تأثير الخصائص الميكانيكية لمواد الإنشاء على معامل السلوك اللامرن (R) لنموذجين من خزانات المياه البيتونية المسلحة العالية تحت الأحمال الزلزالية

الدكتور عصام ناصر1 الدكتور بسام حويجة2 رهام ابوبالا3

ملخص

إنَّ ما يحكم عملية التصميم الإنشائي لمقاطع العناصر الإنشائية لخزانات المياه بالإضافة لشرط المقاومة هو شرط الكتامة بوصفها منشآت ذات استجابة خاصة تحت الأحمال الزلزالية نظراً لاحتوائها على السوائل التي تولد ضغطاً ديناميكياً على جدران حوض الخزان، ونظراً لاستجابة المنشأ اللاخطية تحت الأحمال الزلزالية ينتج عنها تخفيض في طاقة الزلزال الداخلة إليه وبالتالي تخفيض القوى الزلزالية التصميمة وهذا ما يعبر عنه من خلال معامل السلوك اللامرن (R). يتناول البحث دراسة تحليلية زلزالية لنموذجين من خزانات المياه العالية من البيتون المسلح ذات أحواض دائرية سعتها $100\ m^3$: النموذج الأول ذو هيكل حامل إطاري والثاني بجدار اسطواني حامل مفرغ. أجرينا تحليلاً ديناميكياً لاخطياً للنماذج باستخدام برنامج ABAQUS مع نمذجة الماء ضمن الحوض وفق طريقة Housner بهدف الحصول على الإجهادات في البيتون والفولاذ وقيم معامل السلوك اللامرن R وفق مبدأ الطاقة لحالتين من المقاومة المميزة للبيتون ولإجهادي خضوع لفولاذ التسليح:

$$f_c' = 30\ MPa - f_c' = 25\ MPa\ ,\ f_y = 410\ MPa\ -\ f_y = 240\ MPa$$

أظهرت الدراسة أن تأثير زيادة المقاومة المميزة للبيتون وإجهاد خضوع فولاذ التسليح على معامل السلوك اللامرن R كان محدوداً ضمن المجال المدروس، مع بقاء نموذج الضرر في البيتون متقارباً لحالتي المقاومة المميزة، وزيادة واضحة في إجهادات الشد ضمن التسليح عند استخدام الفولاذ الأعلى مقاومة، مما يؤكد أنَّ تحسين الأداء الزلزالي لخزانات المياه العالية يعتمد بشكل أكبر على خصائص الهيكل الإنشائي الحامل وآليات تبديد الطاقة مقارنة برفع مقاومة المواد ضمن مجال الدراسة.

الكلمات المفتاحية: إجهاد الخضوع – معامل السلوك اللامرن– تحليل لاخطي – نموذج هوسنر.

1 أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية – الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
2 أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية – الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
3 طالبة دكتوراه في قسم الهندسة الإنشائية – الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.

Effect of The Mechanical Properties of Construction Materials on the Inelastic Behavior Factor (R) of Two Elevated Reinforced Concrete Water Tank Models under Seismic Loads

Dr. Issam Nasser 1
Dr. Bassam Hweijeh 2
Reham abobala 3

Abstract

The structural design of water tank component is governed by the ductility requirement in addition to the strength requirement. This is because water tanks are considered structures with a special seismic response due to the contained liquid which subjects the tank walls to hydrodynamic pressures during earthquake excitation.

Owing to the inelastic response mechanism of structures under seismic loading, part of the earthquake input energy is dissipated, resulting in design. This reduction is represented by the non elastic behavior factor R.

The study presents an analytical investigation of two elevated reinforced – concrete water tank models with a capacity of $100\mathrm{m}^3$. The first model consists of a framed supporting structure, whereas the second model employs a cantilever cylindrical shaft. Nonlinear dynamic analyses were conducted using the ABAQUS software, incorporating a water sloshing model based on the Housner approach. The analyses aimed to determine the maximum roof displacement, stresses in concrete and reinforcing steel, and the Inelastic behavior factor R based on the energy balance principle. A comparison was also made between two reinforcing steel yield strengths:

$f_c^{/} = 30\ \text{MPa} - f_c^{/} = 25\ \text{MPa}\ ,\ f_y = 410\ \text{MPa}\ - f_y = 240\ \text{MPa}$

The results showed that increasing the characteristic compressive strength of concrete and the yield strength of reinforcing steel had a limited effect on the Inelastic behavior factor R. The concrete tensile damage pattern (Damage T) remained nearly identical for both characteristic concrete strengths, and the noticeable increase in tensile stresses in the reinforcing steel when higher-strength steel was used. The findings also indicate that improving the seismic performance of elevated water tanks depends more significantly on the structural system characteristics and energy dissipation mechanisms than on increasing material strength within the investigated range.

Keywords: Yield Strength–Inelastic Behavior Factor–Nonlinear Analyses–Housner's Model

1 Professor– Department of Structural Engineering – Civil Engineering – University of Latakia – Latakia – Syria.

2 Professor– Department of Structural Engineering – Civil Engineering – University of Latakia – Latakia –Syria.

3 Postgarduat Student– Department of Structural Engineering– Civil Engineering– University of Latakia– Latakia – Syria.

1. المقدمة:

يعتمد التصميم الإنشائي للمنشآت المقاومة للزلازل على الفهم الصحيح لسلوكها أثناء الحدث الزلزالي وتعتبر خزانات المياه العالية ذات أهمية خاصة نظراً لطبيعة استجابتها الديناميكية المركبة الناتجة عن تفاعل السائل مع المنشأ مما يؤثر على خصائص الاستجابة الزلزالية مقارنة بالمنشآت الأخرى، تُستخدم نماذج مبسطة لمحاكاة حركة المياه ضمن حوض الخزان ويُعد نموذج (Housner،1963) أقدمها وأكثرها شيوعاً وقد استُخدم في دراسات عديدة منها (موسى،2016) و(الضايع،2024) حيث يُقسم كتلة المياه إلى كتلتين: سفلية وتسمى الكتلة النبضية أو الدفعية (Impulsive Mass) ذات اتصال صلب مع جدران الخزان

والعلوية تسمى الكتلة الاضطرابية أو الانتشارية (Convective Mass) ذات اتصال نابضي مع جدارن حوض الخزان، قدَّم الكود الأوروبي (EN1998, 2006) جدولاً يمكن من خلاله حساب قيم هذه الكتل بالاعتماد على ارتفاع الشريحة المائية h ونصف القطر الداخلي للحوض R وعَرض (2022،الملحق (7) للكود العربي السوري) علاقات تربط كتلتي الماء في الحوض بأبعاد مقطع الحوض الدائري والمستطيل وارتفاع الشريحة المائية ضمنه.

اشترط ملحق الخزانات للكود السوري (2022،الملحق (7) للكود العربي السوري) تصميم خزانات المياه بتحقيق شرط الكتامة منعاً لتشكل إجهادات شد تولد تشققات تسبب تسرب الماء تحديداً للأوجه الملامسة للماء وذلك بألا يتجاوز إجهاد الشد في الخرسانة القيمة المسموحة الواردة في الكود الأساس وألا يتجاوز حد التشقق (أي سمك الشق) المقدار $(0.1\ \mathrm{mm})$.

