

الاهتزاز الحر للخزانات الاسطوانية الأرضية المعدنية - دراسة تحليلية وتجريبية

عبد المعين شحاده رقيه^{1*} محمد خير أحمد عبد الواحد² هاله توفيق
حسن³

^{1*} طالب دكتوراه، مهندس، المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية، جامعة دمشق، سوريا
(Abd.roukaya@damascusuniversity.edu.sy)

² دكتور، باحث في قسم الجيولوجيا، هيئة الطاقة الذرية السورية
(mabdulwahed@damascusuniversity.edu.sy)

³ استاذ، دكتور في قسم الهندسة الإنشائية الزلزالية، المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية، جامعة دمشق، سوريا
(hala.hasan@damascusuniversity.edu.sy)

الملخص:

أظهرت الأحداث الزلزالية الأخيرة في سوريا أهمية دراسة المنشآت وتقييمها زلزالياً حتى تحافظ على حياة السكان. تمتلك خزانات السوائل دور رئيسي ويجب الحفاظ على بقائها في حالة الاستثمار بعد حدوث الزلازل، لذلك لا بد من تقييم أدائها ودراسة سلوكها الزلزالي. تم في هذا البحث دراسة الخصائص الديناميكية والحصول على الترددات الطبيعية وأنماط الاهتزاز لخزانات أرضية بالقرب من دمشق باستخدام الطرق التجريبية. تم تنفيذ قياسات الضجيج الطبيعي وفق تقنية ناكامورا 1989 في حالة الخزان الفارغ. تم مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد مُمدج بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج (ABAQUS). إضافة إلى ذلك، تم دراسة خزانين في مرحلة الاستثمار (بحالة الملء) بنسبتي نحافة مختلفتين ($T1=0.36$, $T2=0.82$) لتوضيح أثر نسبة نحافة الخزان على قيم الترددات و إيجاد التردد الطبيعي للمركبتين النبضية والدفعية تحليلياً. تم إيجاد قيم التردد تحليلياً باستخدام علاقات الكود الأوروبي، ورقمياً باستخدام طريقة العناصر المنتهية. استخدمت طريقة (Couple Acoustic Structure (CAS) من أجل نمذجة التفاعل المشترك بين السائل والخزان. أظهرت نتائج البحث إمكانية استخدام طريقة تسجيلات الضجيج الطبيعي وفق تقنية ناكامورا وصلاحياتها لتقدير الاستجابة لمثل هذا النوع من المنشآت، حيث وصلت نسبة التقارب مع طريقة العناصر المنتهية حتى 83% في حالة الخزان الفارغ، بالإضافة إلى إمكانية استخدام طريقة العناصر المنتهية (CAS) في إيجاد التردد الطبيعي لكل من المركبتين النبضية والدفعية حيث بلغت نسبة التقارب مع الكود الأوروبي بنسبة تصل إلى 97% و 98% للتردد الدفعي للخزان ($T1$) والخزان ($T2$) على الترتيب، وتقارب 95% و 88% للتردد النبضي للخزان ($T1$) والخزان ($T2$) على الترتيب. وأخيراً، يمكن تلخيص أهمية البحث في تجنب حدوث حالة الطنين انطلاقاً من ملائمة التصميم الهندسي لجملة منشآت -سائل.

الكلمات المفتاحية: الخزانات الأرضية، تقنية ناكامورا، تسجيلات الضجيج الطبيعي، التردد الطبيعي، الاستجابة الزلزالية.

تاريخ الإيداع: 2024/11/8

تاريخ القبول: 2025/2/18



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب CC BY-NC-SA

Free Vibration of Ground-Supported Cylindrical Steel Tanks

Numerical and experimental study

Received: 8/11/2024

Accepted: 18/2/2025



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abdulmoaen shihada Roukaya^{*1} Mohamad Khir Ahmad Abdul-wahed² Hala Tawfiq Hasan³

^{*1}. PhD student, Higher Institute of Earthquake Studies and Research (HIESR) - Damascus University – Syria (Abd.roukaya@damascusuniversity.edu.sy)

². Senior Researcher, Department of Geology, Atomic Energy Commission of Syria, Damascus, Syria (mabdulwahed@damascusuniversity.edu.sy)

³. Professor, Higher Institute of Earthquake Studies and Research (HIESR) - Damascus University – Syria (hala.hasan@damascusuniversity.edu.sy)

Abstract

The recent seismic events in Syria highlight the necessity of studying and evaluating the seismic response of structures to save lives. Liquid storage tanks have a major role, and their operational integrity must be maintained following seismic events. Therefore, it is essential to evaluate the performance and study the seismic behavior for its. In this research, the dynamic characteristics, natural frequencies, and model shapes of ground tanks near Damascus were studied using an experimental method. The ambient noise measurement-Nakamura 1989- is executed in the case of an empty tank. The obtained results were compared with the results of the 3D numerical model of the finite element method (FEM) for the study tank using ABAQUS software. In addition, two tanks in the filling case with two different slenderness ratios ($T1=0.36$, $T2=0.82$) have been studied to clear the effect of the slender ratio. The natural frequency of the convective and impulsive components has been found analytically based on the Eurocode and numerically using the finite element method. The Couple Acoustic Structure (CAS) method has been used to model the fluid-tank interaction. The results of the paper have shown the possibility of using the ambient noise measurement to estimate the response of ground tanks, as the convergence rate with the finite element method arrived at 83% in the case of empty tanks. Also, the CAS method can be used to find the natural frequency of convective and impulsive components. The convergence rate with the Eurocode arrives at 97% 98% for the convective frequency of the (T1) and (T2), respectively, and convergence of 95% and 88% for the impulsive frequency of (T1) and (T2), respectively. Finally, the importance of research can be summarized in contributing to avoiding the occurrence of the resonance condition by adapting the engineering design for the liquid tank system.

رقية، عبد الواحد و حسن

الاهتزاز الحر للخزانات الاسطوانية الأرضية المعدنية.....

Keywords: Ground-Supported Tank - Nakamura Method – Ambient Noise
Measurement – Natural Frequency – Seismic Response

المقدمة:

تصور حول دقة وموثوقية الأساليب المختلفة في إيجاد الخصائص الديناميكية لخزانات السوائل الأسطوانية. أما (Nachtigall, 2003) فقد تناول في دراسته الاستجابة الزلزالية للخزانات الأسطوانية معرضة لإثارة زلزالية. وقد انتقد هذا البحث شروط التصميم القائمة على نظرية القشرة (shell theory)، وأشار إلى ضرورة إعادة تقييمها. كما اقترح نهجاً تحليلياً جديداً لتحليل خزانات السوائل المعرضة بهدف تحسين دقة التنبؤ بالاستجابة الزلزالية للخزانات. غير أن (Pajand et al., 2019) قدم منهجية جديدة لتقييم السلوك الديناميكي لمنشآت تخزين السوائل بدقة من خلال أخذ التفاعل المشترك بين السائل والمنشأ بعين الاعتبار. واقترح حلاً دقيقاً لدراسة الاهتزاز الحر لتدفق السوائل في خزانات مستطيلة مملوءة جزئياً لنموذج ثنائي الأبعاد وقدم صيغة مباشرة لحساب التردد الطبيعي الأول في شروط محيطية مختلفة. إضافة إلى ذلك، فقد قام (Rouzbeh Amini, 2005) بتحليل التردد الطبيعي للخزانات المملوءة بالسوائل باستخدام تحليل العناصر المنتهية. وأشار أن الترددات الطبيعية المرتبطة بالشروط المحيطية يمكن أن تؤدي إلى ظاهرة الرنين وانهيار محتمل للخزان تحت الإثارة الزلزالية، حيث تم نمذجة عدة أشكال للخزانات وباستخدام مستويات ملء مختلفة في برنامج ADINA. وقد أظهرت هذه الدراسة رؤى جديدة حول إيجاد الترددات الطبيعية والأشكال النمطية للخزانات الأسطوانية المملوءة بالسوائل. تأتي أهمية الدراسة الحالية بارتباطها بدراسة تجريبية حيث أن معظم الدراسات السابقة لم تكن مرتبطة بنتائج دراسات تجريبية بل معتمدة بشكل مباشر على نظرية (shell theory) لإيجاد الترددات الطبيعية. ينتج الاختلاف بين قيم الطرق التحليلية والتجريبية لعدم القدرة على توصيف سلوك الاهتزاز الحقيقي للمنشآت. ومن هنا تأتي أهمية الطرق التجريبية للحصول على

يتنوع استخدام الخزانات الأرضية في مجالات متعددة أهمها المجالات الصناعية والخدمية. ويفضل الشكل الاسطواني للخزانات لبساطة التصميم وسهولة البناء من جهة، ولكفاءتها في مقاومة الأحمال الهيدروستاتيكية والهيدروديناميكية التي تتعرض لها من جهة أخرى. وقد أظهر زلزال 2023 في سوريا مدى الأهمية البالغة لأخذ موضوع الكوارث الزلزالية على محمل الجد لاسيما بعد تضرر العديد من منشآت تخزين السوائل كالخزانات الأرضية المعدنية والبيتونية. لذلك يتوجب التحقق من سلامتها الإنشائية لها بحيث تقاوم الأحمال الزلزالية التي تتعرض لها. ركزت العديد من الأبحاث السابقة على تقدير الخصائص الديناميكية لهذا النوع من المنشآت كونها تمتاز بسلوك مغاير للأبنية العادية والذي يولده التفاعل المعقد بين السائل والخزان.

