

دراسة الضغط الهيدروديناميكي وارتفاع موجة السائل في الخزانات الاسطوانية الأرضية تحت تأثير أحمال زلزالية باستخدام ABAQUS

هالة توفيق حسن⁽¹⁾

الملخص

تعرضت العديد من خزانات السوائل الأرضية لأضرار جسيمة خلال الزلازل الماضية، وقد شكل ذلك حافزاً كبيراً من أجل الاهتمام بفهم السلوك الزلزالي للخزانات والتنبؤ به، حيث أن التحليل الزلزالي للخزانات المحتوية على سائل تتطلب دراسة خاصة مختلفة عن تحليل المباني حيث يطبق السائل داخل الخزانات قوى هيدروديناميكية على جدرانها وقاعدتها. تعتبر معرفة تطور الضغوط الهيدروديناميكية السائلة أثناء حدوث الزلزال أمراً مهماً لتصميم الخزانات، حيث تم في هذا البحث تطبيق الطريقة التحليلية و طريقة العناصر المحدودة FEM من خلال منهجتي لاغرانج أويلر CEL والتي تعتمد على نظرية الموجة اللاخطية، ومنهجية الطريقة الموجية CAS والتي تعتمد على نظرية الموجة الخطية ومن ثم المقارنة بينهما من أجل إيجاد الضغط الهيدروديناميكي ومركباته النبضية والتدفقية وارتفاع موجة السائل في الخزانات الأرضية الاسطوانية في حالة الاتصال الموثوق مع القاعدة، وأظهرت نتائج الدراسة إمكانية استخدام طريقة العناصر المحدودة بمنهجتي لاغرانج أويلر والطريقة الموجية من أجل إيجاد توزيع الضغوط الهيدروديناميكية على عناصر الخزان وتطابقها بنسبة 95% مع الطريقة التحليلية بالإضافة الى ذلك إمكانية استخدام كلا من المنهجين في حساب ارتفاع موجة السائل حيث الاختلاف بين المنهجين لا يتجاوز 15%. وقد تم أيضاً حساب الضغط النبضي، الضغط التدفقي والضغط الهيدروديناميكي الكلي لنسبتي نحافة للخزانات الأسطوانية 0.6 تمثل الخزانات النحيفة و 1.8 تمثل الخزانات العريضة.

كلمات مفتاحية: التحليل الديناميكي، الخزانات الأرضية، التفاعل المشترك بين السائل والخزان، طريقة CEL، طريقة CAS، ارتفاع موجة السائل، نحافة الخزان الاسطواني

⁽¹⁾ أستاذ مساعد في قسم الهندسة الإنشائية الزلزالية المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية، جامعة دمشق، سورية

Study the hydrodynamic pressure and Sloshing displacement for ground cylinder tanks subjected to seismic motion using ABAQUS

⁽¹⁾ **Hala Tawfek Hasan**

Abstract

Ground water tanks have been severely damaged during past earthquakes, and this constituted a great incentive for the researchers for understanding and predicting the seismic behavior of these types of structures. In addition, seismic analysis of reservoirs containing liquid requires special studies different from the analysis of buildings where the fluid inside the tanks applies hydrodynamic forces to tank elements (walls and base). Evolution of liquid hydrodynamic pressures during an earthquake is important for structural design.

In this paper, the finite element method FEM and the analytical method were applied through the two methodologies, CEL Coupled lagrange Euler approach which depends on the nonlinear wave theory, and the Coupled Acoustic System wave method methodology which is based on the linear wave theory. The results of the seismic response for finding the hydrodynamic pressure and the Sloshing displacement of the liquid in the cylindrical ground tanks in the state fixed base obtained from this study are found to be in close accordance between the Finite element approaches and analytical method (Eurocode method) .

In addition, the study showed the possibility of using the finite element methods in order to find the distribution of the hydrodynamic pressures on the tanks elements by using two approaches Acoustic Method and Coupled lagrange Euler method and the results are very close by percent 95% corresponding with analytical method. In addition, we can use this approaches to find the values of wave height which the difference not exceed 15 %. The impulsive, convective, and total hydrodynamic pressures are investigated for two aspect ratios for cylindrical tanks 0.6 which presents the thin tanks and 1.8 the broad tanks.

Key words: Dynamic analysis, ground Tanks, Fluid Structure interaction, CEL Method, CAS Method, sloshing wave, slenderness of cylinder tanks

⁽¹⁾Associate Professor of Seismic Structural Engineering Department
Higher Institute of Earthquake Studies & Research University of Damascus, Syria

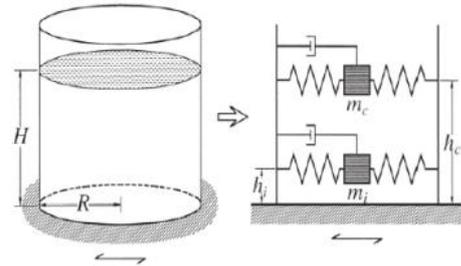
1. المقدمة:

يوجد العديد من الطرق المتاحة من أجل إجراء التحليل الديناميكي للخزانات الحاوية على سوائل تحت تأثير الزلازل، ففي الهندسة التطبيقية يوجد ثلاث طرق مستخدمة في هذا المجال: Housner & Velestos، yang، وطريقة الكود البريطاني بالإضافة الى طريقة العناصر المحدودة والتي تتضمن منهجيات مختلفة من أجل نمذجة طبيعة التفاعل بين الخزان والسائل. ففي أوائل الستينات من القرن الماضي، درس Housner [1] خزانات أسطوانية صلبة خاضعة لإثارة أفقية، وقام بتجزئة الاستجابة الهيدروديناميكية كنتاج مساهمة مركبتين نبضية وأخرى تدفقية. تعزى المركبة النبضية (impulsive) الى الجزء السائل الذي يتحرك مع الخزان (الكتلة الثابتة التي تساهم في قوة العطالة)، بينما المركبة التدفقية (sloshing) التي تشكل الكتلة الحرة (التي تتميز بنوسان ذات دور طويل) تعزى الى جزء السائل القريب من السطح الحر، ومن أجل تمثيل هذه التأثيرات قام هاوسنر [1] بتبسيط طريقة التحليل الهيدروديناميكي في نظام خزان - سائل وقدم مفهوم المكونين الديناميكيين لكتلة السائل: الكتلة النبضية والتدفقية، وتم تطوير النموذج الرياضي للخزانات الاسطوانية كما مبين بالشكل (1) وإيجاد معادلات لحساب كتلة السائل النبضية والتدفقية، وحساب موقع كل منهما بالنسبة الى قاعدة الخزان. وهنا نبين علاقات هاوسنر للخزانات الصلدة الاسطوانية من (1 حتى 7).

تعتبر الخزانات المستخدمة لتخزين السوائل المختلفة منشآت استراتيجية وشريان الحياة، نظراً للاستخدامات الواسعة لها كتخزين مياه الشرب، ونظام مكافحة الحرائق، والصناعات، والمفاعلات النووية. وقد تم توثيق العديد من أنماط الانهيار لخزانات حاوية على سوائل نتيجة زلازل سابقة وذلك بعدة أشكال (تحنيب قدم الفيل، وانزلاق القاعدة، ورفع القاعدة)، والأضرار التي تظهر بالأسقف وأعلى جدران الخزان، ولهذا فإن حماية خزانات السوائل حتى تقاوم المخاطر الزلزالية المحتملة هي الشغل الشاغل لاستراتيجيات التصميم الحالية على مدى العقود الثلاثة الماضية حيث أدى التطور في مجال أجهزة التحكم في الزلازل بالإضافة الى الدراسات العلمية المكثفة في هذا المجال إلى التقليل من حوادث انهيار الخزانات وخروجها عن العمل أثناء حدوث الزلازل.

