تقدير الخصائص الديناميكية الإنشائية للبرج التاسع في قلعة دمشق

ميادة الأحمد الكوسا* هالة توفيق حسن**
محمد خير عبد الواحد*** ادموند العجي****

الملخص

تعرضت قلعة دمشق للعديد من الزلازل التاريخية وتركت هذه الزلازل كثيراً من آثار الدمار، إلا أنه لوحظ تركز هـذا الدمار على بعض العناصر الإنشائية دون غيرها، ومن هنا ظهرت الحاجة لدراسة الخصائص الديناميكية لهذا الـصرح التاريخي بغية محاولة تفسير بعض حالات الدمار الذي تركته الزلازل التاريخية مثل زلزال 1759. من المعروف جيداً أن درجة الدمار الزلزالي تعتمد بقوة على الخصائص الديناميكية للأبنية وعلى تضخيم الأمواج الزلزالية. وبسبب ذلـك من الضروري تحليل سلوك الأبنية من قبل تدعيمها أو ترميمها. نظراً إلى أن التجارب المخبريـة لا تناسـب الأبنيـة التاريخية وأن الأعمال الحقلية جميعها يجب أن تنفذ عليها مباشرةً، اختيرت وفُصلتْ طريقة قياسات الضجيج الطبيعـي في هذه الدراسة كونها تقنية لا-إتلافية وأكثر ملاءمة لتحقيق هدف الدراسة. بمراعاة ذلك حللّت الخصائص الديناميكيـة والاستجابة للبرج التاسع في قلعة دمشق استناداً إلى قياسات الضجيج المنفذة على سطح الأرض والطابق العلوي للبرج. وحدد التردد المسيطر وعامل التضخيم ونسبة التخميد بالتحليل الطيفي لتسجيلات الضجيج المحيط.

الكلمات المفتاحية: قلعة دمشق، قياسات الضجيج المحيط، الخصائص الديناميكية للأبنية، سورية.

* مدرس في قسم الهندسة الإنشائية الزلزالية- المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية- جامعة دمشق- سورية.
** أستاذ مساعد في قسم الهندسة الإنشائية - المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية- جامعة دمشق-سورية.
*** مهندس مدير قلعة دمشق- مديرية الآثار والمتاحف – سورية.
**** باحث- هيئة الطاقة الذرية- سورية.

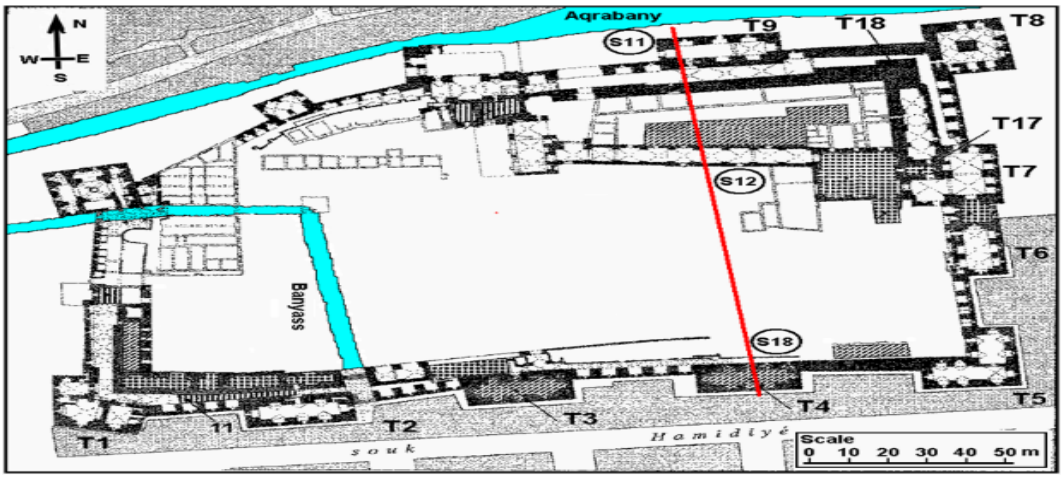
1- المقدمة:

تعد قلعة دمشق من المعالم الأثرية المهمة في مدينة دمشق، وقد تعرضت هذه القلعة للعديد من الزلازل التاريخية التي تركت كثيراً من آثار الدمار إلا أن هذا الدمار تركز على بعض العناصر الإنشائية دون غيرها ومن هنا ظهرت الحاجة لدراسة الخصائص الديناميكية للقلعة بغية محاولة تفسير بعض حالات الدمار الذي تركته الزلازل التاريخية مثل زلزال 1759. في هذا العمل نُفذَتْ تسجيلات للاهتزاز الطبيعي باستخدام مجموعة من اللواقط الأفقية الموزعة في عدة نقاط من البرج 9 فضلاً عن لاقط شاقولي موضوع على القاعدة الصخرية في جواره. هذه التسجيلات ستخضع للمعالجة الرقمية بهدف عرض خصائصها الطيفية وإبراز الخصائص الديناميكية الفعلية لهذا البرج من قلعة دمشق. و نُفذَتْ تسجيلات للاهتزاز الطبيعي في ساحة القلعة وبعض الحفر الاستكشافية بغية دراسة تأثيرات الموقع (Site Effects) وتقدير إمكانية حدوث التجاوب الطنيني بين التربة والبرج التاسع.

2- وصف عام:

بنيت قلعة دمشق في القرن الحادي عشر الميلادي على يد السلاجقة وتقع في الركن الشمالي الغربي من أسوار مدينة دمشق القديمة وسط حوض دمشق. يمر قريباً منها نهر بردى، ومن ثَم فمن المرجح أن تكون الطبقات الجيولوجية تحتها من التوضعات اللحقية لهذا النهر. تتألف القلعة بوضعها الحالي من 13 برجاً تصل بينها جدران سميكة تدعى البدنات. وتحتل القلعة شكلاً شبه مستطيل (الشكل 1). يبلغ طول الضلع الشرقي /165/ م والضلع الجنوبي /240/ م وهما متعامدان. كما يتعامد الضلعان الشرقي والشمالي قبل أن ينحرف الضلع الشمالي على بعد نحو ثلثي الطول الكلي ليلاقي الضلع الغربي وذلك ليتلاءم مع انحراف العائق المائي المجاور (أحد فروع نهر بردى ويسمى العقرباني).

ترك زلزال 1759 كثيراً من الدمار في القسمين الشمالي والغربي من القلعة ولاسيما الجدار الأيوبي والبرج الشمالي شرقي.Invalid source specified.



الشكل (1): مخطط مبسط لقلعة دمشق يوضح أماكن وجود الأبراج وبعض السبور المستخدمة في هذا البحث.