وعليه لطالما يستخدم فولاذ تسليح بإجهاد خضوع منخفض $f_y = 240\ \mathrm{MPa}$ لتحقيق شرط الكتامة ولكن في التصميم الزلزالي قد تعتمد قيم لإجهاد الخضوع تبدأ من $f_y = 400\ \mathrm{MPa}$.

لقد حظيت دراسة تأثير الخصائص الميكانيكية لمواد الإنشاء باهتمام كبير لما لها من دور في تحديد الاستجابة اللاخطية والأداء الزلزالي للمنشآت (Segura, S; Hariri−Ardebili, 2022)، إذ يؤدي تغير مقاومة البيتون إلى تعديل الصلابة الأولية ومقاومة الانضغاط وسلوك التشقق وتطور التضرر، بينما يؤثر تغير إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح في مقدار اللدونة المتاحة للعناصر الإنشائية وتشكل المفاصل اللدنة وقدرتها على تبديد الطاقة، في حين أكّد (Khiavi, M, et al, 2021) في دراسته لتأثير تغير معامل مرونة أساس خزان مياه على استجابته الزلزالية أنَّ زيادة معامل المرونة للبيتون يؤدي إلى زيادة الإجهادات الرئيسية على هيكل الخزان وتقليل إزاحته.

إنَّ الاستجابة الزلزالية للمنشآت ومنها الخزانات انعكاس لما تمتلكه من خصائص إنشائية مثل المطاوعة (القدرة على ابداء تشوهات بعد الحد المرن دون حصول نقص خطير في المقاومة) والمقاومة الزائدة

(تمتلك مقاطع العناصر الإنشائية مقاومة أكبر من مقاومتها التصميمية) تُمكّن هذه الخصائص من التعامل مع طاقة الزلزال وبالتالي تخفيض القوى الزلزالية التصميمة باستخدام المعامل R.

يُحسب معامل السلوك اللامرن R من علاقة الكود (UBC، 97) بجداء مركبتيه وفق الصيغة الآتية:

$$R = \Omega_0 * R_\mu \quad (1)$$

Ω_0: معامل المقاومة الزائدة (Over Strength Factor)، يخفض قص الخضوع V_y إلى قص تصميمي V_d وفق الصيغة (2)، الشكل (1):

$$\Omega_0 = \frac{V_y}{V_d} \quad (2)$$

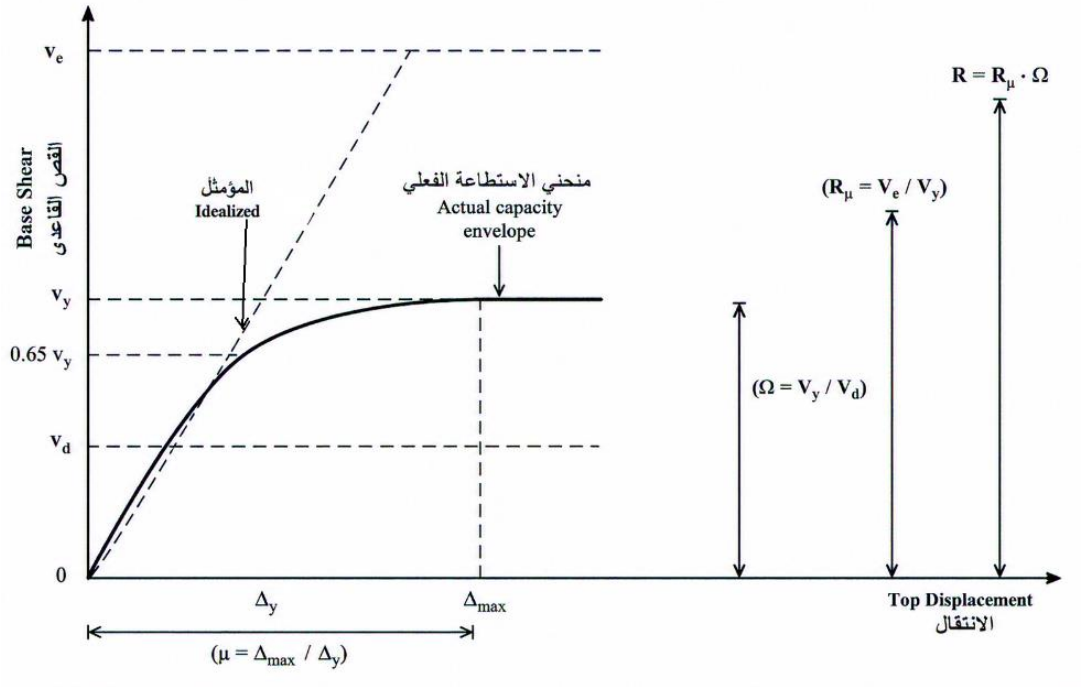
R_μ: معامل تخفيض المطاوعة أو معامل السلوك للمطاوعة (Reduced Ductility Factor)، وهو النسبة التي تخفض القص المرن إلى قص الخضوع للمنشأ ويعطى بالصيغة (3)، الشكل (1):

$$R_\mu = \frac{V_e}{V_y} \quad (3)$$

معامل المطاوعة μ الذي يمثل النسبة بين الانتقال الأعظمي Δ_{max} إلى انتقال الخضوع Δ_y لأعلى المنشأ الشكل (1).

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (4)$$

إذاً يظهر الشكل (1) دور مركبتي المعامل R في تخفيض القص المرن إلى قص تصميمي:



الشكل (1) تأثير المعامل R على قوة القص القاعدية V (ATC,1995)

كما يمكن أن يعبَّر عن المعامل R بدلالة العلاقة بين الطاقة الزلزالية الداخلة إلى المنشأ E_{TOTAL} والطاقة المرنة المختزنة فيه مؤقتاً $E_{Elastic}$ والتي تعكس قدرته على تبديد جزء من الطاقة بآليات لامرنة مما يوفر تمثيل مبسط لسلوك المنشأ تحت تأثير الأحمال الزلزالية. وهذا التمثيل أقرب إلى معامل السلوك للمطاوعة R_μ لأن الطاقة الكلية هي مجموع للطاقات الحركية E_k والطاقة المرنة E_s وطاقة التخميد اللزج E_d والطاقة الهيستيرية (اللدنة) E_h (Gholami et al, 2021) وجميعها ناتجة عن سلوك لا يمثل مقاومة المقاطع للعناصر الإنشائية، وعندما نستثني الطاقة الحركية وطاقة التخميد اللزج يمكن لنا التعبير عن المعامل R كما يلي:

$$R = \sqrt{1 + \frac{E_h}{E_s}} \qquad (5)$$

تناولت العديد من الكودات والمعايير التصميمية منها (ASCE 7,2010)، (ACI 350-3,2006) تحديد قيم للمعامل R لخزانات المياه بالاعتماد على خصائص النظام الإنشائي وظروف التأسيس ونوع مادة الإنشاء، وقدم (2022،الملحق (7) للكود العربي السوري) قيماً للمعامل R حسب الهيكل الحامل ومادة الإنشاء: حيث أعطى القيم 2.5 – 4 للهيكل الإطاري والقيم 3.5 – 4 للهيكل الأسطواني من البيتون المسلح، وعملت الكثير من الأبحاث على دراسة تأثير بارامترات الشكل للمنشأ أو تربة التأسيس أو نوع الهيكل الحامل على قيم المعامل R (Jani, B et al, 2020)),(Gurkalo, F,2024)، لذلك عملنا في دراستنا على الربط بين الخصائص الميكانيكية لمواد البناء (المقاومة المميزة للبيتون وإجهاد خضوع الفولاذ) والسلوك اللاخطي للمنشأ (من خلال المعامل R).

2. أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذه الدراسة في معرفة كيفية تأثير تغيّر المقاومة المميزة للبيتون $f_c^{/}$ وإجهاد الخضوع لفولاذ التسليح f_yعلى السلوك الزلزالي لنموذجين من خزانات المياه العالية وعلى قيمة معامل السلوك اللامرن R أحد معاملات حساب القص القاعدي الزلزالي والذي تُعبر قيمته عن مدى قدرة المنشأ على امتصاص طاقة الزلزال خارج مجال المرونة.

يهدف البحث إلى بيان مدى تأثر قيمة المعامل R بتغير قيم الخصائص الميكانيكية لمادة الإنشاء ($f_c^{/}$ ، f_y) لحالة نموذجين من خزانات المياه العالية من البيتون المسلح المحمولة على هيكل إطاري وأخرى على هيكل أسطواني بسعة تخزينية $100\ m^3$ وذات أحواض بمقطع دائري واقعة في المنطقة الزلزالية 2C، حيث أجريت الدراسة على الخزانات وفق ثلاث حالات ملء: فارغ، نصف مليء ومليء باستخدام تحليل ديناميكي لاخطي، مع تقييم لنتائج الدراسة.

3. مواد وطرائق البحث:

3-1 النماذج المستخدمة في الدراسة:

تم استخدام نموذجين من الخزانات العالية ويوضح الجدول (1) أبعاد عناصرها البيتونية المسلحة، والشكل (2) نماذجها ثلاثية الأبعاد ومساقطها الأفقية. تمت النمذجة العددية وفق برنامج ABAQUS حيث نُمذجَت عناصر البيتون كعناصر حجمية صلبة ثلاثية الأبعاد (C3D8R) بشكل مكعب بثمان عقد عند الزوايا

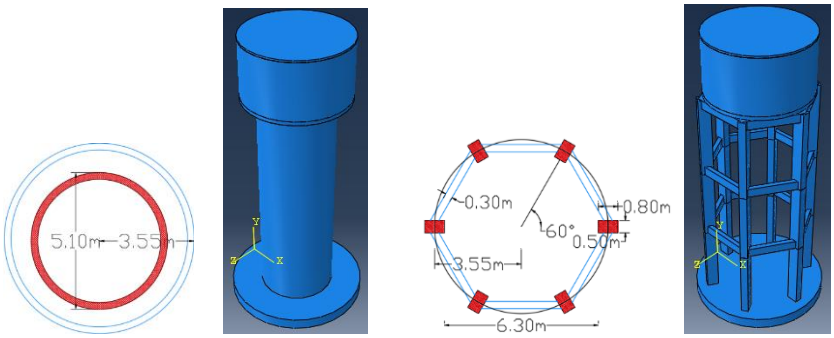
بالإضافة إلى استخدام عناصر رباعية السطوح (C3D10) بهدف تحسين استقرار عملية التحليل العددي ومعالجة مشاكل التقارب أثناء التحليل الديناميكي اللاخطي، ونمذجة فولاذ التسليح كعناصر خطية (T3D2) قضبان ثلاثية الأبعاد على الشد والضغط فقط بعقدتين وربطه مع البيتون باستخدام (Embedded Region) أي ترابط تام بينهما وربط أجزاء الخزان باستخدام قيود (Tie) لضمان استمرارية الاتصال، مع توليد شبكة عناصر m (1–0.5) والتي تعد مناسبة لدراسة سلوك الخزان بأبعاده الكبيرة، واعتماد شروط طرفية بإدخال التأثير الزلزالي على شكل تسارع قاعدي (Acceleration Boundary Condition) (على السطح السفلي للحصيرة) مع إعطاء درجة حرية باتجاه تطبيق التسارع الزلزالي ووثق باقي درجات الحرية، بهدف التحليل الديناميكي اللاخطي (Dynamic Implicit)، وقمنا بإسناد خصائص الكثافة (Density) والمرونة (Elasticity) للبيتون والفولاذ وباعتماد مفهوم اللدونة المتضررة للبيتون (Concrete Damaged Plasticity CDP) واسناد اللدونة للفولاذ (Plactisty).

واستخدمنا نموذج البيتون من مكتبة الـ ABAQUS حيث تم تمثيل سلوك الضغط باستخدام نموذج Carreira بينما تم تمثيل سلوك الشد وفق توصيات ACI، كما يظهر الشكل (3).

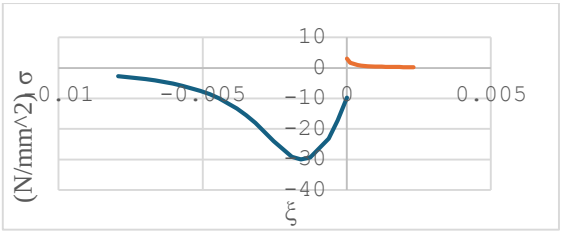
الجدول (1) أبعاد عناصر نموذجي الخزان ذو الهيكل الحامل الإطاري والهيكل الحامل الاسطواني.

نموذج الخزان بهيكل حامل إطاري	الأبعاد mm
ارتفاع الهيكل الحامل للخزان	15000
مقاطع الأعمدة	500*800
ارتفاع العمود	5000
مقاطع الجوائز	300*600
نصف قطر بلاطة حوض الخزان السفلية	3550
سماكة بلاطة حوض الخزان السفلية	250
ارتفاع جدار الحوض	3800
سماكة جدران حوض الخزان	250
نصف قطر بلاطة حوض الخزان العلوية	3550
سماكة بلاطة حوض الخزان العلوية	120
نصف قطر الحصيرة	4650
ارتفاع الحصيرة	800

نموذج الخزان بهيكل حامل اسطواني	الأبعاد mm
ارتفاع الهيكل الحامل للخزان (ارتفاع الجدار الاسطواني المفرغ)	15000
سماكة الجدار الاسطواني المفرغ	250
نصف قطر بلاطة حوض الخزان السفلية	3550
سماكة بلاطة حوض الخزان السفلية	250
ارتفاع جدار الحوض	3800
سماكة جدران حوض الخزان	250
نصف قطر بلاطة حوض الخزان العلوية	3550
سماكة بلاطة حوض الخزان العلوية	120
نصف قطر الحصيرة	4650
ارتفاع الحصيرة	800



الشكل (2) نموذجي الخزان ذو الهيكل الحامل الإطاري والهيكل الحامل الاسطواني والمسقط الأفقي للهيكل الحامل