وتم في هذا البحث التركيز على إيجاد الخصائص الديناميكية والترددات الطبيعية للخزانات الأرضية، حيث أظهرت الزلازل السابقة كزلزال المكسيك 1985 أن خراب ودمار المنشآت ازداد عند توافق الدور الأساسي لاهتزاز المنشأ مع الدور المسيطر لحركة التربة المشادة عليها، فلذلك من الضروري معرفة الخصائص الديناميكية من أجل التقدير المبكر للدمار الزلزالي والتقدير الكمي للخطر الزلزالي للمنشآت الحيوية كالخزانات.

فقد قام (Yazdani et al., 2017) بإيجاد الترددات الأساسية للخزانات الأسطوانية باستخدام الطرق التحليلية المعتمدة في الكودات العالمية وطريقة العناصر المنتهية FEM في Ansys. وقرن الترددات الطبيعية التي تم الحصول عليها من الكودات وتلك الناتجة من نموذج العناصر المنتهية في برنامج Ansys، وبالتالي وفر هذا البحث مقارنة قيم الكودات وقيم نموذج المحاكاة الرقمية (نموذج FEM) للحصول على

الاهتزاز الحر للخرانات الاسطوانية الأرضية المعدنية.....

رقية، عبد الواحد و حسن

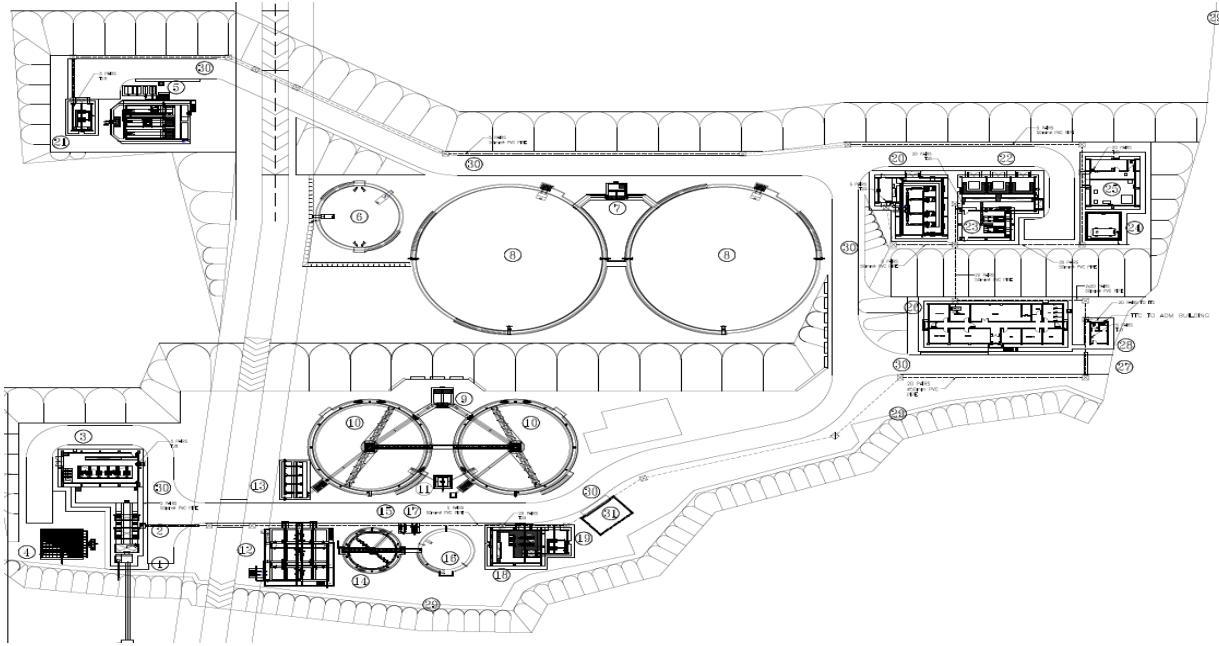
مختلفين في نسبة النخافة في حالة خزان ملء. تم الحصول على تردد المركبتين الدفعية والنضية لنموذج العناصر المنتهية باستخدام طريقة (Acoustic couple structure) لنمذجة التفاعل بين السائل والخزان. وقورنت نتائج الدراسة الرقمية مع القيم التحليلية الناتجة من استخدام علاقات الكود الأوروبي. أكدت هذه الدراسة على أهمية الترددات الأساسية والتحليل النمطي في تقييم السلوك الديناميكي للخرانات الاسطوانية كخطوة أولى لتقييم ظروف التحميل الزلزالي. يضع هذا العمل الأساس لإجراء تحقيقات ودراسات مستقبلية في تقنيات التنبؤ المتقدم بسلوك الخزانات وما يترتب على ذلك من تصميم يعتمد على الخصائص الديناميكية للموقع والخصائص الديناميكية لجمل خزان-سائل والتكامل بينها لتجنب ظاهرة الطنين للخرانات.

2. الدراسة التجريبية:

أجريت قياسات الضجيج الطبيعي (استخدام تقنية ناكامورا) والتي تعتبر كأحد الطرق الفعالة في قياس الاهتزاز الطبيعي. وقد أكدت العديد من التجارب وثوقية طريقة ناكامورا و أظهرت مدى استقرارها وارتباط ذروة النسبة الطيفية H/V بتردد الطنين الأساسي في مواقع التربة الرخوة، إضافة لعدد كبير من الباحثين (Atakan,2003&2004) و (Bonney,2004) اختبروا طريقة ناكامورا ووضعوا المعايير الناظمة وشروط التطبيق ومدى وثوقية نتائجها. تم إجراء القياسات على خزانات أرضية معدنية بأساسات بيتونية في موقع محطة معالجة مياه الصرف الصحي في جمرايا، وذلك في حالة الخزانات الفارغة (لم يتم استثمارها بعد). تقع جملة الخزانات المدروسة في منطقة الهامة شمال غرب مدينة دمشق، ويتألف موقع الخزانات من عدة مصاطب نهريّة، تتوضع عليها عدة خزانات اسطوانية أرضية، وهي موزعة في الموقع كما في الشكل (1)، ويمر بالقرب منها نهر بردى لذا من المرجح أن تكون الطبقات الجيولوجية تحتها من التوضعات اللحقية لنهر بردى. أخذت قياسات الضجيج الطبيعي على مصطبتين فقط، ولخزائين متماثلين في كل مصطبة كما هو موضح بالشكل (1).

الخصائص الديناميكية للمنشآت، حيث عُدت طريقة قياس الاهتزاز الطبيعي إحدى الطرق الفعالة في دراسة الخواص الديناميكية للأبنية والخواص الديناميكية للموقع. قام (AI-Helwani et al, 2020) بدراسة السلوك الديناميكي والأداء لمبنى وزارة التعليم العالي في سورية حيث قام الباحثون بتشكيل نموذج عناصر محدودة للمبنى المدروس والمقارنة مع الخواص الديناميكية المستنتجة تجريبياً من خلال قياسات الضجيج الطبيعي باستخدام تقنية ناكامورا من أجل تقييم السلوك الديناميكي الغير الخطي للمبنى. وقد ركزت هذه الدراسة على الأداء الزلزالي للمبنى والمصمم في الأصل وفقاً لكود البناء السوري القديم (غير الزلزالي). وأظهرت نتائج الدراسة موثوقية منهجية النمذجة المستخدمة في التنبؤ بالسلوك الديناميكي الفعلي للمنشآت الخرسانية المسلحة عن طريق الجمع بين نمذجة طريقة العناصر المنتهية (FEM) وطريقة تسجيلات الضجيج الطبيعي. ودراسات أخرى مثل (Fandi,2011) استخدمت فيها قياسات الضجيج الطبيعي بطريقة ناكامورا مثل المباني الأثرية، حيث طبقت هذه الطريقة لدراسة قلعة عمان ولموقع جبل القلعة وذلك لتقدير تأثير الموقع، وتم إجراء تسجيلات هيكلية على المستوى الأعلى للقلعة لتقدير خصائصها الديناميكية والحصول على أنماط الاهتزاز الرئيسية بالاتجاه الطولي والعرضي. أظهرت الدراسة أن الأجزاء المتضررة من قلعة عمان بالزلازل التاريخية قد تضررت نتيجة لتأثير الخصائص الطبوغرافية والجيولوجية لمحدب جبل القلعة التي عملت على تضخيم شدة الزلازل.

تهدف الدراسة الحالية إلى إيجاد الخصائص الديناميكية تجريبياً باستخدام قياسات الضجيج الطبيعي (تقنية ناكامورا) لخزانات معدنية اسطوانية في محطة معالجة مياه وذلك لحالة خزان فارغ بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام طريقة العناصر المنتهية في برنامج الأباكوس (ABAQUS,2022) من أجل إنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد لجملة خزان-سائل ولنوعين من الخزانات



الشكل (1) الموقع العام للخزانات المدروسة.