الوضع الجيولوجي:

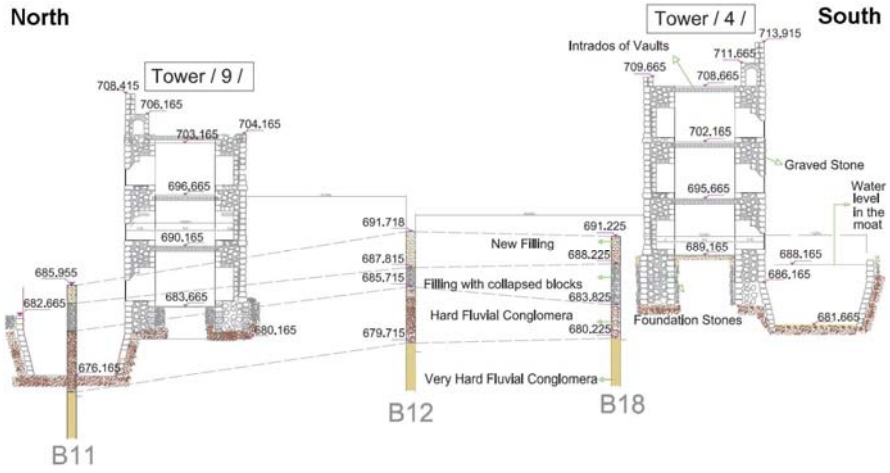
قامت المديرية العامة للآثار والمتاحف في العام 1997 بإنجاز سبور لبابية آلية وأخرى يدوية وصلت الأولى إلى أعماق ناهزت الخمسة وعشرين متراً، والثانية إلى سبعة أمتار عن منسوب بداية السبر، وأظهرت نتائج هذه

السبور والمناسيب الطبوغرافية المنفذة لاحقاً من قبل الإطار الفني في قلعة دمشق الحفائق الآتية (الشكل 2):

1. طبقة عليا راوحت سماكتها بين 1-3 م تمثلت بردميات حديثة تعود إلى القرن 19 على أبعد تقدير.
2. طبقة من الركام والردم الناتج عن انهيار أجزاء من أبراج القلعة وأسوارها إثر زلزالي العامين 1759 و1821، التي امتدت على سماكة تراوح بين 3-4م أسفل الطبقة العليا وتوضعت هذه الانهيارات في خندق القلعة.

وتبين لنا من خلال السبور اليدوية أن هذه الطبقة هي الطبقة الجيولوجية الأولى التي كان يؤسس عليها في مختلف مراحل إنشاء هذا الحصن، وهذه الطبقة كانت تتدرج في الانحدار من الجنوب باتجاه الشمال بفارق منسوب تراوح بين 5-6 أمتار، وكذلك من الغرب باتجاه الشرق، وهذا ما يتوافق وحال المباني الحاضرة الآن، فمن خلال السبر العميق الذي أجريناه أسفل الباب الجانبي للبرج الجنوبي رقم /4/ في الخندق تبين أن نهاية تأسيس جدران هذه الأبراج وهو منسوب قاع الخندق في تلك المنطقة وكان على منسوب /681.665/ عن سطح البحر. وأما منسوب التأسيس للبرج التاسع على الجهة الشمالية فكان /676.165/ وهو ما يؤكد هذه الفرضية. غير أن السبر الآلي المنجز قرب الرواق الشمالي الداخلي تكشف عن سوية ظهور هذه الطبقة على المنسوب ذاته في الجهة الجنوبية مما يشير إلى أن هذه الطبقة امتدت بشكل أفقي حتى هذه المنطقة ومن ثم أخذت تنحدر بشدة باتجاه الشمال.

4. طبقة جيولوجية ثانية تألفت من حصويات نهرية وغضار متماسك جداً تمتد عميقاً تحت الطبقة أعلاه التي لم تصلها أعمال الإنشاء.

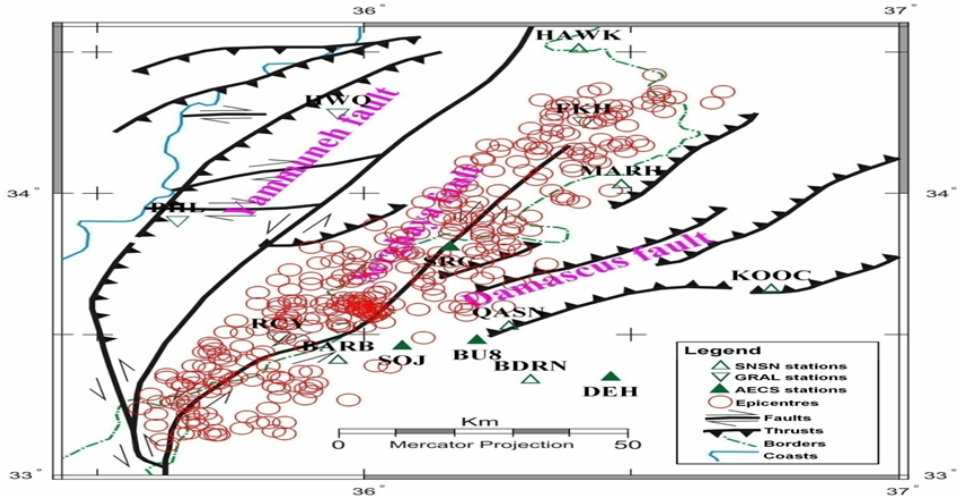


الشكل (2): نتائج بعض السبور المحفورة وموقعها بالنسبة إلى الأبراج (المديرية العامة للآثار والمتاحف، 1997).

الوضع الزلزالي:

بينت البحوث الزلزالية الحديثة أن النشاط الزلزالي في القطر العربي السوري يمر حالياً بمرحلة هدوء نسبي مقارنة بالنشاط الزلزالي التاريخي، فلم تحدث في القرن العشرين هزات أرضية ذات قدر أكبر من 7.0 أو شدة زلزالية أكبر من 9.0 يخالف هذا الواقع ما حدث في الماضي وما أوردته المصادر التاريخية عن تعرض منطقة شرق المتوسط للعديد من الزلازل المدمرة [1، 2005]، ويمكن الاستنتاج أن هذا الهدوء النسبي مؤقت وقد يكون تهيئة لحدوث زلزال [2,2012]. أدى زلزال 1759 في مدينة دمشق إلى دمار كثير من الأبنية ومنها قلعة دمشق. أظهرت نتائج التحريات الزلزالية المنفذة على صدع سرغايا أن الصدع نشط بمعدل إزاحة (1.4mm/year) وأن آخر الأحداث الزلزالية قد تضمن

إزاحة جانبية يسارية بمقدار 2-2.5 م الذي ولد زلـزال 1759 الموثق تاريخياً. أشارت دراسة النشاط الزلزالي لصدع سرغايا خلال الـسنوات 1995-2009 أن هـذا الصدع يمر حالياً بمرحلة من الهدوء الزلزالـي النـسبي سواء من حيث عدد الهزات (نحو 25 هـزة صـغيرة)، وسواء من حيث القـدر (أصـغر مـن 3.5 ريختـر) [2,2012]. إن وقوع بعض الحوادث الزلزالية، كزلزال العقبة 1995، وزلزال البحر الميت 2004 ومع بعـدها عن مدينة دمشق قد أدت جميعها إلى حدوث اهتزاز فـي أبنية مدينة دمشق. مما يؤكد وجـود ظـاهرة التـضخيم المحلي في مدينة دمشق، وإلى وجود استجابة زلزالية في الأبنية من جهة أخـرى. إذْ ظهـرت الحاجـة لتقـدير الخصائص الديناميكية الفعلية للأبنية عموماً في دمـشق، ومنها قلعة دمشق موضوع بحثنـا لأن معرفـة مجـال تجاوب الطنين (Resonance response) بين تردد للبناء وتردد طبقات التربة التأسيس له أهمية في التقدير المبكر للدمار الزلزالي الممكن أن يتعرض له البناء.



الشكل (3): التوزع الجغرافي للبؤر الزلزالية حول صدع سرغايا خلال السنوات 1995-2009.