الشكل (3) مخطط إجهاد – تشوه للبيتون المستخدم على الشد والضغط

تجدر الإشارة إلى أن دقة التحليل العددي ترتبط بدقة النموذج الرياضي للمنشأ المدروس وإن دقة النموذج الرياضي تستند إلى نمذجة كافة العناصر المشكلة للمنشأ بما فيها قضبان التسليح وبالنظر إلى إمكانيات الحواسيب الشخصية المستخدمة فإنَّ النمذجة الدقيقة للخزان إضافة إلى استخدام تحليل ديناميكي ضمني لاخطي وفق سجل زمني زلزالي ستساهم في إطالة زمن التحليل بشكل غير واقعي. لذلك قمنا باعتماد بعض التبسيطات التي تمكننا من إجراء الحساب بطريقة منطقية مع المحافظة على دقة النتائج وهذه التبسيطات مرتبطة بإجراء التحليل على الجزء الذي يضم قيم تسارعات كبيرة من السجل الزلزالي وباعتماد طبقة تسليح للعناصر مكافئة للتسليح الحقيقي، ونمذجة المياه في حوض الخزان وفق مبدأ Housner علماً أن برنامج الـ ABAQUS يتيح نمذجة السلوك الهيدروليكي للسوائل ولكن دراستنا لا تهدف إلى دراسة حركة السائل أو توزيع الضغوط الهيدروديناميكية وإنّما تغيّر الخصائص الميكانيكية لمواد الإنشاء على الاستجابة اللاخطية والمعامل R، كما أنَّ طريقة Housner معتمدة في الكودات العالمية وإنَّ نمذجة المياه كوسط

مستمر تتطلب عدداً كبيراً من العناصر وزمن تحليل أطول وصعوبة أكبر في تحقيق التقارب وخاصة مع تحليل ديناميكي لاخطي أما نموذج Housner يمثل تأثير السائل بشكل مكافئ يتيح إجراء عدد كبير من التحليلات البارامترية بكفاءة تخدم هدف الدراسة.

3-2 تصميم المقاطع العرضية لعناصر خزانات المياه:

تمَّ تصميم عناصر خزانات المياه وفقاً لما جاء في (2022،الملحق (7) للكود العربي السوري) و (2012، الكود العربي السوري) حيث تُحسب سماكات جدران وبلاطة الحوض الملامسة للماء وفق المرحلة الأولى الموافقة لعدم تجاوز الإجهادات المسموحة على الشد للبيتون (عدم تشقق البيتون) ويتم التحقق من الكتامة لهذه العناصر باعتبارها خاضعة لحمولة ضغط هيدروستاتيكية على ألا يتجاوز إجهاد الشد في البيتون الإجهاد المسموح $\overline{\sigma_{ct}} = 0.4\sqrt{f_c'}$ في حالة الشد المركزي أو الشد اللامركزي بلا مركزية صغيرة، و $\overline{\sigma_{cb}} = 0.57\sqrt{f_c'}$ في حالة الانعطاف البسيط أو الشد اللامركزي بلا مركزية كبيرة، وألا يتجاوز حد التشقق القيمة $0.1mm$ مع عدم ضرورة دراسة الكتامة عند تشكل إجهادات الشد على وجه المقطع البعيد عن الماء.

ويحسب التسليح في حالة الاستثمار أو في حالة الحد الأقصى وتعتمد نسبة دنيا للتسليح بقيمة % 0.3 من النوع عالي المقاومة.

العلاقة المستخدمة في التصميم لحساب فولاذ التسليح على قوى الشد المحورية بفرض إهمال مقاومة البيتون للشد:

$$A_S = \frac{N_t}{\overline{\sigma_S}} \qquad (6)$$

A_S : مساحة فولاذ التسليح N_t : قوة الشد المحورية $\overline{\sigma_S} = 0.55f_y$: الإجهاد المسموح في فولاذ التسليح. ولضمان عدم تجاوز الإجهادات في البيتون قيم الإجهادات المسموحة نستخدم الصيغة:

$$\sigma_{ct} = \frac{N_t}{A_C + (n-1)A_S} < \overline{\sigma_t} \qquad (7)$$

A_C: مساحة المقطع البيتوني المشدود n: النسبة المعيارية وتؤخذ مساوية ل 10

μ : نسبة التسليح (نسبة مساحة التسليح على مساحة البيتون) .

وتحسب الإجهادات المتولدة في المقطع بتأثير عزم الانعطاف M كما يلي:

$$\sigma_{cb} = \mp \frac{6\,M}{b\,t^2} \qquad (8)$$

t : سماكة جدار الخزان b : شريحة مترية، وتكون مساحة فولاذ التسليح اللازمة:

$$A_S = \frac{M}{\overline{\sigma_s}\,0.8\,d} \qquad (9)$$

d : العمق الفعال للمقطع

تم اعتماد مفهوم اللدونة المتضررة للبيتون (CDP Concrete Damaged Plasticity)، واللدونة للفولاذ، وكانت خواص المواد المستخدمة:

$$f_c^{/} = 30\ \text{MPa} - f_c^{/} = 25\ \text{MPa}\ ,\ f_y = 410\ \text{MPa} - f_y = 240\ \text{MPa}$$

3-3 نمذجة المياه:

اعتُمدت طريقة Housner في دراستنا لنمذجة المياه الشكل (4) وتم حساب كتل الماء وارتفاعاتها وفق العلاقات (10-11-12-13-14) (الملحق (7) للكود العربي السوري)، وكانت قيم ومنسوب الكتل النبضية والاضطرابية عن قاع الحوض بقطر داخلي للحوض D كما في الجدول (2).

$$\frac{m_i}{m} = \frac{\tanh\left(0.866\frac{D}{h}\right)}{0.866\frac{D}{h}} \qquad (10)$$

$$\frac{h_i}{h} = 0.375 \quad \text{عندما} \quad \frac{h}{D} \le 0.75 \qquad (11)$$

$$\frac{h_i}{h} = 0.5 - \frac{0.09375}{\frac{h}{D}} \quad \text{عندما} \quad \frac{h}{D} > 0.75 \qquad (12)$$

$$\frac{m_c}{m} = 0.23\frac{\tanh(3.68\frac{h}{D})}{\frac{h}{D}} \qquad (13)$$

$$\frac{h_c}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.68\frac{h}{D}\right) - 1.0}{3.68\frac{h}{D}\sinh\left(3.68\frac{h}{D}\right)} \qquad (14)$$

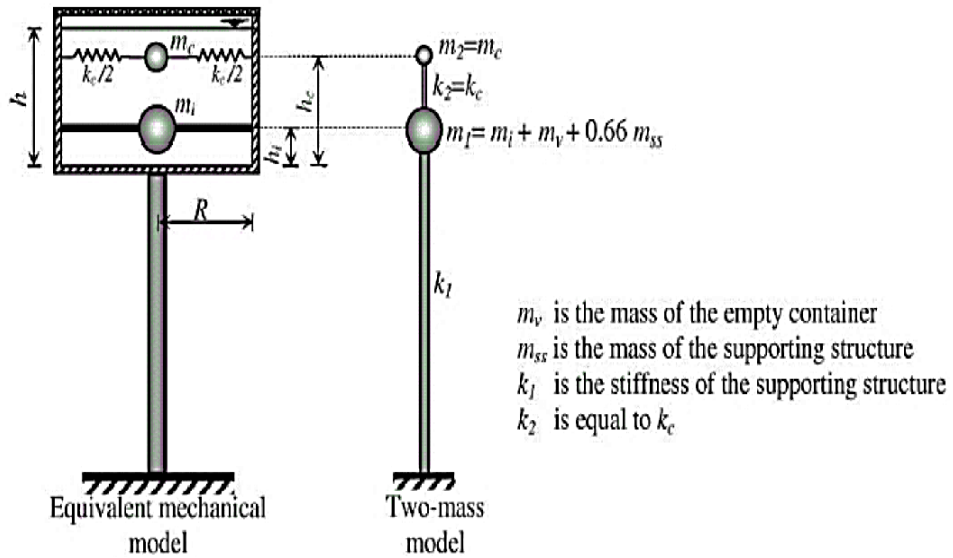
m_i: الكتلة النبضية للسائل m_c: الكتلة الاضطرابية للسائل m: كتلة السائل

h: ارتفاع السائل في الحوض h_i: ارتفاع الكتلة النبضية h_c: ارتفاع الكتلة الاضطرابية