الطرز (Sercel Model L-4) وترددها الذاتي 1 هرتز. وقد تم إجراء اختبار أولي لعمل هذه اللواقط في المكتب قبل استخدامها في تنفيذ التسجيلات الفعلية للتأكد من تماثل خواصها عن طريق وضعها في مكان واحد ومقارنة تسجيلاتها مع بعضها البعض.

أستخدم لتنفيذ قياسات الاهتزاز الطبيعي في الخزانات المائية في جمرانيا جهاز التسجيل من الطراز (Baladin 24 bit) المصنع في شركة (esg Canada) والموضح في الشكل (2). يسمح هذا الجهاز باستخدام 6 لواقط للتسجيل، وتم تحويل التسجيلات إلى الشكل الرقمي بسرعة تقطيع 100 عينة/الثانية. كانت اللواقط وحيدة المركبة (monoaxial) من



الشكل (2) يبين الأجهزة المستخدمة في القياسات.

ضبط الأفقية لجميع اللواقط المثبتة على الخزانات الأربعة أثناء إجراء القياسات كما هو موضح بالشكل (3) والشكل (4)

بالنسبة لتثبيت اللواقط على حواف الخزانات فقد تم وضع منصة خشبية وتثبيتها بملازم معدنية على حافة الخزان، وتم

الاهتزاز الحر للخزانات الاسطوانية الأرضية المعدنية.....

رقية، عبد الواحد و حسن

التهوية فهما بقطر 18 متر وارتفاع 7 متر وقد تم تثبيت لاقط لكل منهما.

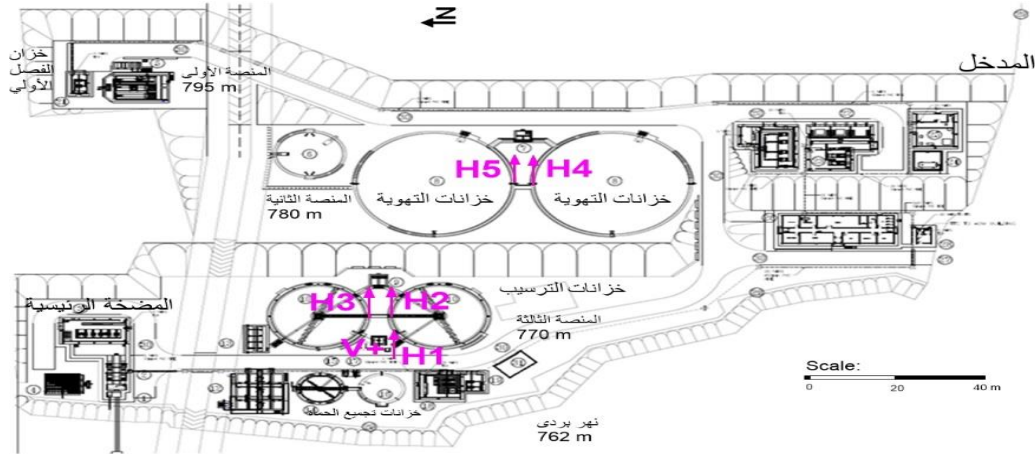
وموضح بالجدول (1). ومن ناحية الأبعاد الهندسية لخزاني الترسيب فهما بقطر 11 متر وارتفاع 6 متر. وعددهما اثنان وقد تم تثبيت لاقط على الحافة العلوية لكل منهما. أما خزاني



الشكل (3) تثبيت اللواقط على حواف الخزانات.

الجدول(1) أماكن تثبيت اللواقط لإجراء القياسات

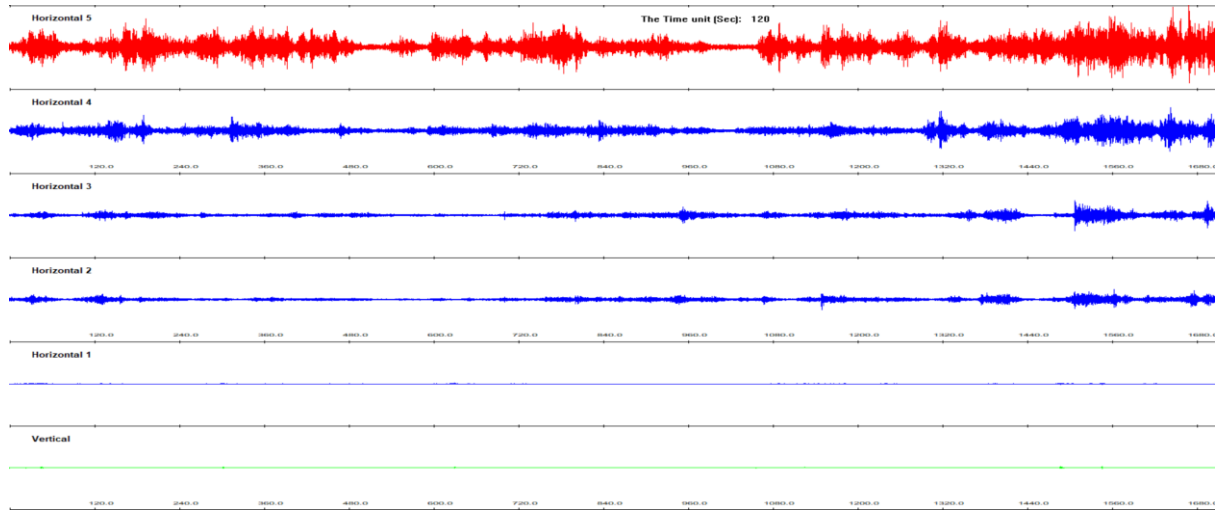
رقم اللاقط	توجيه اللاقط	مكان التوضع
اللاقط (1)-V	شاقولي	القاعدة الصخرية
اللاقط (2)-H1	أفقي	القاعدة الصخرية
اللاقط (3)-H2	أفقي	خزان الترسيب - الجنوبي
اللاقط (4)-H3	أفقي	خزان الترسيب - الشمالي
اللاقط (5)-H4	أفقي	خزان التهوية - الجنوبي
اللاقط (6)-H5	أفقي	خزان التهوية - الشمالي



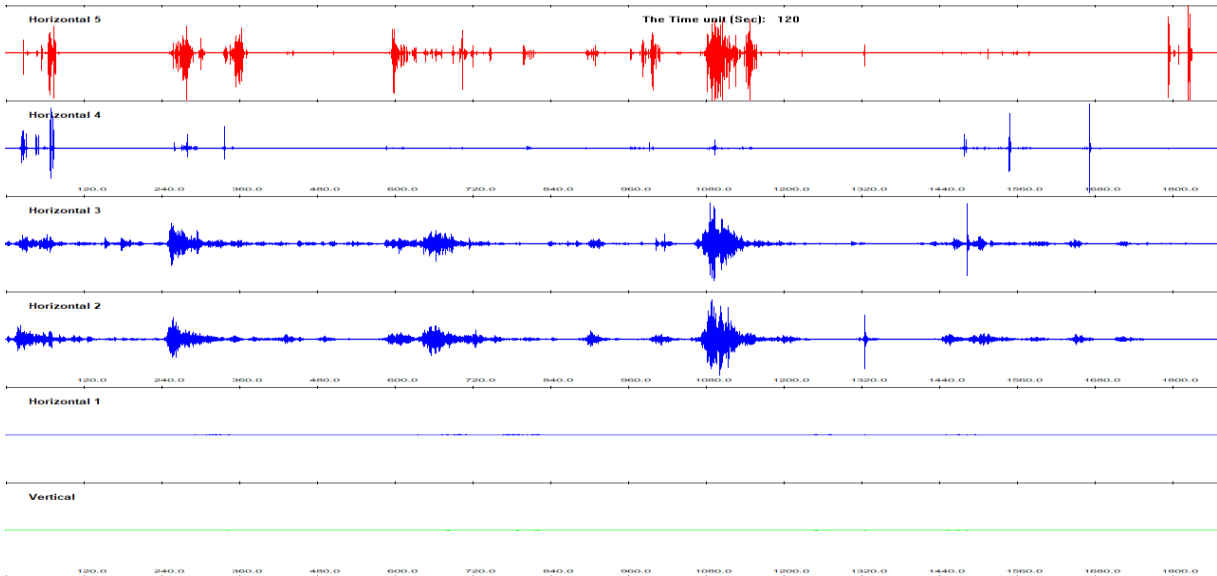
الشكل (4) أماكن وضع اللواقط في خزانات محطة معالجة مياه الصرف الصحي في الهامة حيث وجهت اللواقط الأفقية نحو الشرق.