3- مبررات البحث وهدفه:

ظهرت الحاجة لدراسة الخصائص الديناميكيـة للقلعـة بتطبيق إحدى الطرائق التجريبية الفعالة وهـي تـسجيل الاهتزاز الطبيعي. لأن من الصعب في البلدان الهادئـة زلزالياً مثل سورية تنفيذ تسجيلات لاهتزاز الأبنية تحت تأثير الحركة الزلزالية ومن غير المعقول تنفيذ تفجيرات اختبارية في المدن والمناطق المأهولة ويحتاج الاهتـزاز القسري إلى توافر آليات خاصة غير متاحة حاليـاً فـي بلدنا. فضلاً عما سبق فإن التجارب المخبرية لا تناسـب الأبنية التاريخية لاحتمال تعرضها للتلـف أو التـشويه. ونظراً إلى أن الأعمال الحقلية جميعها يجب أن تنفذ أبنية القلعة مباشرةً، فقد اختيرت وفُـضلتْ طريقـة تـسجيل الضجيج الطبيعي في هذه الدراسة كونها تقنية لا-إتلافيه وأكثر ملاءمةً لتحقيق هدف الدراسـة. تمتـاز طريقـة تسجيل الضجيج الطبيعي والمـسماة طريقـة ناكـامورا [3,1989] بأنها وسيلة سريعة واقتصادية وذات كفـاءة. تختلف في كثير من الأحيـان الخـصائص الديناميكيـة للأبنية الفعلية مثل الدور الطبيعي عن تلك التي تتنبأ بهـا العلاقات التحليلية التي يستخدمها المهندسون الإنـشائيون وتستخدمها معظم برمجيات النمذجة الرقمية، ويعود هذا الاختلاف إلى أسباب متعددة منها عدم مطابقة مواصفات البناء لما هو محدد نظرياً في التصاميم الهندسية؛ لـذلك لابد من تحديد الخصائص الديناميكية الفعليـة باسـتخدام الطرائق التجريبية وصولاً إلى معرفة السلوك الحقيقـي

للبناء في مواجهة الزلازل. توفر دراسة الخصائص الديناميكية لقلعة دمشق إمكانية مقارنتها بآثار الدمار الذي خلفته الزلازل التاريخية السابقة في تلك القلعة.

هدفَ البحث إلى تقدير الخصائص الديناميكية الفعلية (**Real Dynamic Properties**) للبرج التاسع في قلعة دمشق باستخدام طريقة الضجيج الطبيعي (**Micro tremors**) ويشمل ذلك: تقدير الدور الطبيعي (**Natural period**) ومعامل التضخيم (**Amplification factor**) ومعامل التخميد (**Damping coefficient**).

4- الدراسة المرجعية:

إن لطبيعة الموقع (**Site effect**) تأثيراً ملحوظاً في توزع الضرر في أثناء حدوث الزلازل، فقد وجد أن الطبقات الرسوبية السطحية تقوم بتضخيم سعة الحركة الزلزالية عند دور محدد يتعلق بسماكة هذه الطبقات وخصائصها الفيزيائية، مثل سرعة الموجة القصية والكثافة [4,1993]. أظهرت العديد من الزلازل كزلزالي (**Caracas1967**) و(**Mexico_City1985**) أن الضرر الذي أصاب المباني والمنشآت قد ازداد عندما كان الدور الطبيعي للمبنى قريباً من الدور الطبيعي للطبقات الرسوبية المشادة عليها. لدى دراسة الاستجابة الزلزالية للأبنية، وجد أن خصائصها الديناميكية مثل الدور الطبيعي ومعامل التخميد تتحكم في ردة فعل هذه الأبنية في مواجهة الزلازل. وقد طورت عدة طرائق تجريبية لتقدير هذه الخصائص الديناميكية للأبنية [5,2006] واستخدمت فيها عدة مصادر لإثارة الاهتزاز في البناء مثل الزلازل والتفجيرات الاختيارية والاهتزاز القسري والضجيج الطبيعي في موقع البناء المعروف باسم (**Microtremors**).

موثوقية طريقة ناكامورا:

أكدت العديد من التجارب مدى استقرار هذه الطريقة وارتباط ذروة النسبة الطيفية (**H/V**) بتردد الطنين الأساسي في مواقع التربة الرخوة. اختبر عدد كبير من الباحثين طريقة ناكامورا ووضعوا المعايير الناظمة وشروط التطبيق ومدى موثوقية نتائجها نذكر منهم [6,2004] و[7,2003] فقام[8,2004] وزملاؤه مثل [9,2004] بدراسة منهجية للعوامل المؤثرة في هذه الطريقة من خلال المشروع الأوربي (**SESAME: Site Effects**) لتقدير الاستجابة الزلزالية للموقع باستخدام التحريض الذي يولده الضجيج المحيط بالموقع، وقد سمحت هذه الدراسة بتحري موثوقية طريقة النسبة الطيفية وفق ناكامورا وتأثير الشروط التجريبية ومعاملات طرائق المعالجة اللاحقة، وأعطت نتائج مهمة تسمح بإعطاء موثوقية عالية لهذه الطريقة.

التطبيق على الأبنية الأثرية:

قام ناكامورا بتطبيق طريقته لتحديد الخصائص الديناميكية لبرج بيزا المائل (**Leaning Tower of Pisa**) وأثبت أن طريقة الضجيج المحيط هي أداة مفيدة في تحديد تلك الخصائص [33,1999]، كما لاحظ أن طريقة الضجيج المحيط تتميز بأنها لا تسبب أي ضرر أو تشوه في الأبنية الأثرية إذْ تعد من الاختبارات غير الإتلافية (**non_destructive test**). قام [11,2008] باستخدامها لتقصي الخصائص الديناميكية لعدة مبانٍ حديثة وتاريخية (مثل أية صوفيا ومسجد السليمانية) في اسطنبول قبل زلزال (**Kocaeli Earthquake 1999, Mw7.6**) فلاحظ حدوث تغيرات في تلك الخصائص عندما كرر تلك التسجيلات بعد هذا الزلزال وذلك لحدوث أضرار زلزالية في تلك الأبنية.

طبق [12,2011] هذه الطريقة لدراسة قلعة عمان ولموقع جبل القلعة وذلك لتقدير تأثير الموقع، ودرس تسجيلات هيكلية في المستوى الأعلى للقلعة لتقدير خصائصها الديناميكية وللحصول على أنماط الاهتزاز الرئيسة بالاتجاه الطولي والعرضي. بينت الدراسة أن الأجزاء

المتضررة من قلعة عمان بالزلازل التاريخية قد تـضررت نتيجة لتأثير الخصائص الطبوغرافية والجيولوجية لمحـدب جبل القلعة التي عملت على تضخيم شدة الزلزال.

5- تقنيات معالجة التسجيلات:

شكلت تحويلات فورييه إحدى التقنيات الأكثر استعمالاً في تقدير الخصائص الديناميكية للأبنية والمنشآت عند تعرضها للحركة الزلزالية عبر حـساب الأطيـاف الـسعوية مـن التسجيلات المنفذة في تلك الأبنية، لكنها تخضع لفرضـية جوهرية وهي استقرار (**stationarity**) الإشارة المحللـة، وهذا يحد من تطبيقها على الإشارة الزلزالية التي تعد إشارة عابرة ومؤقتة (**transient**) فضلاً عن ذلك فإن الخصائص الديناميكية للبناء متغيرة مع الزمن ويعود ذلك إلى الـسلوك اللاخطي للبناء وإلى التفاعل الديناميكي بين البناء والتربـة التي تحته وتأثر هذا البناء بالحركـة الاهتزازيـة للأبنيـة المجـاورة [13,1989]. إن دراسـة التطـور الزمنـي للخصائص الديناميكية لنظام ما قد تمـت سـابقاً بطريقـة تقريبية، وذلك بالافتراض أن اهتزازها مستقر. يمكن تحت هذه الفرضية تطبيق تحويلات فورييه المعطـاة بالعلاقـة الآتية:

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

إذْ: **h(t)** هي الإشارة الزلزالية في المجال الزمني.