الجدول (2) قيم ومناسيب الكتلة النبضية والاضطرابية عن قاع الحوض الأسطواني

حالة ملء الحوض الاسطواني	الكتلة النبضية للماء Mass Impulsive (kg)	منسوب الكتلة النبضية h_i , (m)	الكتلة الاضطرابية للماء Convectiv Mass (kg)	منسوب الكتلة الاضطرابية h_c , (m)
نصف مليء	13.445	0.563	35.511	0.791
مليء	51.525	1.125	48.446	1.773

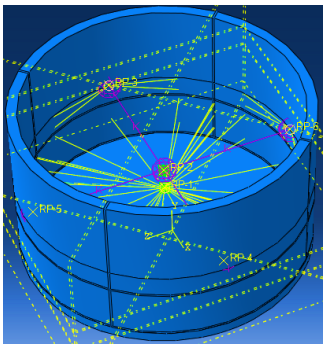
وتم تمثيلها ضمن النموذج بكتل نقطية Point Masses الشكل (5).



الشكل(4) نموذج Housner لتمثيل كتلة الماء الخزان لخزان مياه عالي (Housner,1963)

m_v : كتلة الحوض فارغ m_{ss} : كتلة الهيكل الحامل k_1: صلابة الهيكل الحامل

$k_2 = k_c$: صلابة النابض



الشكل (5) نمذجة المياه ضمن حوض

3-4 التحليل الزلزالي لنموذجي الخزان:

تم تحليل النماذج وفق ثلاثة سجلات زلزالية مقيَّسة لزلازل حقيقية تم الحصول عليها من المعهد العالي للدراسات والبحوث الزلزالية في دمشق مناسبة للاستخدام في المنطقة الزلزالية 2C المدروسة، الأول لزلزال اليونان 1981 والثاني لأرمينيا 1988 والثالث لزلزال تركيا 1999 وفق المعطيات الواردة بالجدول التالي:

الجدول (3) معطيات الزلازل المستخدمة في تحليل النماذج

No	الزلزال	العام	درجة الزلزال	التسارع الأرضي الأعظمي PGA-E (g)	التسارع الأرضي الأعظمي المقيّس $PGA-E_{sc}$ (g)
1	Corinth, (Greece)	1981	6.6	0.236	0.443
2	Spitak, (Armenia)	1988	6.8	0.2	0.387
3	Kocaeli, (Turkey)	1999	7.5	-0.311	0.238

4. النتائج ومناقشتها:

4-1 النتائج المتعلقة بإجهاد الشد في البيتون:

تجاوزت إجهادات الشد للبيتون مقاومة الشد له أي 3 MPa في بعض المناطق الحرجة مما يشير إلى بدء تشكل التشققات، وهنا يتم استخدام Damage T لتقييم مدى تطور الضرر بعد التشقق والذي تتروح قيمته بين 0 و 1 وباقترابه من الـ1 يدل على تشكل التشققات. كما لوحظ ازدياد إجهادات البيتون مع زيادة شدة السجل الزلزالي في أغلب الحالات. تركزت أماكن الإجهاد المرتفع للبيتون عند استناد البلاطة السفلية لحوض الخزان على الهيكل الحامل الأسطواني وأسفل الهيكل الحامل الأسطواني المفرغ للنماذج ذات الهيكل الحامل الأسطواني، أما النماذج ذات الهيكل الحامل الإطاري فظهرت أعلى قيم الإجهاد في البيتون عند إحدى نهايتي أحد الأعمدة أو الجوائز.

يظهر الجدولين (4-5) أن زيادة المقاومة المميزة للبيتون من $f_c' = 25$ MPa إلى $f_c' = 30$ MPa أدت إلى تغير محدود في قيم Damage T حيث ارتفعت القيم في بعض الحالات للنموذجين وانخفضت في حالات أخرى وذلك لحالتي إجهاد الخضوع المستخدم، إلا أنَّ مواقع تركز الضرر بقيت متقاربة، ويبين الجدول (6) نموذج الضرر لعدة حالات مدروسة لنموذجي الخزانات على الشدة الزلزالية الأقل كونها الأكثر تمثيلاً لخصائص استجابة المنشأ على الحمل الزلزالي حيث أنَّ زيادة المقاومة المميزة للبيتون لم تغير مواضع تشكل الضرر، إذ بقيَّ الضرر متمركز في المناطق الحرجة نفسها مما يشير إلى أنَّ آلية تشكل التشققات كانت محكومة بتوزيع القوى الداخلية أكثر من تأثرها بزيادة مقاومة الخرسانة ضمن المجال المدرس.

الجدول (4) مقارنة قيم Damage T لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة لنوعي المقاومة المميزة للبيتون بإجهاد خضوع لفولاذ التسليح $f_y = 240$ MPa

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	حالة الملء	Damage T	
			$f_c' = 25$ MPa	$f_c' = 30$ MPa
	إطاري	فارغ	0.807	0.922

TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$		نصف مليء	0.891	0.921
		مليء	0.853	0.822
	أسطواني	فارغ	0.576	0.62
		نصف مليء	0.549	0.597
		مليء	0.513	0.514
ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$	إطاري	فارغ	0.907	0.892
		نصف مليء	0.877	0.922
		مليء	0.862	0.853
	أسطواني	فارغ	0.709	0.699
		نصف مليء	0.793	0.787
		مليء	0.670	0.707
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	فارغ	0.806	0.922
		نصف مليء	0.922	0.891
		مليء	0.878	0.855
	اسطواني	فارغ	0.712	0.778
		نصف مليء	0.726	0.720
		مليء	0.621	0.708

الجدول (5) مقارنة قيم Damage T لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة لنوعي المقاومة المميزة للبيتون بإجهاد خضوع لفولاذ التسليح $f_y = 410\ MPa$

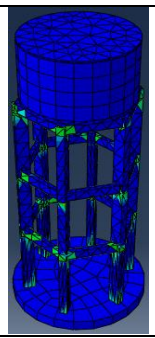
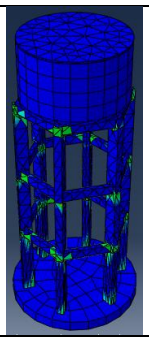
Damage T		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
$f_c^{/} = 30\ MPa$	$f_c^{/} = 25\ MPa$			
0.841	0.863	فارغ	إطاري	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.922	0.889	نصف مليء		
0.824	0.908	مليء		
0.622	0.571	فارغ	أسطواني	

تابع الجدول (5) مقارنة قيم Damage T لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة لنوعي المقاومة المميزة للبيتون بإجهاد خضوع لفولاذ التسليح $f_y = 410\ MPa$