فالتحليل الزلزالي للخزانات المحتوية على سائل يتطلب دراسة خاصة ويختلف عن تحليل المباني. حيث يطبق السائل داخل الخزانات قوى هيدروديناميكية على جدران الخزان وقاعدته. تعتبر معرفة تطور الضغوط الهيدروديناميكية السائلة أثناء حدوث الزلزال أمراً مهماً لتصميم الخزانات، لأن ضغوط جدار الخزان تعتمد على توزيع التحميل على طول ارتفاع الجدار. إن أول حل لمشاكل هذه المنشآت كان عن طريق (Westergard, 1933)، الذي حدد الضغوط على سد مستطيل يخضع لتسارع أفقي. قدم Hopkins and (Rodriquez, 1934) أول تقرير عن الملاحظات التحليلية والتجريبية لخزانات مستطيلة صلبة تحت تأثير إثارة زلزالية أفقية، أما Jacobsen فقد قام في عامي 1949 و 1951 بتحليل خزان أسطواني صلب يحتوي على سائل وعمود أسطواني محاط بالسائل، يخضع للتسارع الأفقي.

دور الكتلة التدفقية	T_{con}
ارتفاع الكتلة النبضية من القاعدة	h_i
ارتفاع الكتلة التدفقية من القاعدة	h_c
كتلة السائل	m_L
الكتلة النبضية	m_i
الكتلة التدفقية	m_c
الضغط النبضي	$p_i(z)$
ارتفاع السائل	H_L
نصف قطر الخزان	R
زاوية مسقط الخزان	θ



الشكل (1) النموذج الرياضي للخزانات الاسطوانية وفق

هاوسنر [1]

المركبات النبضية: [1]

$$m_i = m \frac{\tanh(1.7 \times \frac{R}{H_L})}{1.7 \times R/H_L} \quad (1) \text{ معادلة}$$

$$h_i = \frac{3}{8} H_L \left\{ 1 + \alpha \left[\frac{m}{m_i} \left(\frac{R^2}{H_L} \right) - 1 \right] \right\} \quad (2) \text{ معادلة}$$

$$p_i(z) = \rho_{Liq} H_L \left(\frac{z}{H_L} - 0.5 \left(\frac{z}{H_i} \right)^2 \right) \sqrt{3} \tanh \left(\frac{\sqrt{3}R}{H_L} \right) \cos(\theta) a_e(t) \quad (3) \text{ معادلة}$$

المركبات التدفقية: [1]

$$m_c = m \frac{0.6 \tanh(1.8 \times \frac{H_L}{R})}{1.8 \times H_L/R} \quad (4) \text{ معادلة}$$

$$k_c = 5.4 \frac{m_i^2 \cdot g \cdot H_L}{m \cdot m^2} \quad (5) \text{ معادلة}$$

$$h_c = H_L \left[1 - 0.85 \frac{m}{m_c} * \left(\frac{R}{H_L} \right)^2 - 0.56 \beta \frac{R}{H_L} \sqrt{\left(\frac{mR}{3} m_c H_L \right)^2 - 1} \right] \quad (6) \text{ معادلة}$$

$$T_{conv} = 2\pi \sqrt{m_c / K_c} \quad (7) \text{ معادلة}$$

$$p_i(z) = \rho_{Liq} H_L \left(\frac{z}{H_L} - 0.5 \left(\frac{z}{H_i} \right)^2 \right) \sqrt{3} \tanh \left(\frac{\sqrt{3}R}{H_L} \right) \cos(\theta) a_e(t), \quad z \leq 1.6L \quad (8) \text{ معادلة}$$

$$p_i(z) = \rho_{Liq} H_L a_e(t), \quad z > 1.6L \quad (9) \text{ معادلة}$$

α : معامل ارتفاع المركز النبضي للخزان الاسطواني، الضغط

القاعدي متضمن ($\alpha=1.33$) وإذا لم يكن متضمنا ($\alpha=0$)

β : معامل ارتفاع المركز النبضي للخزان الاسطواني، الضغط

القاعدي متضمن ($\beta=2$) وإذا لم يكن متضمنا ($\beta=1$)

$a_e(t)$: التسارع الزلزالي في اللحظة الزمنية (t).

تم اشتقاق المعادلة (3) عن طريق هاوسنر بشكل

خاص للخزانات الحاوية على السوائل ذات النسبة

$\frac{H_L}{L} \leq 1.6$ أما بالنسبة للخزانات العريضة ذوات النسبة

$\frac{H_L}{L} > 1.6$ يوجد تصحيح لهاوسنر وهذا التصحيح يكتب

كما في المعادلة (9) بالنسبة للخزانات الاسطوانية [1].

أما الكود الأوروبي (4) Eurocode 8 –part (2006)

[3] فقد استخدم نهج (Veletsos, 1984) [8] للحصول

على توزيع الضغط الهيدروديناميكي في الخزانات

الاسطوانية. واعتمد النموذج الميكانيكي لـ (veletsos &

yang, 1977) [5] من أجل الخزانات الدائرية الصلبة. أما

بالنسبة للخزانات الدائرية المرنة، تم وصف نماذج

Veletsos (1984) و (Haroun, 1981) [6] Housner &

إجراء (Malhotra, 2000) [2]. فقد تم اقتراح نموذج

Housner (1963) بالنسبة للخزانات المستطيلة الصلبة.

ومن أجل التصميم بشكل أولي، قام الكود الأوروبي

بالاعتماد على تقسيم هاوسنر كما في الشكل (2) حيث تم

تقسيم السائل الى نظامين كل واحد منهما وحيد درجة

الحرية. الأول هو مركبة نبضية تشكل شروط محيطية مع جدران وقاعدة الخزان (يمكن عدم أخذ تأثير القاعدة بعين الاعتبار) وتُعطى هذه المركبة من خلال التوازن الحركي بين السائل وسرعة المنشأ أو تسارعه، مع الانتباه إلى أن هذه المركبة لا تأخذ بعين الاعتبار موجة السطح الحر، والثاني هو المركبة التدفقية، وهذه المركبة هي المعاكس تماماً لاستجابة المركبة النبضية، وتأخذ فقط بعين الاعتبار الأمواج السطحية وتهمل الشروط المحيطية على قاعدة وجدران الخزان.

تمثل المتغيرات:

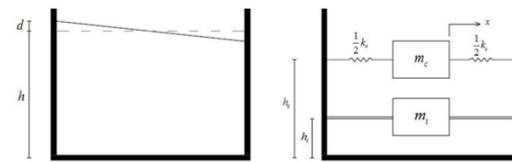
الدور النبضي	T_{imp}
الدور التدفقي	T_{con}
ارتفاع السائل	H
نصف قطر الخزان	R
سماكة الجدران المنتظمة المكافئة	s
كثافة كتلة السائل	ρ_{liq}
معامل مرونة جدران الخزان	E
معامل الدور الطبيعي الأساسي النبضي	C_i
معامل الدور الطبيعي الأساسي التدفقي	C_c

وقد بسّط الكود الأوروبي علاقات veletsos & yang [5] من أجل ابعاد مختلفة للخزانات موضحة في الجدول (1) والذي يتضمن معاملات الدور الطبيعي والكتلة النبضية والتدفقية، والارتفاعات مع وبدون أخذ تأثير القاعدة.