(f) التردد ب هرتز

يمكن الحصول على نتائج مرضية بتطبيق تحويلات فورييه على الأجزاء المستقرة من التسجيلات واسـتبعاد الأجـزاء غير المستقرة [14,1994]. إن تطبيق تحـويلات فورييـه على إشارة غير مستقرة سيزودنا فقط بوسطي محسوب لكل سعة طيفية على كامل الإشارة، ومن ثَم سنخسر المعلومات التفصيلية عن التغيرات الطيفيـة اللحظيـة أي التغييـرات اللحظية للسلوك الديناميكي. أمكـن التغلـب علـى هـذه المحدودية باستخدام تحويل فورييه قصير الأمـد (**Short Time Fourier Transform (STFT)**) إذْ تُقَـسم الإشـارة المسجلة إلى نوافذ زمنية قصيرة تطبق عليهـا تحـويلات فورييه، كل على حدة. ضبط عرض هذه النوافذ الزمنيـة تبعاً للتردد الأصغري المراد دراسته وبما يتوافق مع الدقـة المطلوبة في مجالي الزمن والتـردد [15,2012]. يـسمح التحويل (**STFT**) بمعرفة التغييرات الزمنيـة للخـصائص الطيفية في الإشارة المسجلة، ويعرف هذا التحويل بالـشكل الآتي:

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

إذْ تعبر **w(t-τ)** عن نافذة زمنية متحركة ذات عرض زمني (**τ**) ويفترض أن الإشارة المسجلة مستقرة ضمن هذه النافذة الزمنية. يجب أن يخْتَار عرض النافذة الزمنية بعناية لأنـه 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 منخفـضة. بالمقابل إذا كان عرض النافذة كبيراً جداً حصلنا على دقـة منخفضة في المجال الزمني. أما فـي المجـال التـرددي فستكون الدقة جيدة. يمكن عـرض الأطيـاف المحـسوبة بتابعية الزمن وهو مـا يعـرف بعـرض الـسبكتروغرام (**Spectrogram**)؛ وذلك بهدف عرض التغييرات الزمنيـة للأطياف. كما يمكن عرض الأطياف المحسوبة متراكبـةً 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 الأفقيـة والشاقولية. فقد أشار [16,1998] إلى أن هذه التقنية يمكن أن تزودنا بالتردد الأساسي للبناء بأخذ النسبة بـين طيـف فورييه السعوي للمركبات الأفقية والشاقولية المسجلتين في أعلى البناء. بحسب هذه التقنية فإن تردد الاهتـزاز للـنمط الأساسي للبناء يوافق تردد السعة العظمى للنسبة الطيفيـة. قام (**Chiauzzi et. al., 2012**) بتطبيق هـذه التقنيـة علـى

تسجيلات الضجيج المنفذة في عدد من الأبنية بأخذ وسطي النسبة الطيفية لعدد من النوافذ الزمنية القصيرة، وكانت هذه النوافذ غير متراكبة وطول كل منها 30 ثانية. أعطى هـذا التطبيق نتائج متوافقة مع تقنيات أخرى.

أما بالنسبة إلى تقدير معامل التخميد بـالطرائق التجريبيـة فتتوافر عدة طرائق [5,2006] نذكر منها: طريقة تلاشـي الاهتزاز الحر (**Free-vibration Decay method**)، وطريقة منحنى طيـف الاسـتجابة (**frequency-response curve**) وطريقة ضياع الطاقة بالـدورة (**Energy Loss per cycle method**). يمكن تطبيق طريقة منحنى طيـف الاسـتجابة بتقنية عـرض حزمـة نـصف الطاقـة (**Half-power bandwidth**) بحسب العلاقة الآتية [37,2006]:

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

إذْ يمثل ξ معامل تخميد البناء، **f1,f2** هما الترددان الموافقان لسعة تعادل 70% من سعة تردد الطنين ومجاوران مباشرة لهذا التردد.

6- الأجهزة المستخدمة وبرنامج المعالجة:

أُستخدم لتنفيذ تسجيلات الاهتزاز الطبيعي في قلعة دمـشق نظام مراقبة اهتزازي مكون من جهاز التسجيل من الطراز (**Baladin 24 bit**)، ومجموعة مـن اللـواقط [17,2014]. يسمح هذا الجهاز باستخدام 6 لواقط للتسجيل، وقد كانـت هذه اللواقط وحيدة المركبـة (**monoaxial**) مـن الطـراز (**Sercel Model L-4**) وترددها الذاتي 1 هرتز. كان أحـد اللواقط الستة شاقولياً واستخدمنا لترميزه الحرف (V)، أمـا بقية اللواقط فهي أفقية، واستخدمنا لترميزها الحـرف (H) مع رقم متسلسل من 1 إلى 5، فمـثلاً (H5) يرمـز إلـى اللاقط الأفقي الخامس. حولت التسجيلات إلى الشكل الرقمي بسرعة تقطيع 100 عينة/الثانية. أُجري اختبار أولي لعمل هذه اللواقط في المكتب قبل استخدامها في تنفيذ التسجيلات الفعلية وللتأكد من تماثل خواصها من خلال وضـعها فـي مكان واحد ومقارنة تسجيلاتها ببعضها بعضاً (الـشكل 5).

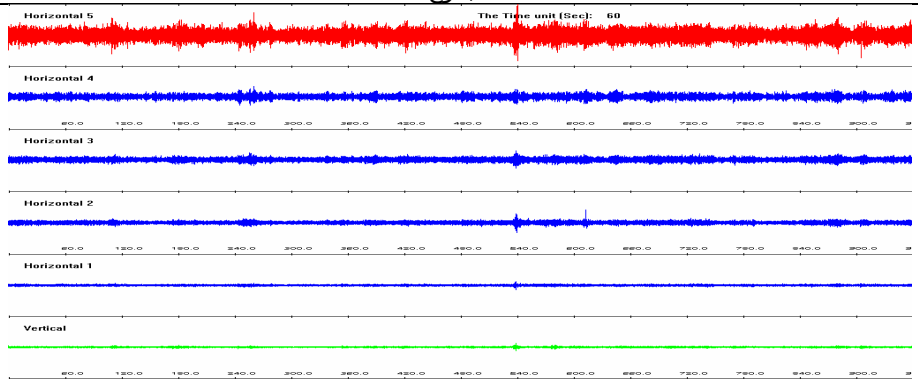
ستجري بمعالجة تسجيلات نظـام المراقبـة الاهتـزازي باستخدام برنـامج (**BuldRes.exe**) لمؤلفـه [18,2013]، ويهدف هذا البرنامج إلى القيام بمعالجة التسجيلات الرقمية باستخدام طرائق معروفة عالمياً مثل (تحـويلات فوريـيـه **Fourier Transforms** وحـسـاب الأطيـاف **Spectra** والتصفية الرقمية **Digital Filtering** والثني **Convolution** والارتباط المتصالب **Cross correlation** والارتباط الذاتي **Auto Correlation** وغيرهـا ...) وكـذلك لتطبيـق التصحيحات اللازمة بهدف تحسين نوعية التسجيل وأخـذ مواصفات نظام التسجيل بالحسبان. ويسمح هذا البرنـامج بالحصول على الخصائص الديناميكية للأبنية مـن خـلال حساب الأطياف والنسب الطيفية في نوافـذ زمنيـة مـن التسجيل تُخْتَار بحيث يكون التسجيل مستقراً. يقوم البرنامج بعرض النتائج بيانياً ورقمياً ويزود المـستخدم بالمعالجـة الإحصائية بهدف تقييم جودة النتائج. يمكن إجراء المعالجة الآلية لكامل التسجيل الرقمي وإعطاء النتائج التفصيلية لكل نافذة على حدة، وهذا يسمح باستبعاد النوافذ التـي أعطـت نتائج شاذة وتحسين جودة النتائج.