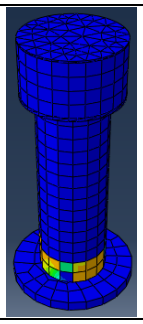
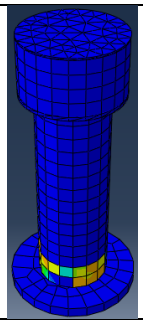
Damage T		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
$f_c^{/} = 30\ MPa$	$f_c^{/} = 25\ MPa$			
0.595	0.553	نصف مليء	أسطواني	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.546	0.541	مليء		
0.891	0.907	فارغ	إطاري	ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$
0.922	0.854	نصف مليء		
0.807	0.865	مليء		
0.690	0.766	فارغ	أسطواني	

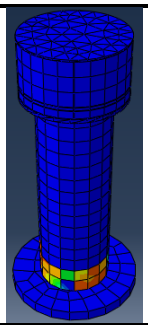
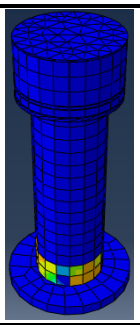
		نصف مليء	0.797	0.664
		مليء	0.646	0.696
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	فارغ	0.922	0.922
		نصف مليء	0.922	0.922
		مليء	0.891	0.887
	أسطواني	فارغ	0.699	0.734
		نصف مليء	0.735	0.773
		مليء	0.740	0.793

الجدول (6) مقارنة كونتور Damage T (نموذج الضرر) لعدة حالات لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير سجل $PGA_{SC} = 0.238g$ TURKIA 1999 **لنوعي المقاومة المميزة للبيتون**

الهيكل الحامل	**حالة الملء**	**كونتور Damage T**	
		$f_y = 240$ MPa	
		$f_c^{/} = 25$ MPa	$f_c^{/} = 30$ MPa
إطاري	فارغ		

تابع الجدول (6) مقارنة كونتور Damage T (نموذج الضرر) لعدة حالات لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير سجل TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$ لنوعي المقاومة المميزة للبيتون

الهيكل الحامل	حالة الملء	كونتور Damage T	
		$f_y = 240\ MPa$	
		$f_c^{/} = 25\ MPa$	$f_c^{/} = 30\ MPa$
أسطواني	فارغ		
		$f_y = 410\ MPa$	
		$f_c^{/} = 25\ MPa$	$f_c^{/} = 30\ MPa$
إطاري	نصف مليء		

أسطواني	نصف مليء		

4-2 النتائج المتعلقة بإجهاد الشد في فولاذ التسليح:

تُظهر نتائج التحليل لنموذجي الخزان بمختلف حالات الملء تجاوز الإجهاد في فولاذ التسليح لإجهاد الخضوع في بعض المناطق الحرجة مما يشير إلى سلوك لدن موضعي.

لحالة مقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$ ، عند استخدام فولاذ $f_y = 240\ MPa$ كانت أقصى قيمة إجهاد شد في الفولاذ 305.7 MPa لحالة هيكل إطاري بحوض نصف مليء بتأثير سجل Turkia 1999 /0.238g ووصلت إلى 419 MPa لنفس الحالة بتأثير ذات السجل عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$.

بلغ متوسط نسبة الزيادة في قيمة إجهاد الشد في فولاذ التسليح عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ مقارنة مع استخدام فولاذ $f_y = 240\ MPa$ القيمة 33.29%، جدول (7)

ولحالة مقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30\ MPa$ ، عند استخدام فولاذ $f_y = 240\ MPa$ كانت أقصى قيمة للإجهاد 300 MPa لحالة هيكل إطاري بحوض نصف مليء بتأثير سجل Turkia 1999 /0.238g ووصلت إلى 423 MPa لنفس الحالة بتأثير نفس السجل باستخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$.

وعند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ ولـ 5 حالات من 18 حالة مدروسة بقي الإجهاد أقل من إجهاد الخضوع أي بقاء الخزان ضمن المجال المرن لعمل الفولاذ، وبقي السلوك العام لنموذجي الخزان ولنوعي الفولاذ مستقراً ولم يلاحظ تدهور جوهري في الاستجابة الإنشائية الكلية، جدول (8).

بلغ متوسط نسبة الزيادة في قيمة إجهاد الشد في فولاذ التسليح عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ عن استخدام فولاذ $f_y = 240\ MPa$ القيمة 30.99%.

يظهر الجدول (9) مقارنة كونتور إجهادات الشد لفولاذ التسليح لنموذجي الخزانات بحالة حوض نصف مليء بتأثير سجل Turkia 1999 /0.238g.

الجدول (7) قيم إجهاد الشد في فولاذ التسليح لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة ولنوعي الفولاذ المستخدم ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	حالة الملء	$f_y = 240\ MPa$ إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	$f_y = 410\ MPa$ إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	نسبة التغير %
TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$	إطاري	فارغ	267	412.5	35.27
		نصف مليء	305.7	419.4	27.11
		مليء	264.3	412.4	35.91
	أسطواني	فارغ	249.2	372.1	33.03
		نصف مليء	246.4	342.3	28.02
		مليء	247.4	360.1	31.29
ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$	إطاري	فارغ	265.5	412.8	35.68
		نصف مليء	269.6	412.5	34.64
		مليء	268	412.7	35.06
	أسطواني	فارغ	244.9	329.6	25.69
		نصف مليء	241.4	305.1	20.88

		ملیء	261.6	410.5	36.27
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	فارغ	272.8	416.4	34.49
		نصف ملیء	266	416.5	36.13
		ملیء	269.7	414	34.86
	أسطواني	فارغ	265.3	411.8	35.58
		نصف ملیء	266.1	473.1	43.75
		ملیء	265.5	411.9	35.54

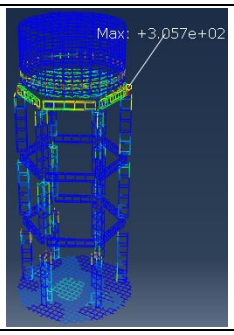
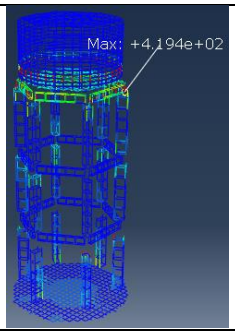
الجدول (8) قيم إجهاد الشد في فولاذ التسليح لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة ولنوعي الفولاذ المستخدم ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30$ MPa

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	حالة الملء	$f_y = 410$ MPa إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	$f_y = 240$ MPa إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	نسبة التغير %
TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$	إطاري	فارغ	415.2	266.4	35.84
		نصف ملیء	423	300	29.08
		ملیء	412	263.4	36.07
	أسطواني	فارغ	256	250	2.34
		نصف ملیء	333.4	245.8	26.27

تابع الجدول (8) قيم إجهاد الشد في فولاذ التسليح لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة ولنوعي الفولاذ المستخدم ومقاومة مميزة للبيتون $f_c' = 30$ MPa