الجدول (1) معاملات الدور الطبيعي والكتلة النبضية والتدفقية والارتفاعات

مع وبدون أخذ تأثير القاعدة وفق الكود الأوروبي [3]

H/R	C_i	C_c ($s/m^{0.5}$)	m_i/m	m_c/m	h_i/H	h_c/H	h'_i/H	h'_c/H
0.3	9.28	2.09	0.176	0.824	0.400	0.521	2.640	3.414
0.5	7.74	1.74	0.300	0.700	0.400	0.543	1.460	1.517
0.7	6.97	1.60	0.414	0.586	0.401	0.571	1.009	1.011
1.0	6.36	1.52	0.548	0.452	0.419	0.616	0.721	0.785
1.5	6.06	1.48	0.686	0.314	0.439	0.690	0.555	0.734
2.0	6.21	1.48	0.763	0.237	0.448	0.751	0.500	0.764
2.5	6.56	1.48	0.810	0.190	0.452	0.794	0.480	0.796
3.0	7.03	1.48	0.842	0.158	0.453	0.825	0.472	0.825



الشكل (2) يبين النظام الديناميكي المكافئ للخزان بحسب هاوزنر، والكتل المجمعّة: الكتلة النبضية (m_i) والكتلة التدفقية (m_c) المكافئة للقوى الناتجة عن ضغط السائل

بالنسبة للتطبيقات العملية فقد تم في هذا الكود أخذ تأثير اهتزاز الأنماط الأولى فقط في التحليل. حيث يتم الحصول على الكتلة والارتفاع والدور الطبيعي لكل نظام SDOF بالطرق بواسطة Veletsos وآخرون. أما بالنسبة لحركة أرضية زلزالية معينة، فيمكن حساب استجابة أنظمة SDOF المختلفة بشكل مستقل ثم دمجها لإعطاء قيمة القص القاعدي الصافي وعزم الانقلاب.

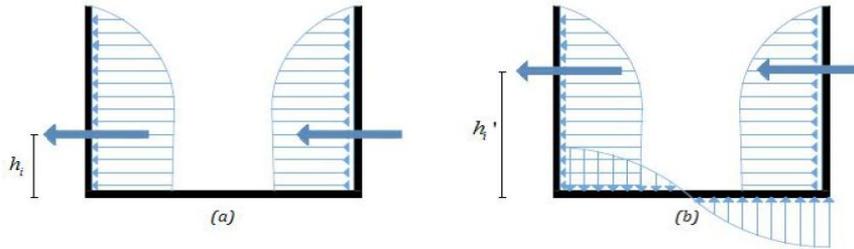
فقط الدور الأساسي للمنشأ يؤخذ بعين الاعتبار بينما الأدوار العليا فيتم إهمالها والدور الطبيعي للاستجابة النبضية والتدفقية يحسب بالثانية بالعلاقات التالية [3]:

$$T_{imp} = C_i \frac{\sqrt{\rho_{liq} \cdot H}}{\sqrt{s/R \cdot \sqrt{E}}} \quad \text{معادلة (10)}$$

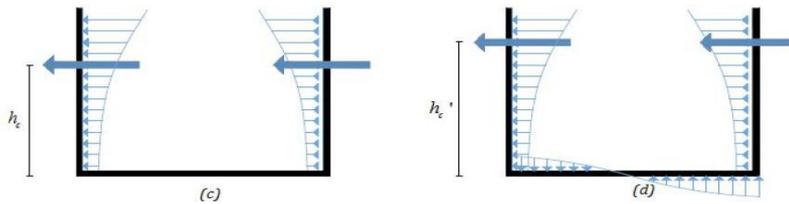
$$T_{con} = C_c \cdot \sqrt{R} \quad \text{معادلة (11)}$$

النبضي والتدفقي للجدار h_c ، h_i على الترتيب. أما عند أخذ تأثير الضغط الهيدروديناميكي للقاعدة بالإضافة الى الجدران بعين الاعتبار، يرمز لها بالشكل ($h'c$ و $h'i$). وهذا يتضح أكثر في الشكل (3).

يتم اشتقاق كلا من الكتلتين النبضية (m_i) والتدفقية (m_c) من تقسيم تكامل استجابة الضغط المتعلقة بالارتفاع مع اعتبار التسارع، مع ملاحظة أن كتلة السائل الكلية m عبارة عن مجموع الكتلتين ($m_i + m_c$)، ويتم تعريف الارتفاع من القاعدة إلى مركز الضغط الهيدروديناميكي



(a) الضغط على الجدار (b) الضغط النبضي على الجدار والقاعدة



(c) الضغط التدفقي على الجدار (d) الضغط التدفقي على الجدار والقاعدة

الشكل (3) يبين توزيع الضغوط النبضية والتدفقية والارتفاعات المركزية [3]

المحدودة في برنامج ABAQUS [10]، وتعتبر العناصر الاويلرية في هذه الطريقة مائة من أجل نمذجة تدفق السوائل لأنها تسمح بمرور المادة من خلال الشبكة بدون أن تنتشوه (الشبكة الأويلرية لا تنتشوه). وتشكل عناصر أويلر جزيئات السائل بينما عناصر لاغرانج فتمثل بجدران الخزان. وبالنسبة لطبيعة التفاعل بين جدران الخزان والسائل فيتم نمذجتها باستخدام الاتصال العام حيث تقوم بتعريف الاتصال بين السائل والجدران في الاتجاه المماسي بـ (Frictionless interface)، أما نوع الاتصال بين السائل والجدران في الاتجاه العمودي بـ (Hard contact)، أما منهجية الطريقة الموجية (Acoustic System CAS Coupled): فإن ال العناصر الموجية تشكل حقل فيزيائي يدرس توليد انتشار، امتصاص وارتداد موجة ضغط

2. طرق العناصر المحدودة المستخدمة في

الدراسة:

تتنوع الطرق التي تقوم بدراسة السلوك الزلزالي للخزانات الأرضية لتميزها بالتفاعل المشترك بين السائل والخزان فبالإضافة الى الطرق التحليلية التي تم استعراضها سابقاً، يتم استخدام طريقة العناصر المحدودة FEM وذلك بتطبيق العديد من المنهجيات باستخدام برنامج الأباكوس من أجل دراسة السلوك الزلزالي وأثر التفاعل المشترك وتحديد قيم الضغط الهيدروديناميكي والانتقال التدفقي للسائل (ارتفاع موجة السائل) في خزانات السوائل الخاضعة للإثارة الزلزالية. حيث تعتبر منهجية لاغرانج اويلر (CEL COUPLE Euler-Lagrange): إحدى طرق العناصر

3. المقارنة بين الضغط الهيدروديناميكي للسائل ومركبتيه النبضية والتدفقية وذلك لنموذج ثلاثي الأبعاد لخزان أسطواني.
4. دراسة بارامترية تتمثل بنسبتي نحافة مختلفتين باعتبار حالة الاتصال الموثوق مع القاعدة (Fixed base).