نوعية التسجيل وأخذ مواصفات نظام التسجيل بالحسبان. يسمح هذا البرنامج بالحصول على الخصائص الديناميكية للأبنية عن طريق حساب الأطياف والنسب الطيفية في نوافذ زمنية من التسجيل يتم اختيارها بحيث يكون التسجيل مستقراً ويقوم البرنامج بعرض النتائج بيانياً ورقمياً ويزود المستخدم بالمعالجة الإحصائية بهدف تقييم جودة النتائج. يمكن إجراء المعالجة الآلية لكامل التسجيل الرقمي وإعطاء لنتائج التفصيلية لكل نافذة على حدة، وهذا يسمح باستبعاد النوافذ التي أعطت نتائج شاذة مما يحسن من جودة النتائج. تم خلال معالجة التسجيلات حساب الأطياف باستخدام نوافذ زمنية مدة كل منها 30 ثانية مما سمح بتحري مجال ترددي يتراوح من 0.3 إلى 50 هرتز وصقلت الأطياف المحسوبة باستخدام طريقة Hanning. سمح الطول الكلي للتسجيلين (حوالي 30 دقيقة) بحساب تلك الأطياف لعدد كبير من النوافذ لا يقل عن 60 نافذة زمنية. لذلك 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.

كان توجه اللواقط الأفقية في التسجيل الأول نحو الشرق بشكل مماس لحافة الخزان. وقد بلغت مدة التسجيل 30 دقيقة، (الشكل 5). وننوه أن اللاقط الأول هو اللاقط الشاقولي لونت تسجيلاته وأطيافه باللون الأخضر في الأشكال اللاحقة وقد تم وضعه على طبقة صخرية صلبة في منطقة منخفضة ولذلك نلاحظ أنه عدم وجود تضخيم على سعة اهتزاز الضجيج الطبيعي في تسجيلاته بالمقارنة مع بقية اللواقط الأفقية. أما التسجيل الثاني والموضح في الشكل (6) فقد كان توجه اللواقط الأفقية نحو الشمال بشكل متعامد مع حافة الخزان. وقد بلغت مدة التسجيل الثاني 30 دقيقة مع ملاحظة هبوب رياح شديدة خلال تنفيذ هذا التسجيل أثرت على جودة التسجيل وهذا يستوجب حذف الأجزاء المضطربة من التسجيل عند المعالجة. تمت عملية معالجة التسجيلات التي أجريت باستخدام البرنامج (Buledres.exe, 2008). ويهدف هذا البرنامج إلى معالجة التسجيلات الرقمية باستخدام طرائق معروفة عالمياً مثل تحويلات فورييه (Fourier Transfer) لحساب الأطياف، وحساب النسب الطيفية وفق طريقة ناكامورا وتطبيق التصفية الرقمية والثني والارتباط المتصالب والارتباط الذاتي إذا اقتضت الحاجة. وكذلك لتطبيق التصحيحات اللازمة بهدف تحسين



الشكل (5) الاهتزاز الطبيعي في التسجيل الأول والمنفذ بلواقط موجهة بشكل مماسي لحواف الخزانات وباتجاه الشرق.



الشكل (6) الاهتزاز الطبيعي في التسجيل الثاني والمنفذ بلواقط موجهة بشكل معامد لحواف للخزانات وباتجاه الشمال.

نانومتر بالثانية. نلاحظ وجود عدة ذُرا عالية عند الترددات (5.20 هرتز) وبدور (0.19 ثانية) للخزان الشمالي بينما للخزان الجنوبي (4.90 هرتز) بدور (0.20 ثانية). أما قيم التردد لخزانات التهوية المتماثلين والواقعين على المصطبة العلوية بتردد (5.10 هرتز) بدور (0.20 ثانية) وهذا يمثل التردد التجريبي المستنتج لجملة خزان - تربة.

3. نتائج التسجيلات ومناقشتها:

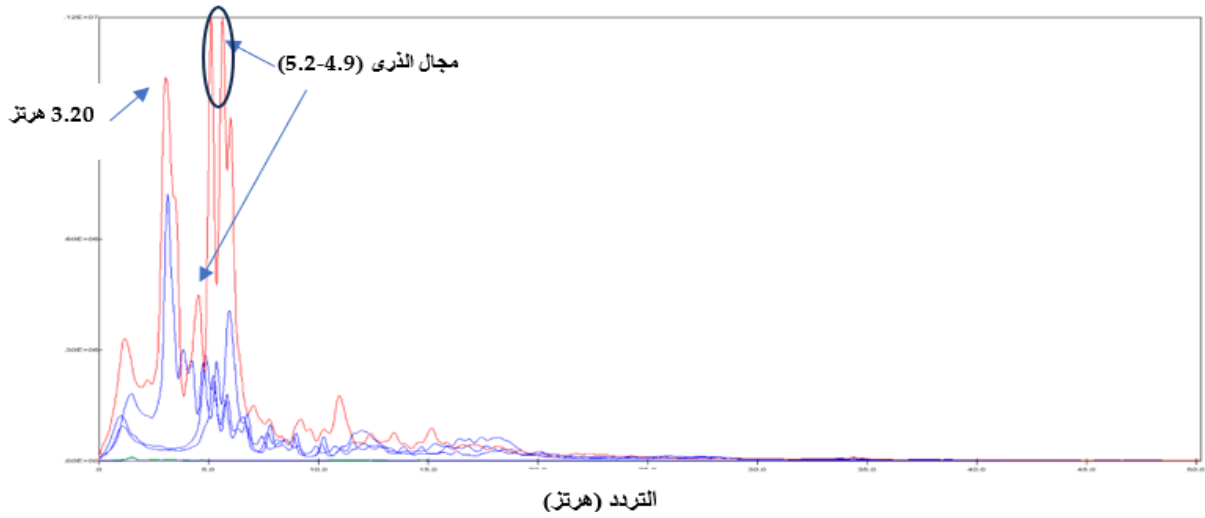
يظهر الشكل (7) وسطي الأطياف للتسجيل الأول في اتجاه الشرق إحدى الخصائص الديناميكية للخزانات الفارغة (التردد الطبيعي). حيث يمثل المحور الأفقي التردد مقدراً بالهرتز بينما يمثل المحور الشاقولي سعة الضجيج مقدراً بوحدة السرعة

الاهتزاز الحر للخزانات الاسطوانية الأرضية المعدنية.....

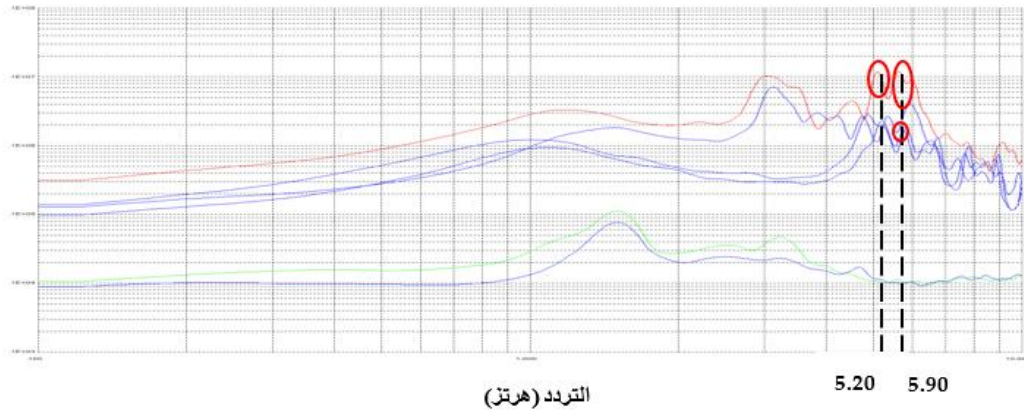
رقية، عبد الواحد و حسن

يظهر الشكل (9) وسطي الأطياف للتسجيل الثاني في اتجاه الشرق والخصائص الديناميكية للخزانات الفارغة، حيث يمثل المحور الأفقي التردد بالهرتز بينما يمثل المحور الشاقولي سعة الضجيج مقدراً بوحدة السرعة نانومتر بالثانية. نلاحظ وجود عدة ذُرا عالية بالنسبة لخزاني الترسيب المتماثلين والواقعين على نفس المصطبة حوالي (6-8 هرتز) بدور وسطي (0.15 ثانية) للخرانين الشمالي والجنوبي. أما قيم التردد لخزانات التهوية المتماثلين والواقعين على المصطبة العلوية بتردد (6.30 هرتز) بدور (0.16 ثانية) وهذا يمثل التردد التجريبي المستنتج لجملة خزان - تربة في حالة الخزانات الفارغة.

