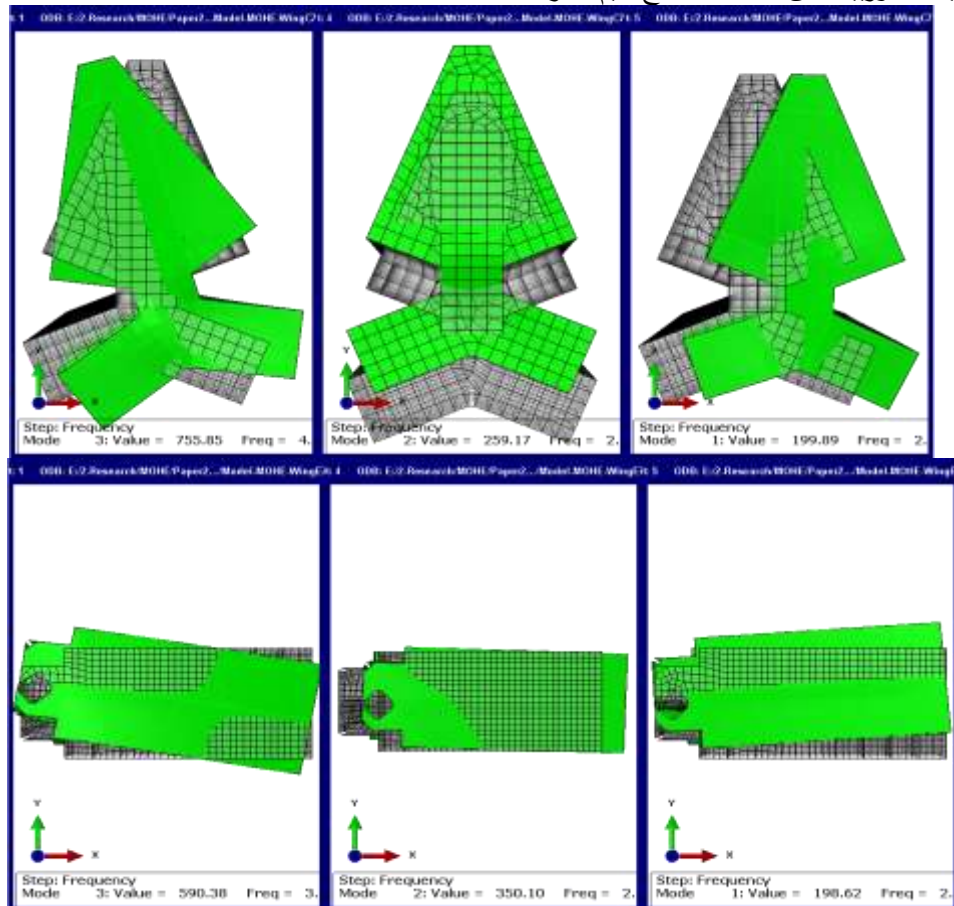
• الجناح الشرقي (والغربي) Wing-E:

كتلة الجناح الشرقي تساوي 16614.96Ton، وبحسب تحليل أنماط الاهتزاز وجد أنّ الكتل الفعالة للجناح E، هي 16159Ton و 16198Ton في الاتجاهين X و Y على التوالي، بنسبة 97.5% و 97.3% لكل من الاتجاهين X و Y على التوالي أيضاً. أنماط الاهتزاز ذات نسب الإسهام الأعلى هو النمط الأول ذو القيمة المميزة 198.62 بالاتجاه Y للجناح E، ثم النمط الثاني بقيمة مميزة 350.1 وبالاتجاه X. بالمقارنة بين الجدول (1) والجدول (3) نلاحظ أنّ نمط الاهتزاز المسيطر الذي ظهر جلياً بمخططات النسب الطيفية الشكل (3) هو النمط

6- التحليل الديناميكي اللاخطي Modal Testing للجناح-E:

اهتزاز المبنى. من أجل ذلك استخدمنا أحد التسجيلات الزلزالية من مدينة Kobe اليابانية لعام 1995، حيث ضرب زلزال قوي بلغت شدته $M_w=6.9$ على مقياس الشدة العزمي. عدّل هذا التسجيل ليتوافق مع التسارع الأرضي الأعظمي المتوقع لزلزال من المرتبة نفسها (ذو احتمال عودة 2% خلال 50 سنة) في مدينة دمشق حيث $PGA=0.3g$ [24]

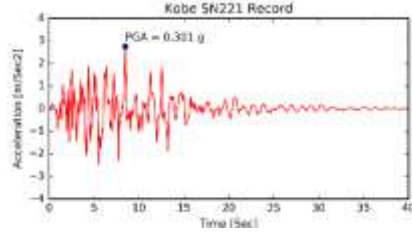
يمكن عن طريق حل مسألة توازن النماذج التحليلية استنتاج الخصائص الديناميكية استنتاجاً غير مباشر، وذلك عن طريق إجراء اختبار نمطي Modal testing للسلوك الديناميكي للمنشأة. إذ تحرض المنشأة عن طريق سجل زلزالي (حل مسألة توازن ديناميكية) ليصار إلى تسجيل السلوك الديناميكي اللاخطي للمنشأة عبر تسجيل تجاوب الحركة الأفقية لإحدى نقاط الطابق الأخير للمبنى في اتجاه التحريض. ومن ثمّ يحوّل هذا التسجيل الرقمي من المجال الزمني إلى المجال الترددي عن طريق تحويلات فورييه من أجل استنتاج قيم الترددات لأنماط



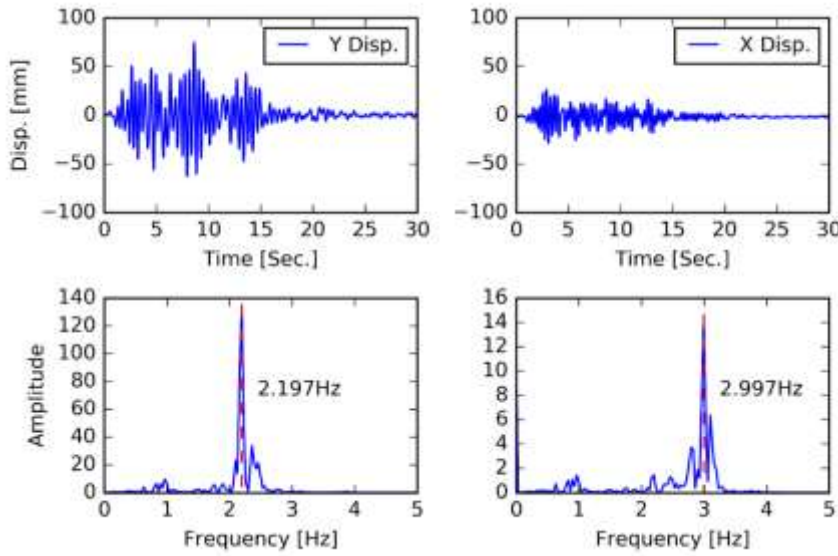
الشكل (5): أشكال أنماط الاهتزاز الثلاث الأساسية للجناح الوسطي C (أعلى) والجناح الشرقي E (أسفل)

الأنماط 1 و 2 و 3 من اليمين إلى اليسار لكلا الجناحين

بمعالجة معطيات الحركة عن طريق تحليلات فورييه ،
وتحويل تجاوب المبنى من المجال الزمني إلى المجال
الترددي تعطي الأشكال الآتية:



الشكل (6): أحد سجلات التسارعات في زلزال كوبية



الشكل (7): الأعلى: تجاوب انتقالات نقطة على سطح المبنى الناتج عن التحريض

الأسفل: الترددات الناتجة عن تحويلات فورييه لانتقالات نفس النقطة

من المجال الزمني إلى المجال الترددي أن قيمة التردد لهذا النمط هي 2.997 Hz، أي باختلاف قيمته 0.57% عن القيمة المستنتجة سابقاً، مما يدل على احتمال عدم حدوث تلدن في الجناح عند اهتزازه بهذا الاتجاه. وذلك متوافق مع القساوة والمقاومة العالية لهذا الجناح بالاتجاه X.