4. النموذج المدروس والحمولات المطبقة:

تم في هذا البحث إجراء تحليل (Explicit) بطريقة العناصر المحدودة باستخدام برنامج الأباكوس لنوعين من الخزانات الاسطوانية الأرضية الغير مسقوفة (الخزان الأول هو خزان عريض ذو نسبة نحافة 0.6 بقطر 0.3 وارتفاع 0.2 وبارتفاع سائل 90% من ارتفاع الخزان أي 0.18م، والخزان الثاني هو خزان نحيف ذو نسبة نحافة 1.8 بقطر 0.3 وارتفاع 0.6 وبارتفاع سائل 90% من ارتفاع الخزان أي 0.54 م) ومبينة بالجدول (3)، أما بالنسبة للحمولات المطبقة، فبالإضافة الى حمولة الوزن الذاتي للخزان والسائل تم تطبيق حمل زلزالي سجله مبيّن في الشكل (4)، خواصه مبينة في الجدول (2).

الصوت في أوساط السائل ومن فوائد استخدام هذه الطريقة CAS انها بسيطة نسبياً وفعالة للمعالجة العددية لأنها تعتبر (no flow material). بالإضافة إلى أن العنصر الموجي (Acoustic) لديه درجة حرية للضغط عند كل عقدة، أي تختصر الزمن المطلوب لعملية النمذجة. ومن الإجراءات التحليلية للعناصر المحدودة في طريقة CAS أنه يتم نمذجة السائل كعناصر Acoustic Elements واستخدام عناصر لاغرانج من أجل نمذجة الخزان، وكذلك فإن الشروط المحيطية المقاومة تعرف عند السطح الحر لعنصر ACOUSTIC باستخدام نظرية الموجة الخطية.

أما طبيعة الاتصال بين جدران الخزان والسائل فتعرف باستخدام (surface-based tie constraint) والتي تسمح لكلا السطحين بالاتصال من خلال عملية النمذجة. بالإضافة الى ذلك، نفرض من خلال (tie constraint) نفس الضغط والحركة على كل عقدة من سطح السائل وبالعقدة الأقرب على سطح الخزان الأقرب إليها.

3. أهداف البحث:

يهدف هذا البحث الى حساب الضغط الهيدروديناميكي في خزانات السوائل الاسطوانية الأرضية وإيجاد ارتفاع موجة السائل تحت تأثير حمل زلزالي وذلك من خلال:

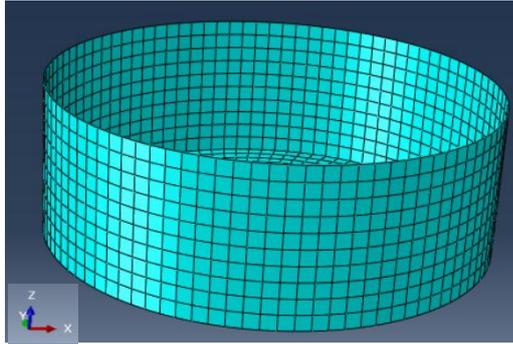
1. حساب تحليلي وفق الكود الأوروبي (Eurocode Method)
2. تطبيق منهجيتي CEL و CAS، لطريقة العناصر المحدودة FEM باستخدام برنامج العناصر المحدودة (ABAQUS V 6.14).



الشكل (4) يبين السجل الزلزالي لزلزال كوبي

الجدول (2) يبين مواصفات الهزة المطبقة

العام	مكان الحدث	المدة	المحتوي الترددي (HZ)	التسارع الأرضي الأعظمي	الخصائص الديناميكية للهزة
1995	japan	25	2.76	0.883	Kobe



الشكل (5) الخزان العريض في الإباكوس ميبنا تقسيم الشبكة

حيث تم دراسة خزانات اسطوانية بمعامل مرونة

$(E=210 \text{ E}+9 \text{ pa})$ ومعامل بواسون $(\nu=0.3)$ والكثافة

الحجمية $(\rho=7850\text{kg/m}^3)$ ، أما مواصفات السائل المستخدم

موضحة بالجدول (4).

الجدول (3) مواصفات الخزانات المدروسة

نوع الخزان	قطر الخزان (m)	نسبة النحافة (HL/R)	ارتفاع السائل HL(m)
خزان عريض (broad)	0.3	0.6	0.18
خزان نحيف (slender)	0.3	1.80	0.54

الجدول(4): مواصفات السائل ضمن الخزانات وفق

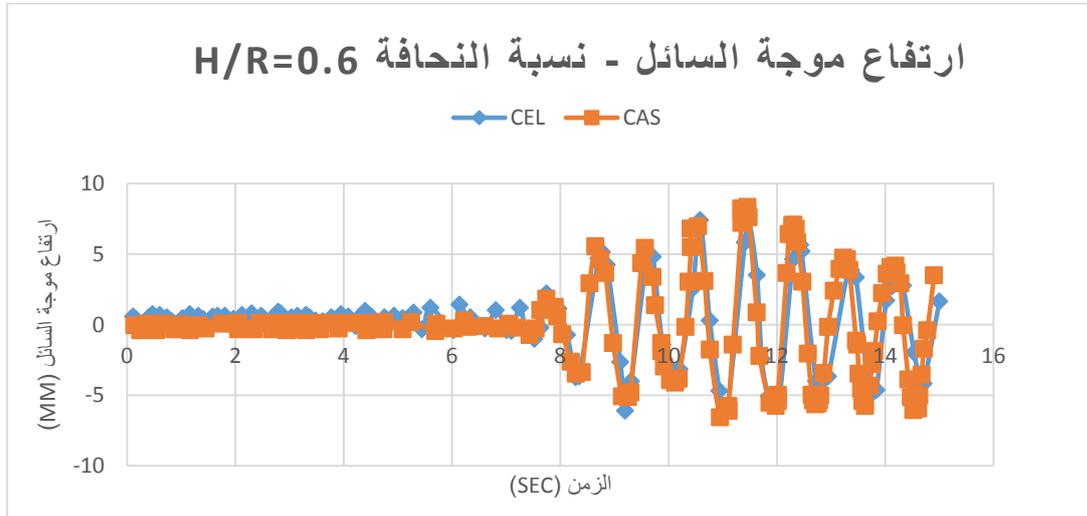
منهجيتي الدراسة

معادلة الحالة (EOS)			اللزوجة N.sec/m ²	كثافة السائل (Kg/m ³)	المعامل الحجمي (Mpa)
ثابت المادة Γ_0	ثابت المادة S	سرعة الصوت (m/sec)			
0	0	1500	0.001	1000	2150

5. الاستنتاجات والمناقشة:

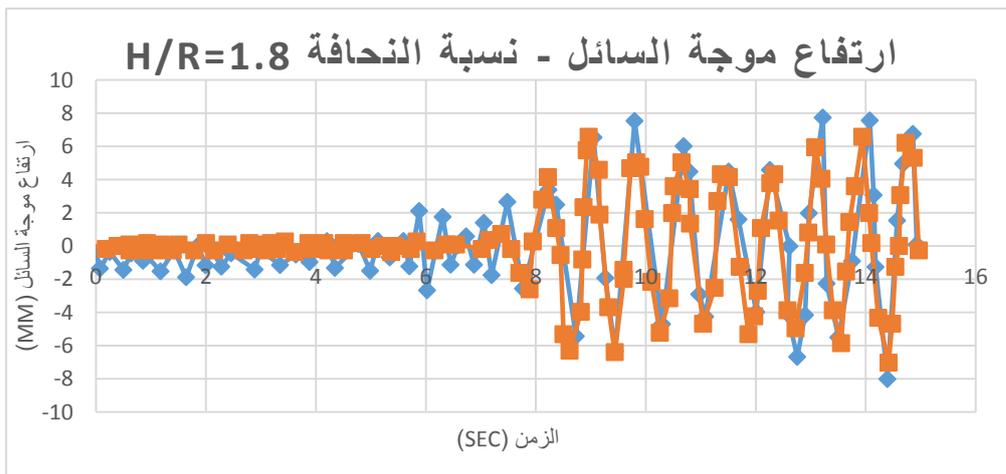
تم إيجاد ارتفاع الموجة التدفقية لعقدة من سطح السائل من خلال طريقتي العناصر المحدودة المستخدمتين في الدراسة وهما طريقة لاغرانج اويلر (CEL) والطريقة

الموجية (CAS)، وذلك لعقدة من سطح السائل خلال ثانية في حالة الخزان الاسطواني ذو نسبة النحافة تطبيق السجل الزلزالي لزلزال كوبي لفترة زمنية مدتها 15 (H/R=0.6) كما هو موضح بالشكل (6).