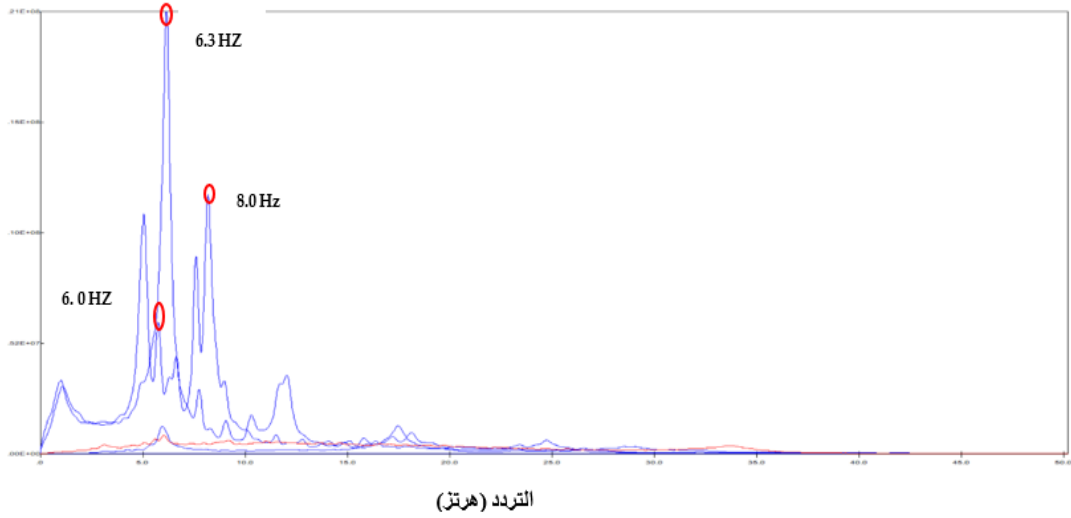
ولإظهار الخصائص الديناميكية بشكل أدق أكثر تم حساب النسب الطيفية للنوافذ الزمنية على مقياس لوغاريتمي (نسبة H/V) حيث يبين الشكل (8) النسب الطيفية الوسطية على مقياس لوغاريتمي لجميع اللواقط المثبتة على الخزانات، حيث يمثل المحور الأفقي التردد بالهرتز بينما المحور الشاقولي يبين التضخيم بمضاعفات الواحد. ونلاحظ من الشكل أن اللواقط الموضوعة في خزانات الترسيب لها ذُرا تردد أعظمية في المجال (4.90-5.20 هرتز) بدور وسطي (0.20 ثانية). أما في خزانات التهوية فإن النسبة الطيفية تُظهر ذُرا عند ترددات تتراوح بين (5.60-5.90 هرتز) بدور وسطي (0.175 ثانية).



الشكل (7) وسطي الأطياف على المقياس العادي والمحسوبة في 60 نافذة زمنية للتسجيل في اتجاه الشرق.



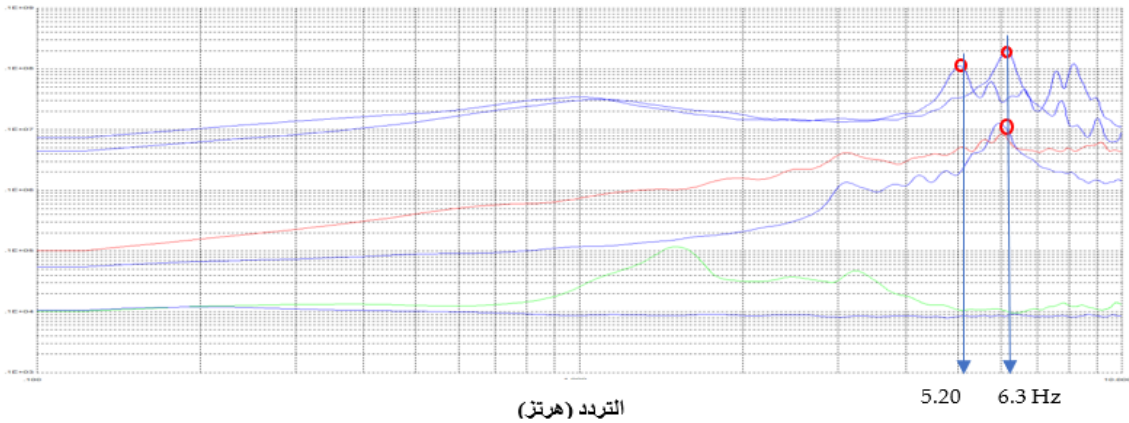
الشكل (8) النسب الطيفية معروضة على المقياس اللوغاريتمي للأطياف والمحسوبة في 60 نافذة زمنية للتسجيل في اتجاه الشرق



الشكل (9) وسطي الأطياف للواقظ معروضة على المقياس العادي للأطياف المحسوبة في 60 نافذة زمنية للتسجيل في اتجاه الشمال.

الترددات الناتج من وسطي الأطياف على المقياس العادي تتقارب بشكل كبير ومقبول مع الترددات الناتجة من وسطي النسب الطيفية التي تُعد الأدق وهذا يعبر عن استقرار المنشأ إلى حد ما. يلخص الجدول (2) جميع نتائج معالجة القياسات من قيم ترددات وقيم تخميد لكل من وسطي الأطياف وقيم النسب الطيفية لجميع اللواقظ وللتسجيلات في الاتجاهين الشمالي والشرقي. يبين الجدول أن النتائج المستخلصة من أطياف فورييه تتوافق إلى حد ما مع تلك الناتجة من النسب الطيفية وبالتالي يدل على استقرار الخرنات في وضعها الحالي.

ولإظهار الخصائص الديناميكية بشكل أدق أكثر يتم حساب النسب الطيفية للنوافذ الزمنية على مقياس لوغاريتمي (نسبة H/V) حيث يبين الشكل (10) النسب الطيفية الوسطية على مقياس لوغاريتمي لجميع اللواقظ المثبتة على الخرنات، حيث يمثل المحور الأفقي التردد ب الهرتز بينما المحور الشاقولي يبين التضخيم. ونلاحظ من الشكل أن اللواقظ المتوضعة في خرنات الترسيب لها ذُرا تردد أعظمية في المجال (5.20-6.15 هرتز) بدور وسطي (0.18 ثانية). أما في خرنات التهوية فوق النسبة الطيفية فإن ذُرا التردد حوالي (6.00 هرتز) بدور وسطي (0.17 ثانية). إضافة لذلك فإن قيم



الشكل (10) النسب الطيفية معروضة على المقياس اللوغاريتمي للأطياف والمحسوبة في 60 نافذة زمنية للتسجيل في اتجاه الشمال.

الجدول (2) نتائج القياسات التجريبية للخزانات

اللاقط	مكان التوضع	إيجاد التردد عن أطيايف فورييه				إيجاد التردد عن طريق الأطيايف (H/V method)	
		التسجيل الأول		التسجيل الثاني		التسجيل الأول	التسجيل الثاني
		التردد (Hz)	Damping (%) ±SD	التردد (Hz)	Damping (%) ±SD	التردد (Hz)	التردد (Hz)
H2	خزان الترسيب الشمالي	5.20	2.6±2.06	8.0	1.8±0.79	5.20	5.2
H3	خزان الترسيب الجنوبي	4.90	3.3±2.06	6.1	2.3±0.74	4.90	6.15
H4	خزان التهوية الشمالي	3.20	4.28±1.63	17.4	1.7±1.32	5.90	6.00
H5	خزان التهوية الجنوبي	5.10	2.00±2.73	6.03	6.3±8.8	5.60	6.03

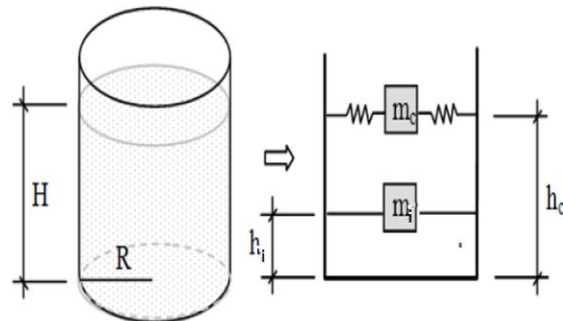
الخزان في حالة الفراغ فيما لو توافق تردده الطبيعي في أي حالة من الحالات مع تردد الموقع وتردد الهزة الزلزالية أو كليهما.

4. الدراسة التحليلية والرقمية:

تم إجراء التحليل النمطي للحصول على الترددات الطبيعية للخزانات، حيث يُعد تحديد الخصائص الديناميكية الخطوة الأولى لأنه نقطة بداية لتحليلات أخرى كتحليل طيف الاستجابة أو تحليلات التاريخ الزمني، بالإضافة إلى أهميته في تفسير سلوك الخزان. يعتبر تعريف سطح الاتصال ما بين السائل والخزان أهم ما يميز المنشآت الحاوية على سائل كالخزانات الأرضية والعالية وهذا ما يطلق عليه التفاعل المشترك بين السائل والخزان (Fluid-Structure interaction) حيث يطبق السائل قوى وضغوط هيدرونياميكية على جدارن وقاعدة الخزان. أُجريت عدة دراسات في أواخر القرن الماضي من أجل تشكيل نموذج رياضي يمثل هذا التفاعل ويعبر عن كتلة السائل. ويُعد (Housner, 1963) أول من وضع نموذج رياضي لجملة خزان-سائل الموضح في الشكل (11) من أجل الخزانات الصلدة الأسطوانية والمستطيلة.