7- النتائج:

- تعدّ طرائق استخلاص المواصفات الديناميكية للمنشآت والمعتمدة على قياس الضجيج المحيط من الطرائق الفعالة والاقتصادية، خصوصاً إذا اقترنت بطرائق تحليلية من أجل تحقيق نتائجها.

من الشكل يستنتج أنه في حالة التحريض بالاتجاه Y وهو اتجاه النمط الأول للجناح E المستنتج سابقاً سينتج لدينا سجل استجابة اهتزاز المبنى لهذا التحريض ذو المطالات الكبيرة نسبياً بالنسبة إلى التحريض بالاتجاه X. مرد ذلك إلى القساوة المنخفضة لهذا المبنى بالاتجاه Y. وإجراء تحويل فورييه لهذا السجل يتبين وجود استجابة ترددية عظيمة عند التردد 2.197 Hz، وهو قريب قريباً جيداً من القيم التي استنتجت سابقاً (أقل بـ 1.9%)، مرد هذا الفرق نحو انخفاض هذا التردد كما يبدو هو حدوث تلدن في بعض عناصر الجناح E عندما يتأثر بزلزال شديد بالاتجاه Y. وذلك على النقيض من التردد الناتج في الجناح E بعد تحريضه بالاتجاه X الموافق لاتجاه النمط الثاني له بحسب ما سبق، ونستنتج بعد إجراء التحويلات

المراجع References

- [1] Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst.*, 30-1, 25-30
- [2] Aki, K. (1993), «Local site effects on weak and strong ground motion», *Tectonophysics*, 218, 93-111.
- [3] Navarro, M., F.J. Sánchez, M. Fetiche, F. Vidal, T. Enomoto, T. Iwatate, I. Matsuda, T. Maeda (2002) Statical estimation for dynamic characteristics of existing buildings in Granada, Spain, using microtremors. *Structural Dynamics, Eurodyn2002, Vol. 1, 807-812, Balkema.*
- [4] Nakamura Y., (2000), Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, 2000.*
- [5] Çelebi M., (2006), Recorded Earthquake Responses from the Integrated Seismic Monitoring Network of the Atwood Building, Anchorage, Alaska, *Earthquake Spectra*, Volume 22, No. 4, pages 847–864, November 2006; DOI: 10.1193/1.2359702.
- [6] Caselles J. O., V. Perez-gracia, R. Franklin, L. G. Pujades, M. Navarro, J. Clapes, J. A. Canas, and F. Garcia, (2010), Applying the H/V Method to Dense Cities. A Case Study of Valencia City, *Journal of Earthquake Engineering*, 14:192–210, 2010.
- [7] Gallipoli M. R., Mucciarelli M. and Vona M., (2008), Empirical estimate of fundamental frequencies and damping for Italian buildings, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* DOI: 10.1002/eqe.878.
- [8] Oliveira C. S. & Navarro M., (2009), Fundamental periods of vibration of RC buildings in Portugal from in-situ experimental and numerical techniques. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Volume 8 Number 3 June 2010.
- [9] S. H. Crandall., (1956), *Engineering Analysis (A Survey of Numerical Procedures)*, McGraw-Hill, New York, Volume 61, Issue 558, p. 428

- تتعدد الطرائق الرقمية المستخدمة في تقدير الخصائص الديناميكية للمنشآت ولكن تظل مسألة حل القيم المميزة فضلاً عن طريقة الـ Modal Testing المصاحبة لمسألة توازن ديناميكي هما الطريقتين الأهم مع امتياز الطريقة الثانية بقدرتها على تقدير المواصفات لمنشآت لا خطية السلوك.
- يجب إضافة التفاصيل المناسبة [قدر الإمكان] عند نمذجة المنشآت رقمياً، وخصوصاً موضوع توزيع الكتل المقدرة (أحمال مبنية وحية)، ودقة حساب مواصفات العناصر الإنشائية للمنشأ، وإمكانية إدخال أثر التسليح، ولا خطية سلوكه.