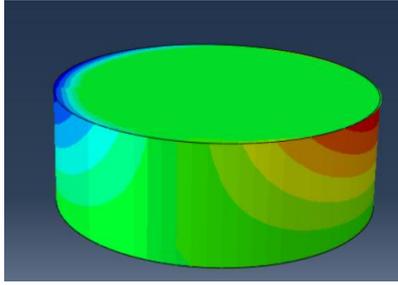


الشكل (6) الانتقال التدفقي خلال فترة تطبيق الزلزال للخزان الاسطواني ذو نسبة النحافة (H/R=0.6)

وأيضاً تم إيجاد ارتفاع الموجة التدفقية لعقدة من سطح السائل من خلال منهجيتي طريقة العناصر المحدودة المستخدمة في الدراسة وهما طريقة لاغرانج اويلر (CEL) والطريقة الموجية (CAS)، وذلك لعقدة من سطح السائل خلال تطبيق السجل الزلزالي لزلزال كوبي لفترة زمنية مدتها 15 ثانية في حالة الخزان الاسطواني ذو نسبة النحافة (H/R=1.8) كما هو موضح بالشكل (7).

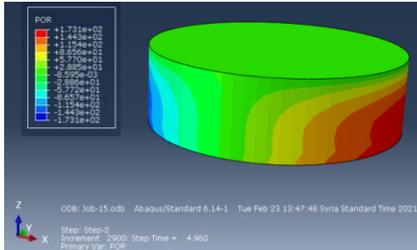


الشكل (7) الانتقال التدفقي خلال فترة تطبيق الزلزال للخزان الاسطواني ذو نسبة النحافة (H/R=1.8)

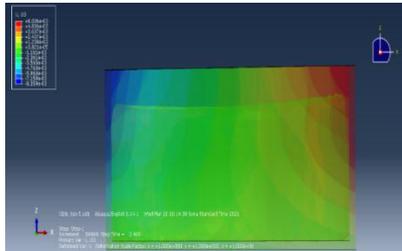


الشكل (9) توزيع الضغط التدفقي في الخزان الاسطواني العريض باستخدام منهجية CAS.

كما في الشكل (11)، أما الشكل (9) فيوضح أماكن توزيع الضغط التدفقي وفق منهجية CAS، والشكل (10) يوضح الضغط الهيدروديناميكي وفق منهجية CAS.



الشكل (10) شكل الضغط الهيدروديناميكي في الخزان الاسطواني العريض باستخدام منهجية CAS



الشكل (11) شكل موجة السائل في الخزان الاسطواني العريض باستخدام منهجية CEL

تم حساب قيم الضغط الهيدروديناميكي التدفقي والنبضي وذلك على كامل ارتفاع الخزان بالنسبة للخزان الاسطواني ذو نسبة النحافة (H/R=0.6) وذلك بطريقتي العناصر المحدودة المستخدمتين في الدراسة وهما طريقة لاغرانج أويلر (CEL) والطريقة الموجية (CAS) والطريقة التحليلية وإجراء المقارنة بينها وتم عمل معايرة

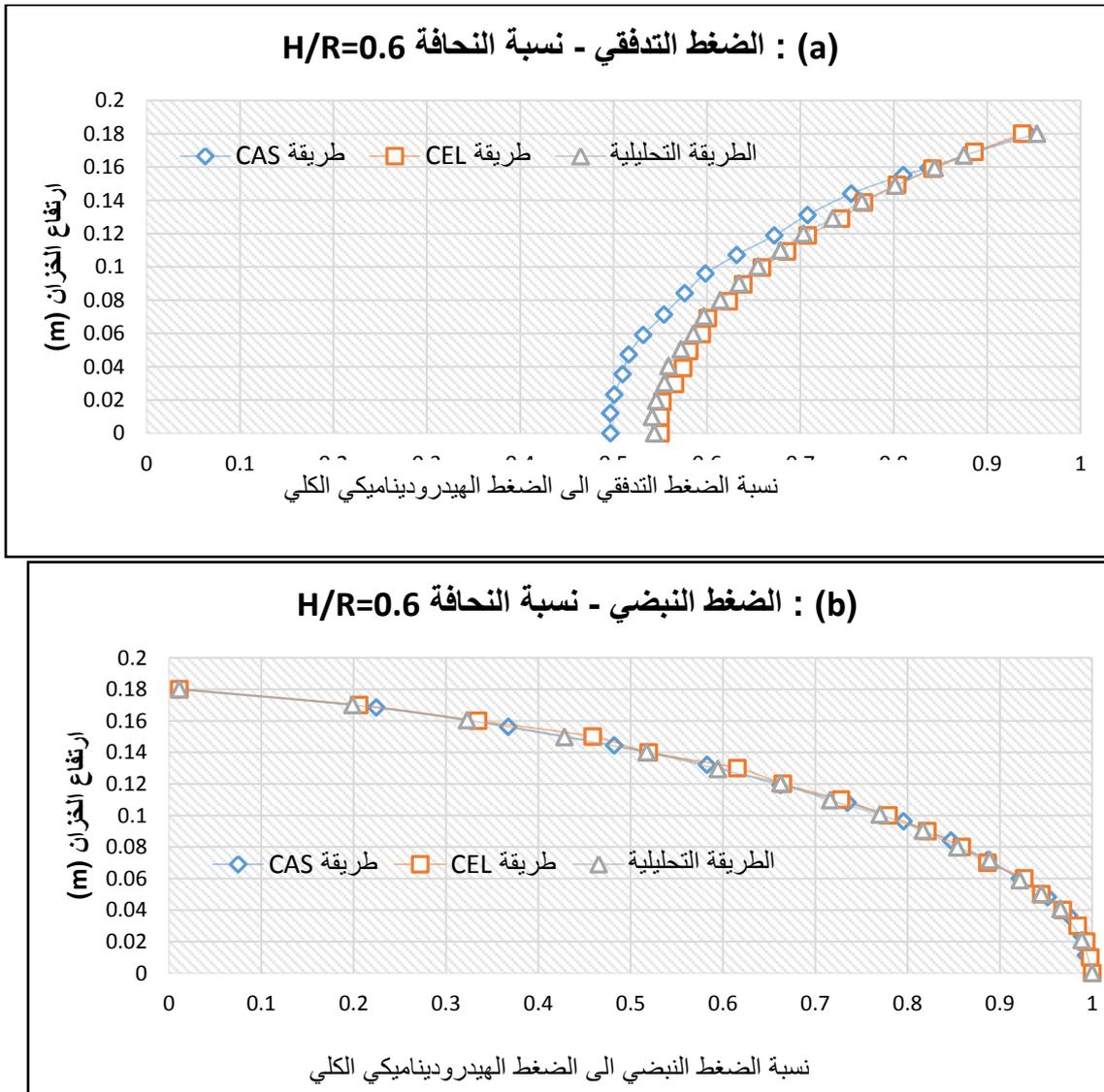
نلاحظ من الأشكال السابقة (6) و(7) ومن الجدول (4) أن القيمة الأعظمية لارتفاع موجة السائل خلال فترة حدوث الزلزال في حالة الخزان الاسطواني العريض (ذو نسبة النحافة 0.6) تساوي 8.23 مم وفق طريقة CAS بينما تساوي 7.2 مم وفق طريقة CEL بنسبة اختلاف حوالي 12.5 %، بينما بلغت القيمة الأعظمية لارتفاع الموجة في حالة الخزان الاسطواني (ذو نسبة النحافة 1.8) 7.74 مم وفق طريقة CAS بينما تساوي 6.58 مم وفق طريقة CEL بنسبة اختلاف بين الطريقتين حوالي 15 %، كما اننا نلاحظ ارتفاع موجة السائل في الخزان الموافق لنسبة النحافة 0.6 أكبر من تلك الناتجة في الخزان النحيف ذو نسبة النحافة 1.8 وببين الجدول (4) النتائج.