مما سبق نجد أن قياسات الضجيج الطبيعي مكنتنا من الحصول على الخصائص الديناميكية الفعلية للخزانات الفارغة (معاملات التخميد والتردد الطبيعي) الموضحة في الجدول (2)، وتسمح هذه النتائج بمعايرة النموذج الرقمي المستخدم في الطرائق التحليلية. وقد أظهر التسجيلان المنفذان من خلال النتائج المستخلصة من وسطي النسب الطيفية (H/V) قيمة التردد الطبيعي الوسطي لخزانات التهوية (5.80 هرتز) باتجاه الشرق وقيمة (6 هرتز) باتجاه الشمال. أما بالنسبة لخزانات الترسيب فأظهرت أن التردد الوسطي حوالي 5.20 هرتز. يمكن تبرير الاختلاف في قيم التردد للخزانات بالاتجاهين بأن القياسات التجريبية تتعلق بتوضع ونوع طبقات التربة في موقع الخزانات وبالتالي فإن انتقال الاهتزازات ضمن طبقات التربة قد يختلف حسب الاتجاه لذا يتم اخذ تأثير تردد الموقع بعين الاعتبار أي تكون قيم التردد المقاسة ممثلة لجملة الخزان مع التربة المحيطة به (جملة خزان-تربة). ويكمن الاستفادة من النتائج السابقة بإمكانية تجنب ظاهرة التجاوب الطنيني عن طريق التحكم في التردد الطبيعي للخزان بتغيير نسبة نحافة الخزان (ارتفاع مستوى السائل، قطر الخزان) أو تجنب ترك

الكتلة النبضية (impulsive mass)، والجزء الآخر من كتلة السائل هو الكتلة المتحركة أو الدفعية (convective or sloshing mass) التي تسبب قوى ضاغطة على جدران الخزان. يتم حساب نسبة كل من الكتلتين بالنسبة للخزانات الاسطوانية وفق نسبة نحافة الخزان H/R (نسبة ارتفاع الخزان إلى قطره). وقد اعتمد الكود الأوروبي على نموذج هوسنر وطريقة مالهوترا 2000 بالنسبة للخزانات الاسطوانية ونموذج (Veletsos, 1984) للخزانات الاسطوانية المرنة.



الشكل (11) النموذج الرياضي وفق هاوسنر

يقوم نموذج هاوسنر على تقسيم كتلة السائل إلى قسمين، حيث يعتبر أن كتلة الخزان مع جزء من كتلة السائل تسمى



الشكل (12) الشكل المدروس تحليلياً (خزان الترسيب)

تم إجراء تحليل الاهتزاز الحر (Free Vibration) للخزان في حالة الخزان الفارغ وإيجاد أشكال الأنماط لجدار الخزان، حيث أن الخزانات الاسطوانية المرنة المحملة تميل بشكل طبيعي إلى الاهتزاز في اتجاهين، اتجاه شاقولي يعبر عنه برقم الموجة المحورية (m)، واتجاه أفقي يعبر عنه برقم الموجة المحيطية (n) ويظهر الشكل (13) الأنماط المحورية والمحيطية الأولى.

تمت دراسة أحد خزانات الموقع (خزان الترسيب -خزان 1) المبين في الشكل (12) وإيجاد التردد له في حالة الفراغ ومقارنته بالترددات الناتجة عن الدراسة التجريبية. وبالنسبة للخزان المدروس فهو خزان معدني الجدران حيث الوزن الحجمي لمادة الفولاذ المستخدمة (7850 kg/m^3) ومعامل مرونة (210 GPa) ومعامل بواسون 0.30 . أما القاعدة فهي من البنتون المسلح ذات وزن حجمي (2400 kg/m^3) ومعامل مرونة (30 GPa) باسكال ومعامل التشوه العرضي (0.25).

الاهتزاز الحر للخزانات الاسطوانية الأرضية المعدنية.....

رقية، عبد الواحد و حسن

الخزان، أما (D) فتعبر عن قساوة الانعطاف في حالة وسط متجانس ويعبر عنها بالعلاقة (2):

$$D = E_s \cdot \frac{h^3}{12} \cdot (1 - \nu^2)$$

(λ_m) تعبر عن القيم الذاتية لأعداد الموجات الطولية للحزم مع شروط محيطية مختلفة. بالنسبة لحالة الاستناد البسيط يمكن التعبير عنها بالعلاقة (3):

$$\lambda_m = m \cdot \frac{\pi}{L}$$

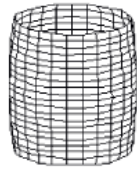
حيث (m) رقم الموجة المحورية و (L) تعبر عن ارتفاع الخزان

ووفقاً لمعادلات دونيل-مشتاري-فلاسوف، التي تم حلها بطريقة جاليركين التقريبية، يمكن تحديد الترددات الطبيعية للسطوح مع شروط محيطية مختلفة وفق رقم الموجة المحورية (m) و الموجة المحيطية (n)، وفق (Nachtigall et al, 2003) يمكن استخدام المعادلة (1) التالية لتحديد الترددات الطبيعية ونختار الشروط المحيطية بحيث تتناسب الحالة المدروسة لدينا جدار حر من الأعلى (Free at top) واستناد بسيط من الأسفل (Simple Support at base):

$$\omega_{m,n}^2 = \frac{1}{\rho_s \cdot h} \left[\frac{E_s \cdot h \cdot \lambda_m^4}{r^2 \cdot \left[\left(\frac{n}{r} \right)^2 + \lambda_m^2 \right]^2} + D \cdot \left[\left(\frac{n}{r} \right)^2 + \lambda_m^2 \right]^2 \right]$$

حيث E_s معامل المرونة لمادة الخزان، (ρ_s) كثافة مادة جدار الخزان، (r) نصف قطر الخزان المدروس، (h) سماكة جدار

Axial wave numbers:



m = 1



m = 2

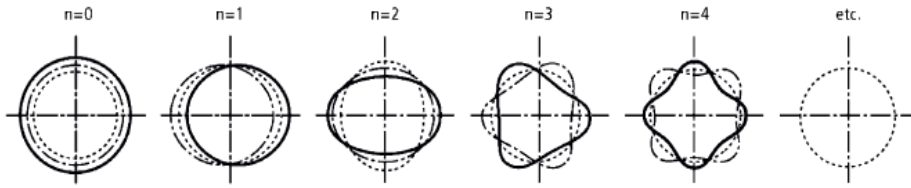


m = 3



m = 4

Circumferential wave numbers:



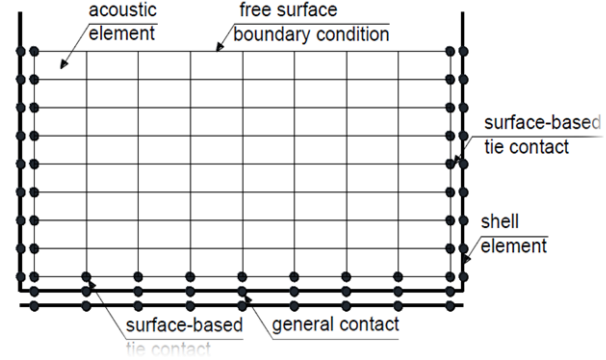
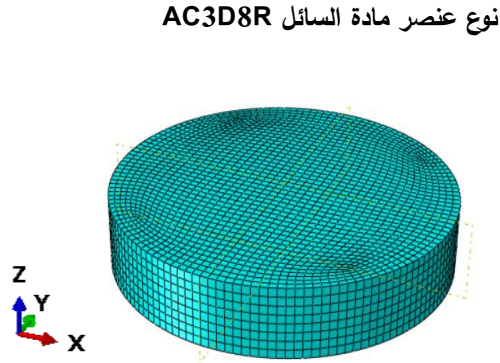
الشكل (13) الأنماط المحيطية والمحورية الأولى

الخزان	القطر (م)	الارتفاع (م)	ارتفاع السائل (م)	سماكة الخزان (م)	نسبة النحافة
T1 (خزان الترسيب)	11.00	6.00	4.0	0.01	0.36
T2 (خزان المقارنة)	8.00	8.00	6.5	0.01	0.82

تم إيجاد قيم الترددات الطبيعية للخزانات المدروسة في حالة الاستثمار (خزان مملوء) باستخدام طريقة الكود الأوروبي Eurocode-part 4 الذي اعتمد على نموذج هوسنر الرياضي

حالة خزان مملوء:

الاهتزاز الحر للخرانات الاسطوانية الأرضية المعدنية.....



الشكل (15) الشروط المحيطية التي تم استخدامها في نمذجة التفاعل

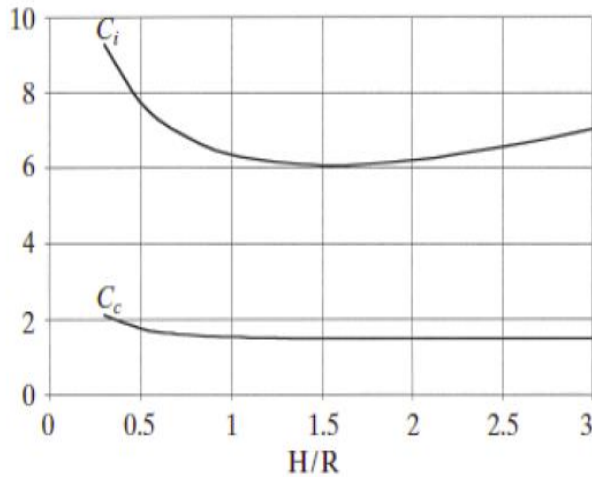
المشترك بين السائل والخزان وفق طريقة CAS

الشكل (16) حيز المياه مع تقسيم الشبكة في برنامج

الاباكوس في طريقة CAS

الجدول (3) أبعاد الخزانات المدروسة

حيث f_i : الدور النبضي، t : سماكة جدار الخزان، وتمثل H_L : ارتفاع السائل ضمن الخزان، E : معامل مرونة مادة الخزان، ρ_L : كثافة السائل. و C_i : معامل الكتلة النبضية وبالنسبة لقيم كلاً من C_c , C_i فقد اقترح (Malhotra et al., 2000) قيم C_c و C_i بدلالة نسبة نحافة الخزان يمكن إيجادهما من الشكل (14).