7- التسجيلات:

نُفذَتْ مجموعة من التسجيلات للاهتزاز الطبيعي في ساحة القلعة والبرج التاسع (الشكل 1). حفظت التـسجيلات فـي ملفات رقمية وفق النمط (**cma**). أُعتمد في تكوين أسـماء تلك الملفات على المعطيات: اسم محطة التسجيل وتـاريخ التسجيل وزمنه. أما مدة التسجيل فكانت وسطياً نحو الربع ساعة وهي تسمح بتحري ترددات تراوح من 0.001 إلـى 50 هرتزاً. المجموع الإجمالي للتسجيلات المنفذة هو 148 دقيقة، أي نحو 2.5 ساعة. ويمكن تلخيص بعض خصائص هذه التسجيلات بالجدول (1). يعرض (الشكل 4) مثالاً عن التسجيلات المنفذة.

الجدول (1): تلخيص لأهم خصائص التسجيلات المنفذة في قلعة دمشق.

التسجيل	اسم الملف	المكان	توجيه اللواقط	المدة min.
1	**STATION6 2014-06-16 13.03.12.gd.cma**	الحفر الاستكشافية (GN1, 2)	أفقية	32
2	**STATION6 2014-06-17 11.33.46.gd.cma**	ساحة القلعة	غرب	16
3	**STATION6 2014-06-17 12.06.16.gd.cma**	ساحة القلعة	شمال	16
4	**STATION6 2014-06-18 11.05.10.gd.cma**	البرج التاسع (T9)	غرب	20
5	**STATION6 2014-06-18 11.31.19.gd.cma**	البرج التاسع (T9)	شمال	20
6	**STATION6 2014-06-18 13.20.45.gd.cma**	الحفر الاستكشافية (GN1, 2)	أفقية	24
	المجموع			148



الشكل (4): مثال عن التسجيلات المنفذة. يمثل اللون الأخضر في الأسفل تسجيل اللاقط الشاقولي (Vertical) الموضوع ع لى صخر الأساس أما اللون الأحمر فيمثل تسجيل اللاقط الأفقي (Horizontal 5) الموضوع في أعلى البرج ونلاحظ حدوث زيادة في سعة الاهتزاز مقارنة باللاقط الشاقولي.

8- معالجة التسجيلات:

عولجت التسجيلات باستخدام برنامج (BuldRes.exe [18,2013])، وذلك بهدف الحصول على الخصائص الديناميكية للأبنية من خلال حساب الأطياف والنسب الطيفية في نوافذ زمنية اختيرت في الأجزاء المستقرة من التسجيلات. حسبت الأطياف في استخدام نوافذ زمنية مدة كل منها 30 ثانية وهذا يسمح بتحري ترددات تراوح من 0.03 إلى 50 هرتزاً. وصقلت الأطياف المحسوبة باستخدام طريقة (Hanning). سمح طول التسجيل بحساب تلك الأطياف بعدد كبير من النوافذ (لا يقل عن 25 نافذة زمنية) ومن ثَم فإن الأطياف الوسطية ستكون أكثر تعبيراً عن الخصائص الفعلية لتلك التسجيلات والمستقرة زمنياً من جهة وأقل تأثراً بمصادر التشويش الطارئة، كعبور آلية ثقيلة مثلاً، من جهة أخرى. عرضتْ في هذا البحث أطياف النوافذ الزمنية المحسوبة جميعها من كل تسجيل ثم عرضتْ الأطياف الوسطية على المقياسين العادي واللوغارتمي بهدف إبراز خصائصها جميعها. كما عرضتْ النسب الطيفية الوسطية لتقدير معامل التضخيم.

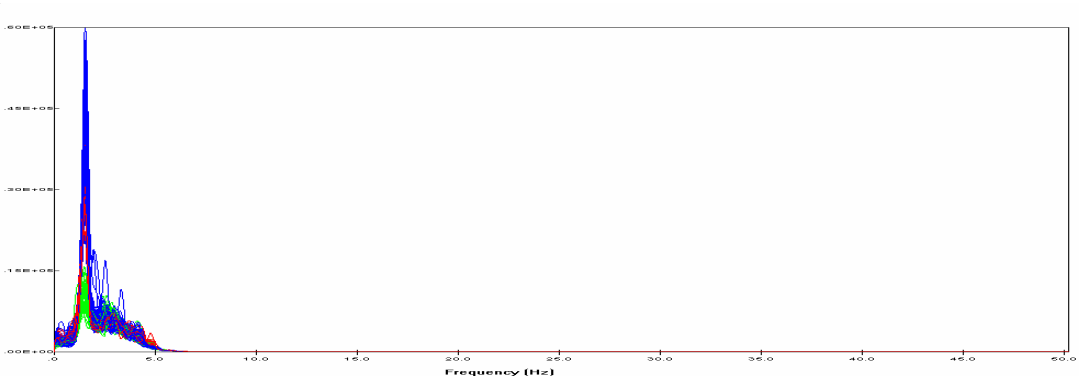
أولاً. تسجيلات تأثير الموقع:

بهدف تقدير تأثير الموقع قمنا بتنفيذ عدة تسجيلات في ساحة القلعة وبعض الحفر الاستكشافية. اكتفينا في هذا البحث بعرض التسجيلين الثاني والثالث المنفذين في ساحة القلعة لتماثلهما مع تسجيلات الحفر الاستكشافية. بخصوص ساحة القلعة فهي المساحة الفارغة حالياً من قلعة دمشق الواقعة ضمن الأسوار الأيوبية وتحتوي على الخصائص الديناميكية للأبنية من خلال حساب الأطياف والنسب الطيفية في نوافذ زمنية اختيرت في الأجزاء المستقرة من التسجيلات. حسبت في بعض المباني مثل الرواق الشمالي الكبير والمبنى العثماني فضلاً عن مساحة خضراء قبالة المكاتب الإدارية. وهذه الساحة معبدة حالياً وذات شكل مستطيل محوره

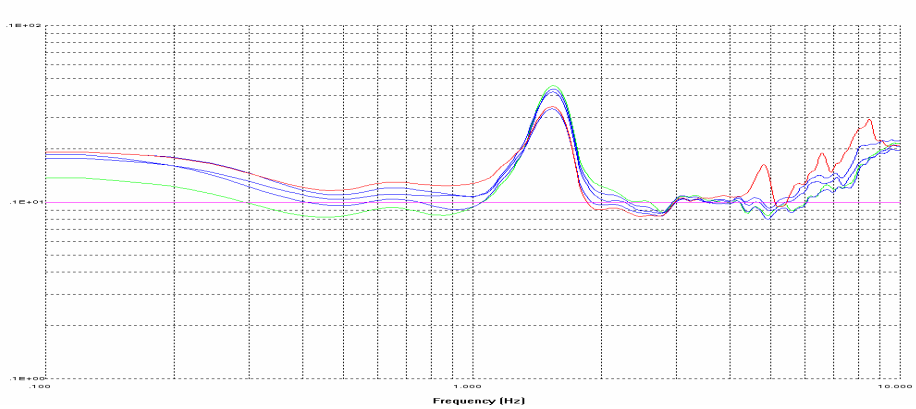
الطولي يمتد بالاتجاه شرق غرب ويبلغ نحـو 225م، أمـا المحور العرضي فيبلغ 113م تقريباً. تحوي هذه الـساحة على بعض الأشجار المرتفعة وأعمدة الإنارة التي حاولنـا الابتعاد عنها -قدر المـستطاع- لتجنـب تأثيرهـا فـي التسجيلات. يرتفع منسوب الساحة في أيامنا هذه قرابة (3م) عن منسوبها الأصلي إبان استخدام القلعة كحصن عسكري حتى نهاية المرحلة المملوكية، ويكتسي جزء كبيـر مـن سطحها حالياً بطبقة من الاسفلت. أما الحفـر الاستكـشافية المستخدمة في تنفيذ التسجيلات فتقع بين السور الخـارجي الأيوبي والسور الداخلي السلجوقي. كالحفرة (GN2) التـي تقع قرب البرج التاسع (T9) ويصل عمقها إلى ستة أمتـار ولا تظهر فيها تلك الطبقة المتماسكة، وهي حفرة استكشافية منفذة عند الزاوية الجنوبية الشرقية للبرج التاسـع بهـدف الكشف عن شكل التأسيس وعمقه لهذا البرج وتبلغ أبعادهـا (3×4م) إذْ كُشفَ عن أساسات البدنة الشمالية من الـداخل وكذلك أساسات البرج وتبين أن منسوب تأسيس البدنة يقـع على عمق يقارب 3م من الأرض الحالية في حين يقع عمق التأسيس للبرج على عمق قرابة (6م) من الأرض الحالية، ويأخذ أساس البرج منحى التدرج البسيط مع الميلان بزاوية لا تتجاوز 10° عن الشاقول الناظم لواجهاته العلوية.