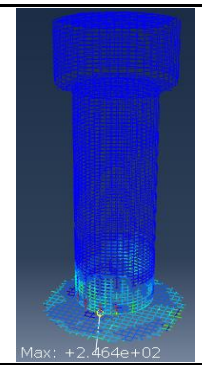
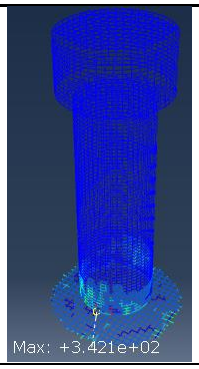
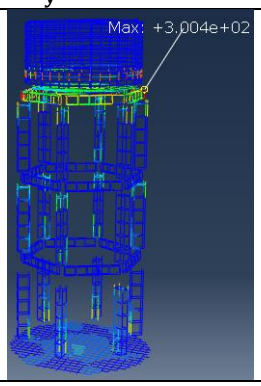
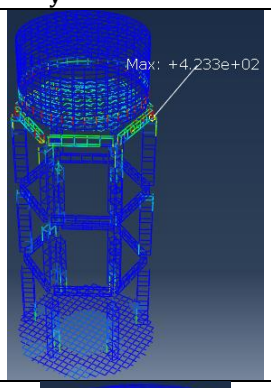
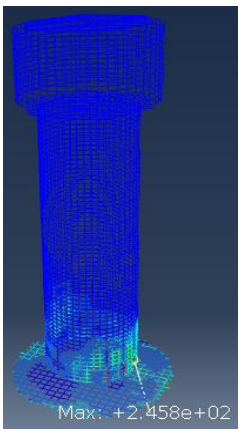
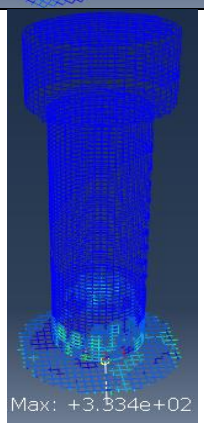
شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	حالة الملء	$f_y = 240$ MPa إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	$f_y = 410$ MPa إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	نسبة التغير %
	أسطواني	مليء	246.4	352.8	30.16
ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$	إطاري	فارغ	265	412.6	35.77
		نصف مليء	269.1	414.1	35.02
		مليء	267.3	413.3	35.33
	أسطواني	فارغ	244.5	323.1	24.33
		نصف مليء	241.6	302.8	20.21
		مليء	261.7	410.3	36.22
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	فارغ	272.8	416.3	34.47
		نصف مليء	267.1	417	35.95
		مليء	270.1	412.1	34.46
	أسطواني	فارغ	266	411.7	35.39
		نصف مليء	265.9	412.1	35.48
		مليء	265.6	412	35.53

الجدول (9) مقارنة كونتور Von mises لعدة حالات لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير سجل TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$ لنوعي المقاومة المميزة للبيتون وقيمتي إجهاد فولاذ التسليح

الهيكل الحامل	حالة الملء	كونتور Von mises	
		$f_c^{/} = 25\ MPa$	
		$f_y = 240\ MPa$	$f_y = 410\ MPa$
إطاري	نصف مليء		

تابع الجدول (9) مقارنة كونتور Von mises لعدة حالات لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير سجل TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$ لنوعي المقاومة المميزة للبيتون وقيمتي إجهاد فولاذ التسليح

الهيكل الحامل	حالة الملء	كونتور Von mises	
		$f_c^{/} = 25\ MPa$	
		$f_y = 240\ MPa$	$f_y = 410\ MPa$

أسطواني	نصف مليء		
		$f_c^{/} = 30\ MPa$	
		$f_y = 240\ MPa$	$f_y = 410\ MPa$
إطاري	نصف مليء		
أسطواني	نصف مليء		

4-3 النتائج المتعلقة بحساب معامل السلوك اللامرن R:

تم حساب معامل السلوك للمطاوعة R_μ وفق العلاقة (5) مع اعتماد الإزاحة الأعظمية Δ_{max} كمؤشر لذروة الاستجابة فهي تعكس بشكل دقيق تطور السلوك أثناء الحمل الزلزالي واعتماد اللحظة الزمنية المرافقة لها لتكون اللحظة الزمنية التي نستخدم عندها قيمة طاقة اللدونة (Plastic Dissipation ALLPD) كمؤشر للطاقة اللدنة E_h (الطاقة المبددة المرتبطة بالتشوهات غير المرنة) وقيمة طاقة الانفعال (Strain Energy ALLSE) للطاقة المرنة المخزنة E_s والتي تزول بإزالة التحميل، حيث يعطي التحليل العددي في برنامج ABAQUS قيم هذه الطاقات عند كل لحظة زمنية من مدة التحليل.

ويتم حساب معامل السلوك للمقاومة الزائدة (وفق العلاقة $\Omega_0 = \frac{V_y}{V_d}$) بحساب قوة القص التصميمية V_d وفق ما ورد في الملحق (7) للكود العربي السوري العلاقة (15) وقص الخضوع V_y الناجم عن التحليل الديناميكي اللاخطي، والنتائج مبيّنة بالجدولين(10-11):

القص الكلي على الخزان: $$V = \sqrt{{V_i}^2 + {V_c}^2} \qquad (15)$$

مرتبط بحساب المركبتين النبضية (Implusive Component V_i) والاضطرابية (Convective Component V_c) وفق المعادلات التالية:

$$V_i = (A_h)_i * (m_i + m_s)\, g \qquad (16)$$

$(A_h)_i$: معامل زلزالي تصميمي أفقي للنمط النبضي أو المركبة النبضية

m_i: الكلتة النبضية للسائل m_s: كتلة الحوض وثلث كتلة الهيكل الحامل

وهو قص قاعدي عند مستوى أعلى أساس الهيكل الحامل لحوض الخزان.

$$V_c = (A_h)_c * m_c\, g \qquad (17)$$

$(A_h)_c$: معامل زلزالي تصميمي أفقي للنمط الاضطرابي أو المركبة الاضطرابية

$$A_h = \frac{Z}{2}\,\frac{I}{R}\,\frac{S_a}{g} \qquad (18)$$

Z : معامل المنطقة الزلزالية I : معامل أهمية المنشأ $\frac{S_a}{g}$: المعامل المتوسط لتسارع الاستجابة

باعتماد القيم الدنيا للمعامل R (2.5 هيكل إطاري– 3.5 هيكل اسطواني) وفق الملحق7 للكود السوري.