الجدول (4) يبين القيم الأعظمية لارتفاع الموجة التدفقية

الاختلاف (%)	حالة H/R=1.8	حالة H/R=0.6	
6 %	7.74	8.23	القيمة الأعظمية لارتفاع موجة السائل (sloshing) بطريقة العناصر المحدودة - منهجية CAS
8.6 %	6.58	7.2	القيمة الأعظمية لارتفاع موجة السائل (sloshing) بطريقة العناصر المحدودة - منهجية CEL
	15 %	12.5 %	التباين بين الطريقتين (%)

كما يبين الجدول (4) النسبة المئوية للتباين في ارتفاع موجة السائل بين الخزانات العريضة والخزانات النحيفة. ويمكن أن ننسب هذا الاختلاف بين الطريقتين لاعتماد طريقة لاغرانج أويلر (CEL) على نظرية الموجة اللاخطية بينما الطريقة الموجية (CAS) تعتمد على نظرية الموجة الخطية. كما تبين الأشكال التالية ارتفاع موجة السائل في برنامج الاباتكوس وفق منهجية CEL

(normalize) [7] لقيمة الضغط الهيدروديناميكي حيث النبضية والتدفقية من قيمة الضغط الكلي ولكي تسهل عملية المقارنة مع الطريقة التحليلية كما في الشكل (12) تم إيجاد نسبة كلاً من الضغط النبضي والضغط التدفقي الى الضغط الكلي من أجل معرفة نسبة ما تشكله الضغوط



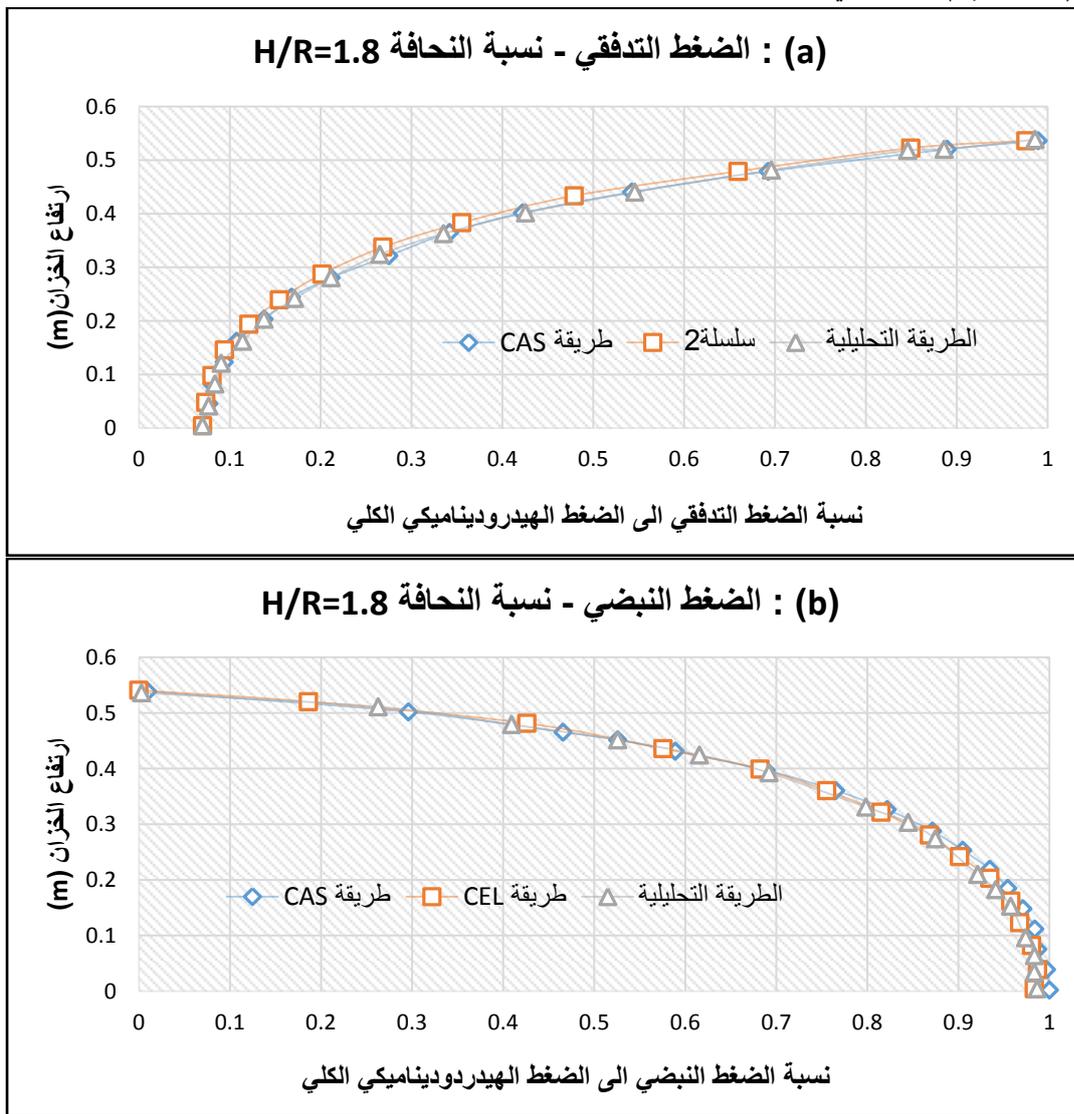
الشكل (12) يبين مركبات الضغط الهيدروديناميكي النبضية (b) والتدفقية (a) على كامل ارتفاع الخزان (نسبة النخافة 0.6)

ويبين الشكل (12) مركبتي الضغط النبضية والتدفقية للضغط الهيدروديناميكي على طول ارتفاع الخزان الأسطواني، ونلاحظ من الشكل في حالة توزيع الضغط النبضي تطابق بحوالي 98% بين منهجيتي العناصر المحدودة المستخدمتين في الدراسة والطريقة التحليلية بينما في توزيع الضغط التدفقي نلاحظ تطابق بحوالي 98%

المستخدمتين في الدراسة (طريقة لاغرانش اويلر (CEL) والطريقة الموجية (CAS) والطريقة التحليلية وإجراء المقارنة بينها وتم عمل معايرة (normalize) [7] (نسبة كلاً من الضغط النبضي والضغط التدفقي إلى الضغط الكلي) لقيمة الضغط من أجل إجراء عملية مقارنة مع الطريقة التحليلية كما هو مبين بالشكل (13).