الذي يقسم كتلة السائل إلى كتلة دفعية وكتلة النبضية للسائل في الخزانات المعدنية والبيتونية في حالة الاتصال الموثوق، واعتمد العلاقات التي اقترحها (Malhotra, 2000) وهي نسخة مبسطة من أعمال فيليبتسوس التي تتضمن تبسيط بعض الأمور كتمثيل نظام سائل خزان بواسطة النمط الأول لكل من أنماط الاهتزاز الدفعية والنبضية وإعادة ضبط ارتفاعات الكتل النبضية والدفعية مع مراعاة أثر التغير في الأنماط العيا، بالإضافة إلى إعادة صياغة علاقة التردد النبضي التي أوجدها فيليبتسوس بحيث يمكن تطبيقها على جميع أنواع الخزانات الخرسانية والمعدنية ذات سماكات مختلفة، بملاحظة أن الجمع بين الاستجابات الاندفاعية والحملية يتم عن طريق أخذ مجموعها العددي بدلاً من قيمة الجذر التربيعي المتوسط.

أما علاقات (Malhotra, 2000) لإيجاد كل من التردد والدور الطبيعي للكتلة الدفعية للسائل يعبر عنها بالعلاقة (4):

$$T_c = C_c \sqrt{R} \quad , \quad f_c = \frac{1}{C_c \sqrt{R}}$$

T_c : الدور الدفعي f_c : التردد الدفعي، R : نصف قطر الخزان و C_c : معامل الكتلة الدفعية.

ومن أجل التردد الطبيعي للكتلة النبضية (impulsive) للسائل

$$f_i = \frac{1}{C_i \sqrt{\rho_L H_L}} \quad (5)$$

الشكل (14) المعاملات الدفعية والنبضية وفق ملهوترا 2000

الجدول (4) خصائص المواد المستخدمة في نموذج FEM

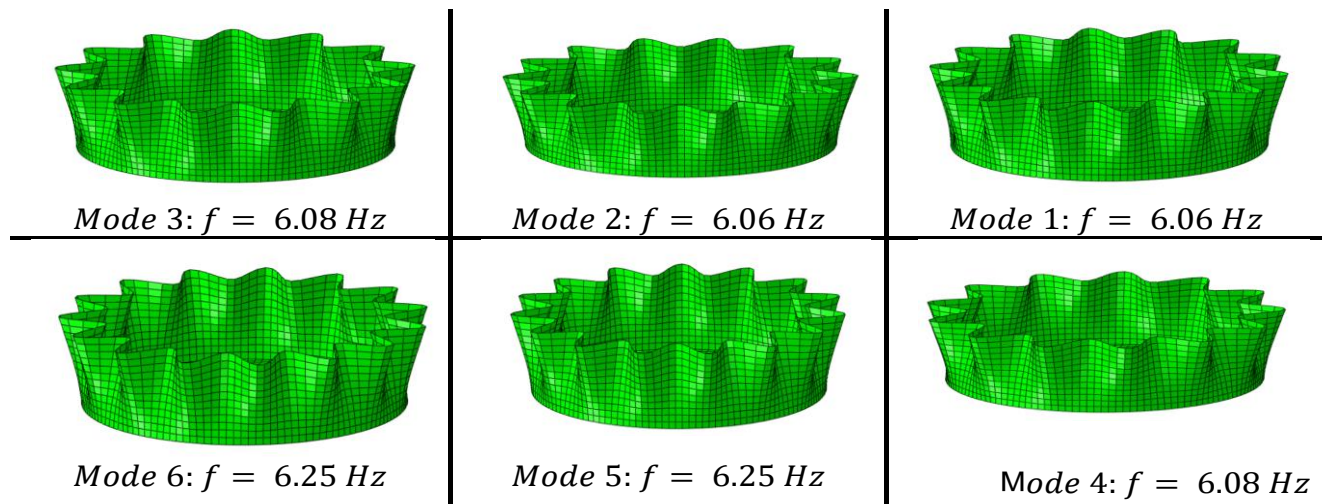
مادة السائل		مادة الفولاذ			مادة البيتون		
معامل الانضغاط (Mpa)	الوزن الحجمي (كغ/م ³)	بواسون	معامل المرونة Es (Gpa)	الوزن الحجمي (كغ/م ³)	بواسون	معامل المرونة Es (Gpa)	الوزن الحجمي (كغ/م ³)
2250	1000	0.30	210	7850	0.25	30	2400

الخزان. في جدار الخزان تستخدم عناصر مساحية (shell) من نوع S4R ويحوي هذا العنصر على أربع عقد وست درجات حرية عند كل عقدة (3 درجات حرية دورانية و3 درجات حرية حركية)، أما السائل فيستخدم لنمذجته عنصر موجي من نوع AC3D8R.

5. مناقشة النتائج:

يبين الشكل (17) أنماط الاهتزاز الستة الأولى للخزان المدروس في حالة خزان فارغ ونلاحظ وجود قيم الترددات على شكل أزواج لان التردد الأول يكون بالاتجاه (x) والثاني بالاتجاه (y)، وقيمة التردد الأصغر 6.06 هرتز وبدور 0.165 ثانية، بالإضافة إلى أن أنماط الاهتزاز للخزان تماثل أنماط الاهتزاز المحورية في الشكل (13).

بعد ذلك تم استخدام طريقة العناصر المنتهية في برنامج الأباكوس باستخدام تحليل من نوع Abaqus/implicit. أُستخدمت طريقة (Couple Acoustic Structure) CAS لنمذجة التفاعل بين السائل والخزان. تُستخدم هذه الطريقة لأنها بسيطة نسبياً وفعالة للمعالجة الرقمية ولا تؤدي إلى حدوث تشوه في تقسيم الشبكة، إضافة إلى ذلك فإن العنصر الموجي (Acoustic) لديه فقط درجة حرية للضغط عند كل عقدة، أي تختصر بشكل كبير الزمن الحسابي المطلوب للنمذجة. ويبين الجدول (3) أبعاد الخزانات المدروسة، أما الجدول (4) خصائص المواد المستخدمة في الأباكوس. ويبين الشكل (16) حيز السائل المستخدم في النمذجة مع تقسيم الشبكة. أما الشكل (15) فيوضح طبيعة الاتصال بين سطح السائل والخزان أي يعبر عن التفاعل المشترك بين عناصر السائل الموجية وعناصر الخزان من أجل ربط انتقالات السائل مع



الشكل (17) أشكال أنماط الاهتزاز للخزان المعدني الفارغ وفق طريقة العناصر المنتهية

الترسيب) كانت 5.20 هرتز بينما في طريقة العناصر المنتهية في برنامج الأباكوس 6.06 هرتز باختلاف بنسبة 14 %،

نلاحظ من الجدول (5) أن قيمة التردد الناتج بطريقة قياسات الضجيج الطبيعي (التجريبية) للخزان المدروس (خزان

الاهتزاز الحر للخزانات الاسطوانية الأرضية المعدنية.....

رقية، عبد الواحد و حسن

ويمكن أن نعزو هذا الاختلاف إلى أن طريقة تسجيلات الضجيج الطبيعي تأخذ بعين الاعتبار تأثير الموقع، فمن الممكن أن تؤدي إلى تضخيم الاهتزاز أو تخميده حسب طبيعة طبقات التربة وسرعة الأمواج القصية فيها. وبهذه الطريقة يمكن القول أن استخدام تقنية ناكومور تمكننا من الحصول على الخصائص الديناميكية الفعلية للخزانات الفارغة.

الجدول (5) قيم التردد للخزان في حالة خزان فارغ (هرتز)

رقم نموذج الخزان	نسبة النحافة H/R	طريقة العناصر المنتهية تسجيلات الضجيج المحيط	نسبة الاختلاف
الخزان المدروس (خزان الترسيب)	0.36	6.06	5.20
			14.19%

وفي حالة الخزان المملوء، تم الحصول على قيم الترددات النبضية والترددات الدفعية للخزان المدروس (خزان الترسيب) في حالة الاستثمار بطريقة تحليلية بالاعتماد على علاقات الكود الأوروبي 2006، وبطريقة رقمية باستخدام طريقة العناصر المنتهية في برنامج الأبأكوس. إضافة إلى إيجاد قيم الترددات للخزان الثاني الأكثر نحافة من الخزان الأول (خزان الترسيب المدروس) وذلك لبيان أثر تغيير الأبعاد الهندسية للخزان (نسبة النحافة) في تغيير الخصائص الديناميكية للخزانات وبالتالي إمكانية تقدير تردد المنشأ وتردد الموقع واختيار مجال ترددي مناسب نتجنب من خلاله ظاهرة التجاوب الطيني.