التسجيل الثاني:

نُفذ هذا التسجيل يوم 2014/06/17 الساعة 11:33 حيـث وزعت اللواقط الأفقية على بروفيل يمتد من شرق سـاحة القلعة إلى غربها بتباعد نحو عشرة أمتار ووضع اللاقـط الشاقولي في وسط هذا البروفيل. سمح التسجيل التاسع فـي حساب الأطياف في 29 نافذة التي أظهـرت بوضـوح أن التردد السائد في موقع القلعة نحو 1.5 هرتز كما أظهـرت النسبة الطيفية المحسوبة من وسطي الأطياف وجود تضخيم للاهتزازات نحو 4-5 مرات.



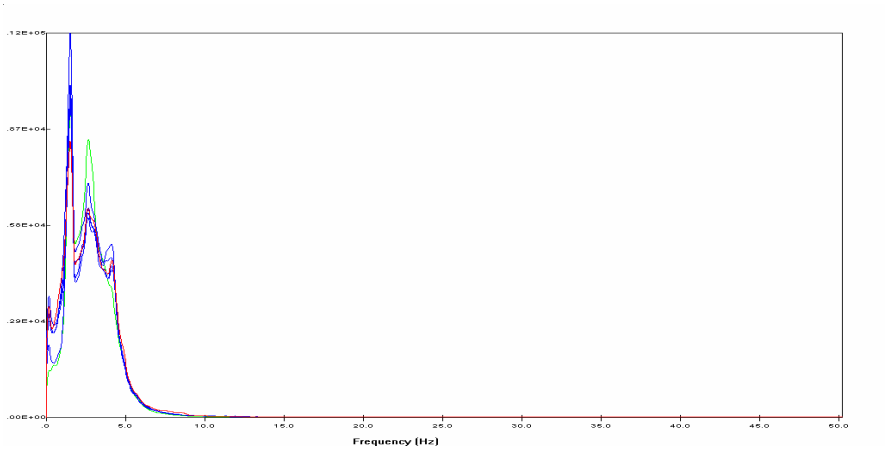
الشكل (R2-1): الأطياف المحسوبة في 29 نافذة من التسجيل التاسع معروضة على المقياس العادي.



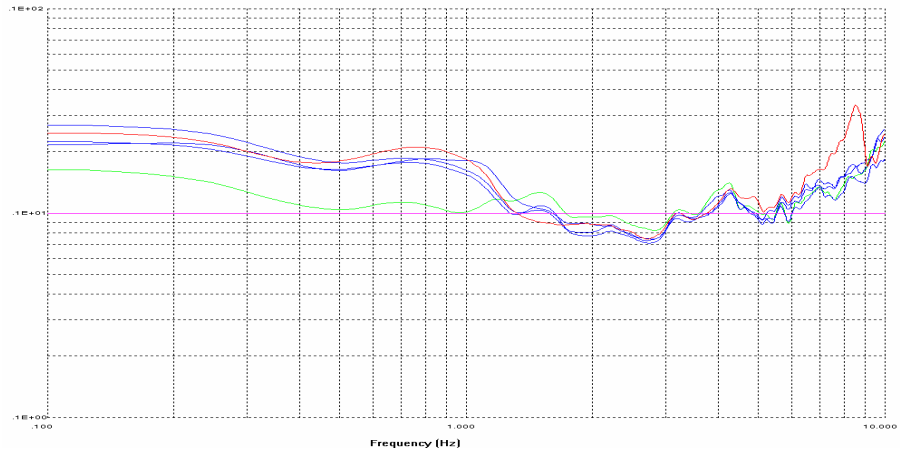
الشكل (R2-5): النسب الطيفية الوسطية للأطياف المحسوبة في 29 نافذة من التسجيل التاسع معروضة على المقياس اللوغارتمي

التسجيل الثالث:

هذا التسجيل يوم 2014/06/17 الساعة 12:06 حيـث وزعت اللواقط الأفقية على بروفيل التسجيل الثاني نفسه ولكنها وجهت نحو الشمال. سمح التسجيل الثالث بحساب الأطياف في 29 نافذة التي أظهرت بوضوح أن التـردد السائد في موقع القلعة نحو 1.5 هرتز لكن النسبة الطيفية المحسوبة من وسطي الأطياف أظهـرت عـدم وجـود تضخيم للاهتزازات في الاتجاه شمال-جنوب كمـا فـي الشكل (R3-4).



الشكل (R3-2): وسطي الأطياف المحسوبة في 29 نافذة من التسجيل الثالث (بالمقياس العادي).



الشكل (R3-4): النسب الطيفية الوسطية للأطياف المحسوبة في 29 نافذة من التسجيل الثالث معروضة على المقياس اللوغارتمي.

الجدول (2): تلخيص لنتائج التسجيلات المنفذة في ساحة القلعة ومقارنة بين الاتجاهين: شرق-غرب وشمال-جنوب

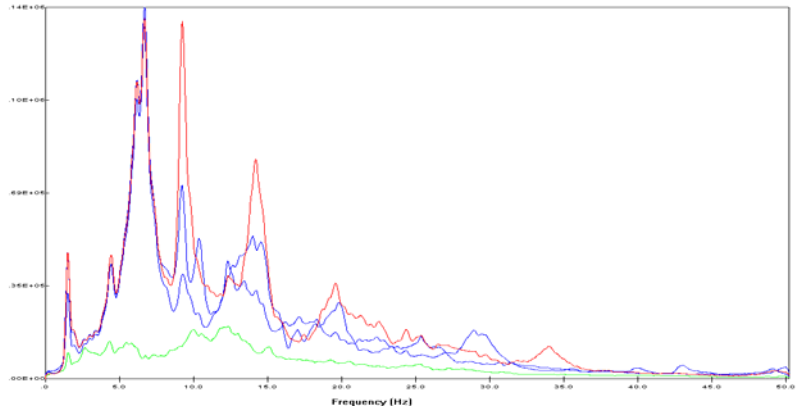
Sensor	Dominant Freq. (Hz)		Damping ratio (%)		Amplification		Freq. of Amplification (Hz)	
	West	North	West	North	West	North	West	North
H1	1.54	1.51	6.3	9.6	4.86	-	1.53	-
H2	1.54	1.51	6.3	10.5	4.66	-	1.53	-
H3	1.51	1.51	7.2	9.6	3.59	-	1.53	-
H4	1.54	1.51	7.2	14.2	4.48	-	1.53	-
H5	1.51	1.51	7.2	15	3.72	-	1.53	-
Average	1.53	1.51	6.84	11.78	4.26		1.53	