بين الطريقة التحليلية ومنهجية CEL واختلاف في طريقة (CAS) بحوالي 10 % وذلك في حالة الخزان الاسطواني ذو نسبة النحافة 0.6 ويمكن تبرير هذا الاختلاف باستخدام الطريقة الموجية نظرية الموجة الخطية.

وأيضاً تم حساب قيم الضغط الهيدروديناميكي التدفقي والنبضي على كامل ارتفاع الخزان الاسطواني ذو نسبة النحافة (H/R=1.8) بطريقتي العناصر المحدودة



الشكل (13) يبين مركبات الضغط الهيدروديناميكي النبضية (b) والتدفقية (a) على كامل ارتفاع الخزان (نسبة النحافة 1.8)

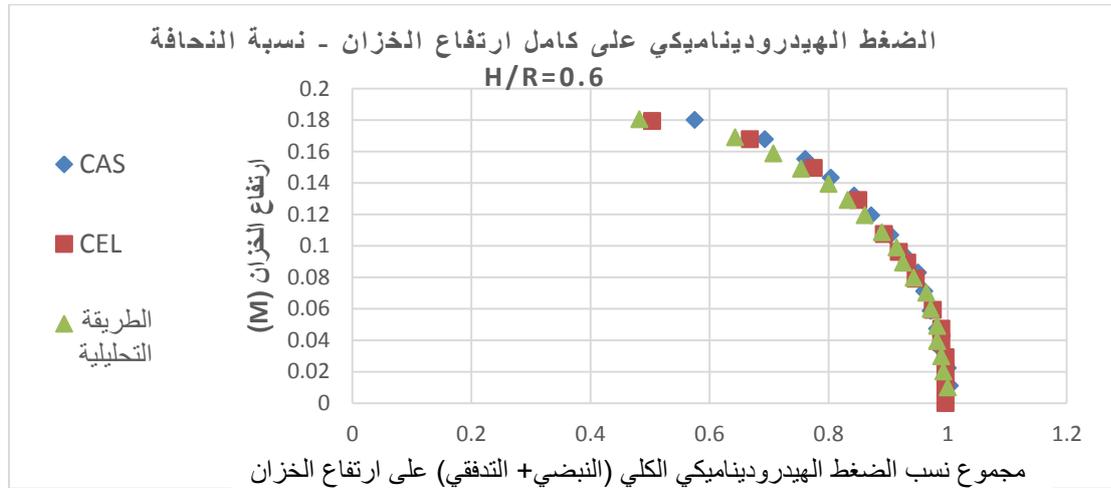
التحليلية وحساب النسبة بين الضغط الهيدروديناميكي الأعظمي والضغط الهيدروستاتيكي (الضغط الذي يطبقه السائل على جدران الخزان ويتعلق بارتفاع السائل والكثافة الحجمية للسائل)، حيث بلغت النسبة (0.007) في الخزان ذو نسبة النحافة 0.6، حيث يبين بالشكل (14) قيمة الضغط الهيدروديناميكي على طول ارتفاع الخزان والذي ينتج من جمع مكونات الضغط النبضي والضغط التدفقي.

والشكل (14) يبين أن قيم الضغط الهيدروديناميكي الكلية المحسوبة باستخدام الطريقة التحليلية وطريقة العناصر المحدودة هي نفسها تقريباً بالنسبة للخزان الاسطواني العريض

يبين الشكل (13) مركبتي الضغط النبضية والتدفقية للضغط الهيدروديناميكي على طول ارتفاع الخزان الاسطواني ذو نسبة النحافة 1.8، حيث نلاحظ تطابق في توزيع الضغوط النبضية والتدفقية بنسبة 98% على كامل ارتفاع الخزان بين طرق العناصر المحدودة المستخدمة في الدراسة والطريقة التحليلية. وكنتيجة عامة مما سبق نجد تطابق بنسبة 98% في توزيع المركبات النبضية والتدفقية للضغط الهيدروديناميكي على كامل ارتفاع الخزان بين طرق العناصر المحدودة المستخدمة في الدراسة والطريقة التحليلية في حال الخزانات النحيفة، بينما في حالة الخزانات العريضة فإن طريقة العناصر المحدودة بمنهجية (CAS) تخفض من قيمة الضغط النبضي بنسبة 10% الناتج عن طريقة العناصر المحدودة بمنهجية لاغراندج اويلر (CEI) كما هو مبين بالشكل (a12). وبشكل عام يُظهر الضغط النبضي توزيعاً منتظماً على طول ارتفاع الخزان، حيث تعتبر المركبة النبضية هي المركبة الرئيسية للضغط الهيدروديناميكي الذي يؤثر على استقرار الخزان وقيمته الأعظمية في أسفل جدران الخزان. أما وتكون القيمة الأعظمية للضغط التدفقي على السطح العلوي للخزان حيث تحدث حركة موجة السائل.

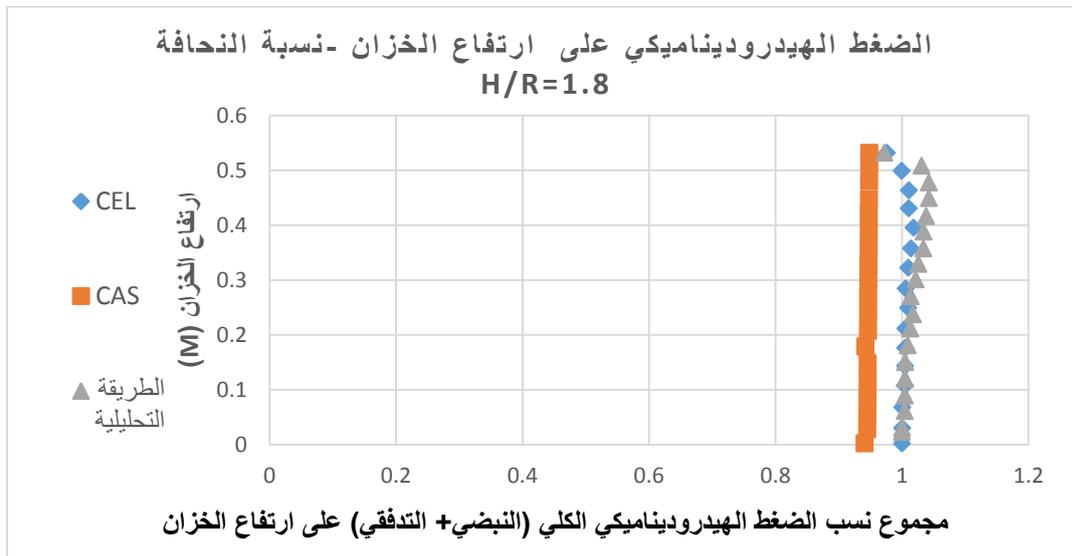
تبين النتائج السابقة أن ارتفاع موجة السائل أو ما نسميه انتقال المركبة التدفقية اللاخطية (طريقة CEL) لا تلعب دوراً مهماً في حساب التوزيع الهيدروديناميكي المطبق على جدران الخزان الصلب. وتكون مساهمتها أكبر في حالة الخزانات العريضة (نسب النحافة المنخفضة) حيث تشكل ضغط أكبر في قاعدة الخزان. وخاصة عند حساب قوى القص القاعدي وعزوم الانقلاب عند قاعدة الخزان.