- Vancouver (BC, Canada), 15 WCEE, Lisboa 2012.
- [19] Atakan K., P.-Y. Bard, F. Kind, B. Moreno, P. Roquette, A. Tenta et SESAME-Team, (2004). J-SESAME: a standerized software solution for the H/V spectral ratio technique. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver,Canada. Paper 2270.
- [20] Al-koussa M., H. T. Hasan, Abdul-wahed M. K., Alarab M., Al-egy I. (2017). Experimental and analytical evaluation of the consolidation of tower 8 in the Damascus citadel, Arab J Geosci Vol. 10:37, DOI 10.1007/s12517-016-2788-9,.
- [21] Ditommaso, R., Mucciarelli, M. & Ponzo, F.C. Bull Earthquake Eng (2012) 10: 895. <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9338-y>
- [22] Ohtani K. *et. al.*, (2004). Construction OF E-Defense (3-D full-scale Earthquake Testing Facility), 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 189.
- [23] ABAQUS, Version6.14 (2014). Abaqus/Standard User's Manual, DASSAULT SYSTÈMES, Simulia Inc.
- [24] Hussam Eldein Zaineh, (2012). Simulation of Near Fault Ground Motion of the Earthquake of November 1759 with magnitude of 7.4 along Serghaya Fault, 15 WCEE, LISBOA 2012.
- [10] Bahram Nour-Omid, Beresford N. Parletts and Robert L. Taylor (1983). Lanczos Versus Subspace Iteration for Solution of Eigenvalue Problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, 859-871
- [11] Anil K. Chopra (2012). Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering, 4th Ed., Pearson Education Inc., Prentice Hall.
- [12] جوزيف أبو حديد (2001)، تقرير فني في سير ودراسة مقاومات البيتون المنفذ منه هيكل مبنى وزارة التعليم بدمشق، وحدة المعمار العربي بجامعة دمشق.
- [13] Navarro, N. and Oliveira M, C.S. (2006), Experimental techniques for assessment of dynamic behavior of buildings, Assessing and managing earthquake risk: Geo-Scientific and Engineering knowledge for earthquake risk mitigation: developments, tools, techniques, Geotechnical and Earthquake Engineering, Oliveira, C. S., Roca, A., Goula, X. (Eds.), Springer.
- [14] Çelebi, M., Sanli, A., Sinclair, M., Gallant, S., and Radulescu, D., (2004). Real-time seismic monitoring needs of a building owner and the solution—A cooperative effort, Earthquake Spectra 19 (1), 1–23.
- [15] Ditommaso R., Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M., (2012). Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time frequency analyses. Bulletin of Earthquake Engineering. DOI: 10.1007/s10518-012-9347-x.
- [16] Cohen L., (1989). Time-frequency distributions - A review. Proc. IEEE, vol. 77, no. 7.
- [17] Ohta, Y., Kagami, H., Goto, N., and Kudo, K. (1978). «Observation of 1 to 5 second microtremors and their application to earthquake engineering. Part I. Comparison with long period accelerations at the Tokachi-Oki earthquake of 1968», Bull Seism. Soc. Am., 68, 767-779.
- [18] Chiauzzi L., Masi A., Mucciarelli M., Cassidy J. F., Kutyn K., Traber J., Ventura C. & Yao F., (2012), Estimate of fundamental period of reinforced concrete buildings: code provisions vs. experimental measures in Victoria and