ثالثاً. تسجيلات البرج التاسع (*T9*):

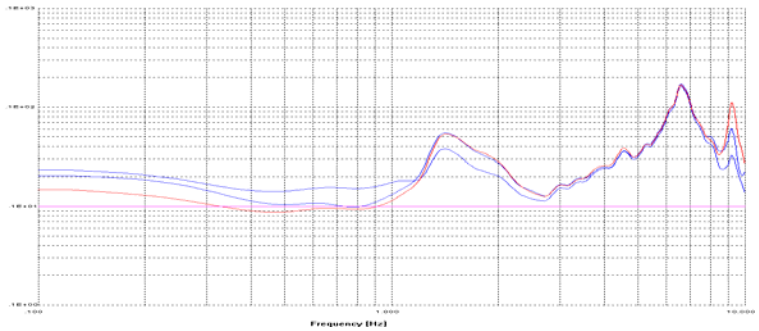
هو أحد أبراج الضلع الشمالي للقلعة ويقع إلى القرب من برج الزاوية الشمالية الشرقية رقم (8)، يأخذ المقطع الأفقي لهذا البرج شكل مستطيل أبعاده (13.5 ×31) ومتطاول بالاتجاه شرق-غرب والارتفاع المحفوظ منه يبلغ (12م). حفظت سويتان فقط من البرج: طابقان الأرضي وثلث أرضية الطابق الأول، في حين اختفى طابقه الثاني وطبقتا السطح المكشوف، وذلك نتيجة تعرضه للانهيارات المتكررة جراء الزلازل التي مرت بتاريخ قلعة دمشق. استخدمنا في دراسة هذا البرج ثلاثة لواقط أفقية(**H3, H4, H5**)، وقمنا بتوزيعها على سقف البرج وفق المحور الطولي. أما اللاقط الشاقولي (**V**) المستخدم في حساب النسب الطيفية فقد وضع في الحفرة الاستكشافية (**GN1**) فوق صخر الأساس. نُفذَ تسجلان في من التذكير أن خصائص موقع البرج قد من هذا البرج وهما التسجيل الرابع والتسجيل الخامس، ولابد خلال تسجيلات اللاقط (**H5**) في التسجيل الأول التي أظهرت وجود تضخيم بالموقع مقداره 5.2 عند التردد 1.49 هرتزاً.

التسجيل الرابع:

نُفذ هذا التسجيل يوم 2014/6/18 الساعة 11:05 وكان توجيه اللواقط الأفقية الثلاثة (**H3, H4, H5**) نحو الغرب. وقد سمحت مدة التسجيل بحساب الأطياف في 38 نافذة زمنية، كما هو مبين في الشكل (R4-2) أظهرت الأطياف أن التردد الطبيعي للبرج (**T9**) في الاتجاه شرق-غرب يبلغ نحو (**T=0.15 Sec**) **6.69 Hz**، وأظهرت النسب الطيفية المحسوبة من وسطي الأطياف أن التضخيم الأعظمي بلغ نحو17 ضعفاً في أعلى البرج عند **التردد 6.61 Hz**.



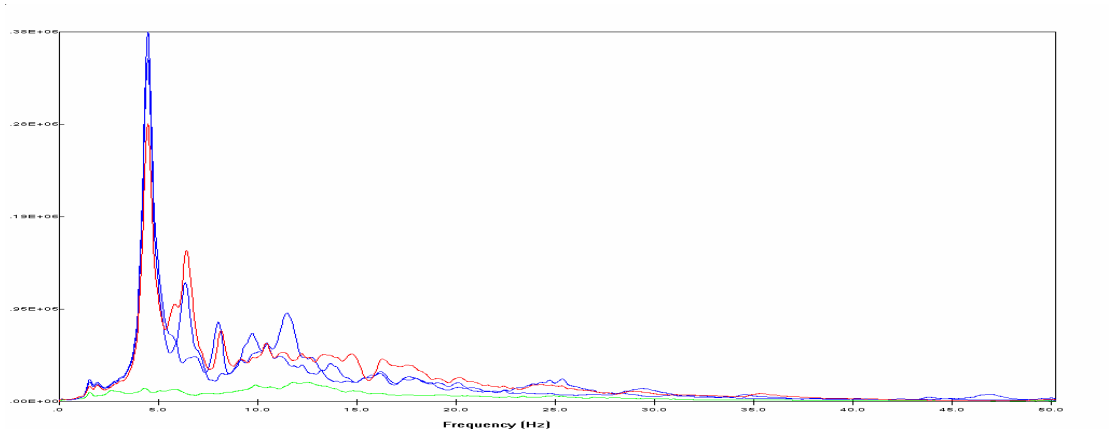
الشكل (R4-2): وسطي الأطياف المحسوبة في 38 نافذة من التسجيل الرابع معروضة على المقياس العادي.



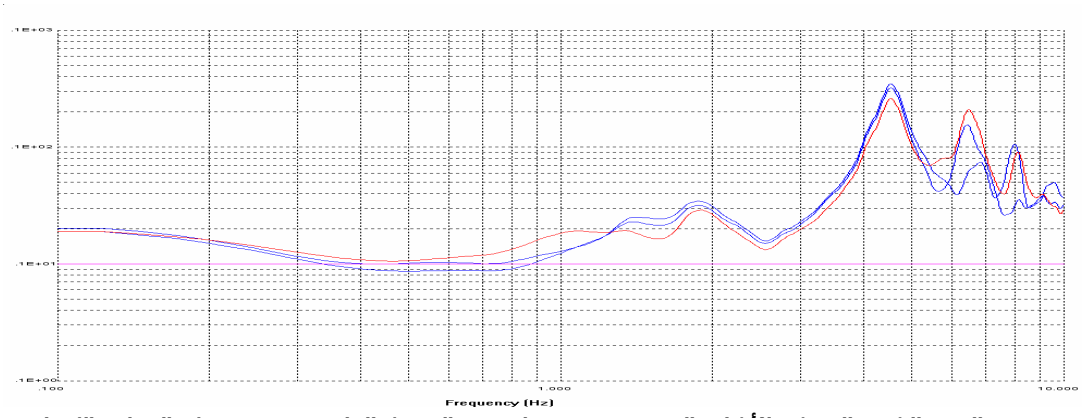
الشكل (R4-6): النسب الطيفية الوسطية للأطياف المحسوبة في 38 نافذة من التسجيل الرابع معروضة على المقياس اللوغارتمي.

التسجيل الخامس:

نُفذ هذا التسجيل يوم 2014/6/18 الساعة 11:31 وكان توجيه اللواقط الأفقية الثلاثة (**H3, H4, H5**) نحو الشمال. وقد سمحت مدة التسجيل بحساب الأطياف في 39 نافـذة زمنية. أظهرت الأطياف أن التردد الطبيعي للبرج (**T9**) في الاتجاه شمال-جنوب يبلغ نحو 4.47 هرتزاً (**T=0.23 Sec**). كما أظهرت النسب الطيفية المحسوبة من وسطي الأطياف أن التضخيم الأعظمي يبلغ نحو **32** ضعفاً فـي أعلى البرج عند التردد 4.47 هرتزاً، كما هو مبين فـي الشكل (**R5-6**).



الشكل (R5-2): وسطي الأطياف المحسوبة في 39 نافذة من التسجيل الخامس معروضة على المقياس العادي.



الشكل (R5-6): النسب الطيفية الوسطية للأطياف المحسوبة في 39 نافذة من التسجيل الخامس معروضة على المقياس اللوغارتمي.

كما يبين الجدول (3)، قيم معاملات التضخيم ونسبة التخامد للتسجيلات كلّها في البرج (9).