وقد تم حساب الضغط الهيدروديناميكي في الخزان الاسطواني بطريقة العناصر المحدودة FEM والطريقة



الشكل (14) الضغط الهيدروديناميكي الكلي (النبضي + التدفقي) على ارتفاع الخزان (نسبة النحافة 0.6)

وقد تم أيضاً حساب الضغط الهيدروديناميكي بطريقة العناصر المحدودة والطريقة التحليلية، وحساب النسبة بين الضغط الهيدروديناميكي الأعظمي والضغط الهيدروستاتيكي، (الضغط الذي يبطقة السائل على جدران الخزان ويتعلق بارتفاع السائل والكثافة الحجمية للسائل)، والتي بلغت في هذه الحالة (0.004) للخزان ذو نسبة النحافة 1.8 كما هو مبين بالشكل (15).



الشكل (15) الضغط الهيدروديناميكي الكلي (النبضي + التدفقي) على ارتفاع الخزان (نسبة النحافة 1.8)

نلاحظ من الشكلين (14) و (15) يتم توزيع الضغط الكلي على طول ارتفاع الخزان بشكل مكافئ في حالة الخزان العريض، بينما في حالة زيادة نسبة النحافة في الخزان، يتم توزيع الضغط الكلي بشكل موحد تقريباً

تركزها في قاع الخزان حسب ما أظهرت الأشكال السابقة (12b,13b)، بينما القيمة الأعظمية للضغط التدفقي تكون عند السطح العلوي للسائل وتأثيرها يظهر بالضغط على جدران الخزان.

3. كلاً من الطريقتين قادرتان على حساب ارتفاع الموجة التدفقية حيث أن الاختلاف بين الطريقتين لا يتجاوز 15% كما أن التطابق بين قيم الضغط الهيدروديناميكي بين المنهجيتين في طريقة العناصر المحدودة والطريقة التحليلية بنسبة تصل لحدود 95% للحالات المدروسة، مع ملاحظة أن طريقة لاغرانج اويلر (CEL) تستطيع حساب السعات الصغيرة لارتفاع الموجة التدفقية بشكل أفضل من الطريقة الموجية (CAS) لاعتمادها على نظرية الموجة اللاخطية.

7. التوصيات:

نوصي في الدراسات المستقبلية بدراسة تأثير تغيير ارتفاع السائل ضمن الخزانات المدروسة وإمكانية تطبيق طريقة العناصر المحددة FEM في برنامج ABAQUS مع استخدام المنهجيتين اللتين تم استخدامهما في الدراسة (لاغرانج اويلر CEL والطريقة الموجية CAS) فيما لو تم إدخال أثر التفاعل المشترك بين التربة والخزان.

على طول ارتفاع الخزان، ونلاحظ أيضاً وجود تطابق في قيم الضغط الكلي لكل من طريقتي العناصر المحدودة والطريقة التحليلية في الخزان العريض بينما في حال الخزان النحيف تقارب كبير بين طريقة العناصر المحدودة CEL والطريقة التحليلية بينما تختلف عن طريقة العناصر المحدودة CAS والتي تعتمد على نظرية الموجة الخطية بحدود 6% (حيث نسبة الضغط عند قاع الخزان بالنسبة لطريقة العناصر المحدودة CEL 1 إلى 0.94 لطريقة العناصر المحدودة CAS) والشكل يبين أن قيم الضغط الهيدروديناميكي الكلية المحسوبة باستخدام الطريقة التحليلية وطريقة العناصر المحدودة هي نفسها تقريباً بالنسبة للخزان الاسطواني العريض.

6. النتائج:

تم في هذا البحث دراسة نموذج ثلاثي الأبعاد لخزانات سوائل اسطوانية أرضية، خاضعة لإثارة زلزالية ولنسبتي نحافة مختلفتين بالطريقة التحليلية وطريقة العناصر المحدودة FEM بمنهجيتي (الطريقة الموجية CAS وطريقة لاغرانج اويلر CEL) بإجراء تحليل نوع (Explicit) باستخدام برنامج العناصر المحدودة (ABAQUS (V6.14) من أجل إيجاد ارتفاع موجة السائل وإيجاد قيم الضغط الهيدروديناميكي على جدران الخزانات الاسطوانية ومن أهم النتائج التي تم التوصل لها:

1. إمكانية اعتبار المنهجيتين المستخدمتين في طريقة العناصر المحدودة ببرنامج ABAQUS قادرتين على حساب قيمة الضغط الهيدروديناميكي في خزانات السوائل وبدقة 95% مقارنة مع الطريقة التحليلية.
2. مركبة الضغط النبضية ذات تأثير كبير على استقرار الخزان بالمقارنة مع المركبة التدفقية بسبب

Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris (eds.) Crete Island, Greece, 25–27 May 2015

- [12] Hoang Nam PHAN et al. Fluid-structure interaction problems: an application To anchored and unanchored steel storage tanks Subjected to seismic loadings. Earthquake engineering, 16 European conference 18-21 june 2018.

Received	2021/4/25	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2021/9/5	قبول البحث للنشر

References

8. المراجع

- [1] Housner GW. The dynamic behavior of water tanks. Bulletin of the Seismological Society of America 1963; 53(2):381–9.
- [2] P.K.Malhotra, T.Wenk, and M.Wieland, “Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks,” Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), vol.10, no.3, pp.197–201, 2000.
- [3] European Committee for Standardization, “Euro code 8: design of structures for earthquake resistance—part 4: silos, tanks and pipelines,” EN 1998-4, 2006.
- [4] IITK, IITK-GSDMA Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks—Provisions with Commentary and Explanatory Examples, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, India, 2005.
- [5] Veletsos AS, Yang JY. Earthquake response of liquid storage tanks advances in civil engineering through mechanics. In: Proceedings of the second engineering mechanics specialty conference. Raleigh (NC): ASCE; 1977. p. 1–24.
- [6] Haroun MA, Housner GW. Earthquake response of deformable liquid storage tanks. Journal of Applied Mechanics 1981; 48(2):411–8.
- [7] Virella JC, Godoy LA, Suárez LE. Effect of prestress states on the impulsive modes of vibration of cylindrical tank-liquid systems under horizontal motion. Journal of Vibration and Control 2005; 11(9): 1195–220.
- [8] Veletsos AS, Shivakumar .Tanks containing liquids or solids. In: Beskos DE, Poulos A, editors. Computer analysis and design of earthquake resistant structures: A Handbook, 3; 1997. p. 725–73 [chapter 15].
- [9] Kamila Kotrasova and Eva Kormanikova. The Study of Seismic Response on Accelerated Contained Fluid. Hindawi Advances in Mathematical Physics Volume 2017, Article ID 1492035, pages 9.
- [10] ABAQUS/Explicit Users' Manual, Version, 6.14 Dassault Systems Simulia Corporation, Rhode Island (RI), USA, 2014.
- [11] Aruna et al .Seismic analysis of base-isolated cylindrical liquid storage tank using coupled acoustic-structural interaction .5th ECCOMAS