وبين الجدول (6) والجدول (7) قيم الترددات الدفعية والنبضية لكل من الخزان المدروس (خزان 1) وخزان المقارنة ذو نسبة نحافة مختلفة (خزان 2) التي تم الحصول عليها بطريقة الكود الأوروبي وطريقة العناصر المنتهية ونسبة التفاوت بينهما.

أظهرت النتائج المبينة في الجدول (6) بالنسبة للتردد الدفعي مطابقة الطريقة التحليلية (طريقة الكود الأوروبي) بنسبة 97% و 98% لطريقة العناصر المنتهية لكل من نموذجي الخزائين خزان (1) وخزان (2) على التوالي. وبالنسبة للتردد النبضي فإن النتائج في الجدول (7) تظهر وجود اختلاف حوالي 5%، 12% في قيم الطريقة التحليلية عن قيم طريقة العناصر المنتهية لنموذجي الخزانات خزان (1) وخزان (2) على الترتيب. من الواضح أن قيم الاختلاف في الترددات أعلى في الترددات النبضية منها في الترددات الدفعية وذلك لأن جسم الخزان يدخل في الحساب وهنا الخزان ليس بأكمله معدني بل يتكون من قاعدة بيتونية. نلاحظ من النتائج السابقة أنه يمكن اعتماد طريقة العناصر المنتهية FEM باستخدام طريقة (Couple Acoustic Structure) من أجل إيجاد أنماط الاهتزاز وإيجاد الترددات المسيطرة للخزانات لكل من المركبتين النبضية و الدفعية.

الجدول (6) قيم التردد الدفعي للخزان في حالة الخزان المملئ

الفرق %	التردد الدفعي Convective Frequency		نسبة النحافة H/R	رقم نموذج الخزان
	طريقة العناصر المنتهية (Abaqus)	الكود الأوروبي		
3.20%	0.157	0.152	0.36	الخزان (1)- خزان الترسيب المدروس
1.80%	0.229	0.225	0.81	الخزان (2)- خزان المقارنة

الجدول (7): قيم التردد النبضي للخزان في حالة الخزان المملئ

الفرق %	التردد النبضي Impulsive Frequency		نسبة النحافة H/R	رقم نموذج الخزان
	طريقة العناصر المنتهية (Abaqus)	الكود الأوروبي		
5.7%	13.10	12.39	0.36	الخزان (1)- خزان الترسيب المدروس
11.98%	10.30	11.7	0.81	الخزان (2)- خزان المقارنة

6. الخلاصة:

إظهار تأثير نسبة الأبعاد الهندسية للخران (نسبة النحافة) على قيم الترددات الأساسية للمركبتين النبضية والدفعية بحيث يتم توجيه التصميم مستقبلاً (قطر الخزان وارتفاع السائل) للحصول على مجال ترددي يتجنب حدوث ظاهرة التجاوب الطنيني.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق التمويل رقم (501100020595).

8. References

1. ABAQUS, Inc. (2022). ABAQUS/Standard, User's Manual.
2. Abdul-Wahed, M. K. (2008). Preparation of a computer program for signal processing, evaluation of seismic response in sites and buildings, and other engineering purposes. In Proceedings of the Fifth Gulf Seismic Forum (pp. 1-2). Sana'a, Yemen.
3. Al-Helwani, A., Abdul-Wahed, M. K., & Alfach, M. T. (2020). Dynamic behavior assessment of public buildings in Syria using non-linear time-history analysis and ambient noise measurements: A case study. Asian Journal of Civil Engineering, 21(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00337-w>

تم في هذا البحث تقدير الخصائص الديناميكية لخرانات اسطوانية أرضية تجريبياً باستخدام قياسات الضجيج الطبيعي بتطبيق تقنية ناكومورا للخرانات في حالة خزان فارغ، بالنسبة للخرانات في حالة الملء تحليلاً باستخدام الكود الأوروبي ورقمياً من خلال نموذج ثلاثي أبعاد باستخدام طريقة العناصر المنتهية في برنامج Abaqus، ويمكن تلخيص النتائج التي تم التوصل إليها كالآتي:

- 1- أظهر التسجيلان المنفذان في الموقع أن التردد المسيطر لخران الترسيب حوالي 5.20 هرتز وخران التهوية (6.0 هرتز).
- 2- زدنا تطبيق طريقة ناكومورا التجريبية بقيم الترددات الفعلية وهذا ما أظهرته المعايرة مع النموذج الرقمي (طريقة العناصر المنتهية) حيث أظهر نسبة تطابق بين القيمتين حوالي 83%.
- 3- تطابق قيم الترددات الدفعية في طريقتي الكود الأوروبي والعناصر المنتهية بنسبة 97% و 98% لكل من نمودجي الخرنات خزان (1) وخران (2) على التوالي. وبالنسبة للتردد النبضي أظهرت النتائج تفاوت حوالي 5.7%، 12% في طريقة الكود الأوروبي عن طريقة العناصر المنتهية لنمودجي الخرنات المدروسة خزان (1) وخران (2) على الترتيب. وبالتالي يمكننا اعتماد طريقة CAS من أجل إيجاد أنماط الاهتزاز والترددات المسيطرة للخرانات لكل من المركبتين النبضية والدفعية.

7. التوصيات:

إجراء قياسات تجريبية للخرانات بعد وضعها في الاستثمار ومقارنتها مع طريقة العناصر المنتهية المستخدمة في هذه الدراسة لمعرفة قابلية تطبيق طريقة (Couple – Acoustic Structure CAS) في إيجاد الترددات الأساسية للخرانات الأسطوانية الأرضية.

11. Koller, M. G., Chatelain, J. L., Guillier, B., Duval, A. M., Atakan, K., Lacave, C., Bard, P. Y., & 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. In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (Paper No. 3132). Vancouver.
12. Nachtigall, et.al, (2003). On the analysis of vertical circular cylindrical tanks under earthquake excitation at its base. *Engineering Structures*, 25(3), 201–21
[https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00106-2)
13. Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25-30.
14. Malhotra, P. K., Wenk, T., & Wieland, M. (2000). Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 10(3), 197–201.
<https://doi.org/10.2749/101686600780100054>
15. Rawat, A., Matsagar, V., & Nagpal, A. K. (2018). Seismic analysis of steel cylindrical liquid storage tank using coupled acoustic-structural finite element method for fluid-structure interaction. *The International Journal of Acoustics and Vibration*, 1(1), 1-12.
<https://doi.org/10.20855/ijav.2020.25.11499>
16. Rezaiee-Pajand, M., Aftabi Sani, A., & Kazemian, M. S. (2019). A formula for calculating fundamental natural frequency of partially-filled tanks. *Ocean Engineering*, 186, 106400.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106400>
17. Veletsos, A. S. (1984). Seismic response and design of liquid storage tanks. In *Guidelines for the*
4. Amini, R., Warner, G., & Nayeab-Hashemi, H. (2005). Natural frequency analysis of liquid filled tanks. In *Proceedings of IDETC/CIE 2005: ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 1-2). Long Beach, California, USA.
5. Atakan, K., Azzara, R., Bard, P.-Y., Bonnefoy-Claudet, S., Borges, A., Bottger Sorensen, M., Cara, F., Chatelain, J.-L., Cultrera, G., Di Giulio, G., Durand, F., Duval, A.-M., Fäh, D., Guéguen, P., Guillier, B., Ripperger, J., Teves-Costa, P., Vassiliades, J.-F., Vidal, S., & Wassner, J. (2003). Measurement guidelines: Experimental conditions. SESAME report D08.02.
6. Atakan, K., Bard, P.-Y., Kind, F., Moreno, B., Roquette, P., Tenta, A., & SESAME-Team. (2004). J-SESAME: A standardized software solution for the H/V spectral ratio technique. In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering* (Paper 2270). Vancouver, Canada.
7. Bonnefoy-Claudet, S. (2004). *Nature du bruit de fond sismique: Implications pour les études des effets de site* (Thèse, Joseph Fourier (LGIT), Grenoble, France).
8. European Committee for Standardization. (2021). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance—Part 4: Silos, tanks and pipelines.
9. Fandi, M., & Alyazjeen, T. (2011). Variation of ground-motion amplification and structural dynamic characteristics of Amman citadel. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(6), 1351–1361.
<https://doi.org/10.1007/s12517-011-0359-7>
10. Housner, G. W. (1963). Dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 381-387.

seismic design of oil and gas pipeline systems (pp. 255–370). Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, New York.

18. Yazdani, M., & Ghasemi, S. (2017). Study on fundamental frequencies of cylindrical storage tanks obtained from codes and finite element method. Civil Engineering Infrastructures Journal, 50(1), 135–149. <https://doi.org/10.7508/cej.2017.01.008>