الجدول (3): تلخيص لنتائج التسجيلات المنفذة في البرج التاسع (T9) ومقارنة بين الاتجاهين: شرق-غرب وشمال-جنوب

Sensor	Dominant Freq. (Hz)		Damping ratio (%)		Amplification		Freq. of Amplification (Hz)	
	West	North	West	North	West	North	West	North
H3	6.69	4.47	6.79	4.37	17.7	33	6.61	4.54
H4	6.69	4.47	6.79	4.37	16.9	36	6.61	4.54
H5	6.69	4.47	6.99	4.37	17.0	27	6.61	4.54
Average	6.69	4.47	6.86	4.37	17.2	32	6.61	4.54

9- النتائج:

قُدرتْ في هذا البحث الخصائص الديناميكية للبرج التاسع (**T9**) باستخدام طريقة الضجيج المحيط. وهـذه الطريقـة معروفة عالمياً من حيث موثوقية النتائج وحدود التطبيـق كما هو موضح في الدراسة المرجعية، ومن أهم النتـائج التي تم التوصل عليها:

1. تطبيق طريقة ناكومورا التجريبية في هذا البرج مـن قلعة دمشق زودنا بخصائصه الديناميكيـة الفعليـة، وهذا يسمح بمعايرة النموذج الرقمي المـستخدم فـي الطرائق التحليلية، ويسمح بتوجيه عمليـات التـدعيم المستقبلية.
2. أظهر التسجيلان المنفذان في ساحة القلعة أن التردد المسيطر في موقع البرج هـو بحـدود 1.5 هرتـز تقريباً، كما أظهر وجود تضخيم يراوح من 3 إلى 4 أضعاف.
3. أظهرت التسجيلات المنفذة في الطابق الأخير مـن البرج التاسع (**T9**) أن هذا البرج يتمتع بالخـصائص الديناميكية الآتية: التردد الطبيعي هـو 6.6 هرتـز تقريباً معامل التضخيم نحـو 17 ضـعفاً ومعامـل التخميد نحو 6-7% في الاتجـاه الطـولي للبـرج الموافق للاتجاه شرق-غـرب. أمـا فـي الاتجـاه العرضي والموافق للاتجاه شـمال-جنـوب فكانـت الخصائص الديناميكية كالآتي: التردد الطبيعي هـو 4.5 هرتز تقريباً، معامل التضخيم نحو 30 ضـعفاً، ومعامل التخميد نحو 4%، وذلك إذا أخـذنا القيمـة الوسـطية التقريبيـة لتـسجيلات اللـواقط الثلاثـة المستخدمة في حساب تلك الخصائص.
4. إن الترددين الطبيعيين للبـرج (**T9**) بعيـدان عـن التردد المسيطر في الموقع الذي هـو بحـدود 1.5 هرتز وفي هذه الحالة يستبعد حدوث ظاهرة الطنـين بين اهتزاز البرج واهتزاز طبقة التربة التي تحتـه. ولحسن الحظ لم يظهر التسجيل المنفـذ فـي سـاحة القلعة وجود تضخيم خطر في موقع القلعة.
5. من جهة أخرى يمكن تجنب حدوث ظاهرة الطنـين بتعديل التردد الطبيعي للبرج عبـر تطبيـق بعـض الحلول الهندسية الممكنة والمطبقـة عالميـاً، مثـل إضافة الشدادات الطابقية وغيرهـا، وذلـك خـلال عمليات التقوية والتدعيم المستقبلية.
6. إذا دخلنا في تفاصيل النتائج فسنلاحظ أن الخصائص المستخلصة من أطياف فورييه تتوافق مع تلك التـي حددتها النسب الطيفية المحسوبة وفق ناكامورا، وهذا يدل على أن اهتزاز البرج التاسع كان مستقراً.

نأمل أن تسهم هذه الدراسة في تخفيف الخطر الزلزالـي التي يمكن أن تتعرض له قلعة دمشق، عبـر تقـدير خصائصها الديناميكية التـي تـتحكم فـي حركتهـا الاهتزازية تحت تأثير الزلازل. كما نأمـل فـي أن تساعد نتائجها على توجيه عمليات التقوية والتـدعيم المستقبلية لهذا البرج.

10- المراجع*

[1] Sbeinati M. R., Darawcheh R., Mouty M., (2005), The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D., Ann. Geofis., Vol. 48, N. 3, PP 347-435.

[2] Asfahani J. and M. K. Abdul-wahed, (2012), Evaluation of Earthquake Activity Along the Serghaya Fault, Syria, from Instrumental Seismic Data, accepted for publication in Acta Geophysica.

[3] Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quaterly Report Railway Tech. Res. Inst., 30-1, 25-30.

[4] Aki, K. (1993): «Local site effects on weak and strong ground motion», Tectonophysics, 218, 93-111.

[5] 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.

[6] Koller, M. G., Chatelain, J. L., Guillier, B., Duval, A. M., Atakan, K., Lacave, C., Bard, P. Y., and SESAME research team [2004] ''Practical user guidelines and software for the implementation of the H/V ratio technique: measuring conditions, processing method and results interpretation,''Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Paper no. 3132.

[7] Atakan K., R. Azzara, P.-Y. Bard, S. Bonnefoy-Claudet, A. Borges, M. Bottger Sorensen, F. Cara, J.-L. Chatelain, G. Cultrera, G. Di Giulio, F. Dunand, A.-M. Duval, D. Fäh, P. Guéguen, B. Guillier, J. Ripperger, P. Teves-Costa, J.-F. Vassiliades, S. Vidal et J. Wassner, (2003), Measurement guidelines: experimental conditions. SESAME report D08.02, 96pp

[8] Atakan K., P.-Y. Bard, F. Kind, B. Moreno, P. Roquette, A. Tento et SESAME-Team, (2004), J-SESAME: a standerdized software solution for the H/V spectral ratio technique. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver,Canada. Paper 2270.

[9] Bonnefoy-Claudet S. (2004), Nature du bruit de fond sismique: implications pour les études des effets de site, Thèse, Joseph Fourier (LGIT), Grenoble, France.

[10] Nakamura, Y., Gurler, E.D., Saita, J., (1999), Dynamic Characteristics of Leaning Tower of Pisa using microtremor-preliminary results, Proceedings of 25th JSCE Earthquake Engineering Symposium, 2, 921–924

[11] Sato T., Y. Nakamura, J. Saita, (2008), The change of the dynamic characteristics using microtremor, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.

[12] Fandi M. & T. Alyazjeen, (2011), Variation of ground-motion amplification and structural dynamic characteristics of Amman citadel, Arab J Geosci 4:1351–1361, DOI 10.1007/s12517-011-0359-7

[13] Cohen L., (1989), Time-frequency distributions - A review. Proc. IEEE, vol. 77, no.

[14] Yamanaka, H., Takemura, M., Ishida, H., and Niwa, M. (1994): «Characteristics of long period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers», Bull. Seism. Soc. Am., 884, 1831-1841.

[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] Castro R. R., Mucciarelli M. Pacor F., Federici P. and Zaninetti A., (1998), Determination of the characteristic frequency of two dams located in the region of Calabria, Italy, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 88 PP. 503-511.

[17] Abdul-Wahed M. K., Hassan A., Al-khdour E., (2014), Ambient noise mesurments in Damascus citadel, Internal rapport, Geology departement Atomic Energy Commission of Syria (AECS), Syria.

[18] Abdul-Wahed M. K.,(2013), Evaluation of the buildings seismic response – case study, 8th Gulf Seismic Forum 2013, 3-6 March, 2013, Muscat - Oman.

* تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2014/12/15