الجدول (10) قيم معامل السلوك للمطاوعة R_μ ومعامل المقاومة الزائدة Ω_0 الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25$ MPa

$f_y = 410$ MPa		$f_y = 240$ MPa		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
Ω_0	R_μ	Ω_0	R_μ			
0.34	2.75	0.41	2.77	فارغ	إطاري	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.57	1.09	0.67	1.09	نصف مليء		
0.49	2.52	0.56	2.52	مليء		
0.87	2	0.87	2.02	فارغ	اسطواني	
0.47	1.78	0.47	1.83	نصف مليء		
1.03	1.84	0.55	1.87	مليء		
0.96	2.64	1.86	2.67	فارغ	اطاري	ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$
0.59	2.45	0.69	2.21	نصف مليء		
1.72	2.86	0.65	3.27	مليء		
0.46	1.91	0.62	1.91	فارغ	اسطواني	
1.06	1.84	0.49	1.87	نصف مليء		
0.28	1.66	0.36	1.76	مليء		
1.38	3.29	0.60	3.39	فارغ	اطاري	

1.88	2.39	0.56	2.44	نصف مليء		GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$
0.55	2.65	0.55	2.75	مليء		
1.09	2.77	1.09	2.85	فارغ	سطواني	
1.02	2.19	1.02	2.28	نصف مليء		
0.69	2.28	0.69	2.41	مليء		

الجدول (11) قيم معامل السلوك للمطاوعة R_μ ومعامل المقاومة الزائدة Ω_0 الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30$ MPa

$f_y = 410$ MPa		$f_y = 240$ MPa		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
Ω_0	R_μ	Ω_0	R_μ			
0.49	2.73	0.4	2.76	فارغ	إطاري	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.60	1.08	0.79	1.08	نصف مليء		
0.05	2.5	0.55	2.5	مليء		
0.51	1.84	3.1	1.94	فارغ	أسطواني	
0.47	1.74	2.8	1.79	نصف مليء		
0.31	1.77	0.52	1.79	مليء		

تابع الجدول (11) قيم معامل السلوك للمطاوعة R_μ ومعامل المقاومة الزائدة Ω_0 الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c' = 30$ MPa

$f_y = 410$ MPa		$f_y = 240$ MPa		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
Ω_0	R_μ	Ω_0	R_μ			
0.91	2.57	0.34	2.64	فارغ	إطاري	ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$
0.19	2.08	0.67	2.49	نصف مليء		
1.09	3.06	0.87	3.29	مليء		
0.46	1.86	0.17	2.12	فارغ	أسطواني	
0.69	1.78	1.17	1.8	نصف مليء		
0.36	1.61	0.29	1.72	مليء		
1.52	3.28	0.6	3.39	فارغ	إطاري	GREECE 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$
1.41	2.35	0.02	2.45	نصف مليء		
1.27	2.72	0.02	2.84	مليء		
0.69	2.74	1.1	2.85	فارغ	أسطواني	
1.02	2.17	1.1	2.24	نصف مليء		
0.69	2.26	0.69	2.34	مليء		

نلاحظ أن قيم معامل السلوك للمقاومة Ω_0 بغالبيتها أصغر من الواحد وهذا يعود إلى أنَّ قص الخضوع المحسوب بالتحليل الديناميكي اللاخطي هو عند أول خضوع لفولاذ التسليح ، وإنَّ المعامل Ω_0 هو خاصية تتعلق بالمنشأ لذلك تم اعتماد قيمة $\Omega_0 = 1.2$ والتي تعد أكثر واقعية وأمان.

وبالتالي كانت قيم معامل السلوك اللامرن $R_{analytical}$ (المحسوبة وفق العلاقة $R = 1.2 * R_{\mu}$) كما هي في الجدولين(12-13) التالي:

الجدول (12) قيم معامل السلوك اللامرن R الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	مقطع الحوض وسعته التخزينية	حالة الملء	$f_y = 410\ MPa$ $R_{analytical}$	$f_y = 240\ MPa$ $R_{analytical}$	نسبة التغير %
TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$	إطاري	دائري $100m^3$	فارغ	3.29	3.33	-1.22
			نصف مليء	1.31	1.31	0
			مليء	3.02	3.02	0
	أسطواني		فارغ	2.40	2.42	-0.83
			نصف مليء	2.13	2.19	-2.82
			مليء	2.20	2.24	-1.82

تابع الجدول (12) قيم معامل السلوك اللامرن R الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	مقطع الحوض وسعته التخزينية	حالة الملء	$f_y = 410\ MPa$ $R_{analytical}$	$f_y = 240\ MPa$ $R_{analytical}$	نسبة التغير %
ARMENIA 1988	إطاري	دائري $100m^3$	فارغ	3.16	3.19	-0.95
			نصف مليء	2.94	2.65	9.86

−13.95	3.44	3.92	مليء			$PGA_{SC} = 0.387g$
0	2.29	2.29	فارغ		أسطواني	
−1.82	2.20	2.24	نصف مليء			
−6.03	1.99	2.11	مليء			
−3.03	3.96	4.08	فارغ	دائري $100m^3$	إطاري	GREECE 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$
−2.09	2.87	2.93	نصف مليء			
−3.46	3.18	3.29	مليء			
−3.01	3.32	3.42	فارغ		أسطواني	
−3.41	2.64	2.73	نصف مليء			
−5.47	2.74	2.89	مليء			

جدول (13) قيم معامل السلوك اللامرن R الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30$ MPa

نسبة التغير %	$f_y = 410$ MPa	$f_y = 240$ MPa	حالة الملء	مقطع الحوض وسعته التخزينية	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
	$R_{analytical}$	$R_{analytical}$				
−1.22	3.27	3.31	فارغ	دائري $100m^3$	إطاري	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.77	1.3	1.29	نصف مليء			
0	3	3	مليء			
−5.43	2.21	2.33	فارغ		أسطواني	

			نصف مليء	2.15	2.09	−2.87
			مليء	2.15	2.12	−1.42
ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$	إطاري	دائري $100m^3$	فارغ	3.11	3.08	−0.97
			نصف مليء	2.52	2.49	−1.20
			مليء	3.88	3.67	−5.72
	أسطواني		فارغ	2.55	2.23	−14.35
			نصف مليء	2.16	2.13	−1.41
			مليء	2.06	1.93	−6.74
GREECE 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	دائري $100m^3$	فارغ	4.07	3.93	−3.56
			نصف مليء	2.94	2.82	−4.26

تابع الجدول (13) قيم معامل السلوك اللامرن R الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30$ MPa

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	مقطع الحوض وسعته التخزينية	حالة الملء	$f_y = 240$ MPa	$f_y = 410$ MPa	نسبة التغير %
				$R_{analytical}$	$R_{analytical}$	
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	دائري $100m^3$	مليء	3.4	3.26	−4.29
	أسطواني		فارغ	3.42	3.29	−3.95
			نصف مليء	2.68	2.6	−3.08
			مليء	2.81	2.72	−3.31

يلاحظ من الجدول (12) ولحالة مقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$ أن أكبر قيمة انخفاض في قيم معامل السلوك اللامرن R عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ مقارنة مع فولاذ $f_y = 240\ MPa$ كانت 13.95% لحالة هيكل إطاري بحوض مليء بتأثير سجل ARMENIA 1988/ 0.387g وبلغ متوسط قيم انخفاض قيم المعامل R لجميع الحالات الأخرى % 2.23.

ولأجل مقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30\ MPa$ جدول (13) كانت أكبر قيمة للانخفاض في قيم معامل السلوك اللامرن R عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ مقارنة مع فولاذ $f_y = 240\ MPa$ كانت 14.35% لحالة هيكل اسطواني بحوض فارغ بتأثير سجل ARMENIA 1988/ 0.387g وبلغ متوسط قيم الانخفاض لجميع الحالات الأخرى 3.5%.

5. الاستنتاجات والتوصيات:

بنتيجة تحليل النموذجين المدروسين والقيم المستخدمة لخصائص مواد الإنشاء:

1. أظهرت المقارنة بين قيمتي المقاومة المميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$ و$f_c^{/} = 30\ MPa$ تجاوز قيم إجهادات الشد في البيتون للنموذجين مقاومة الشد مما أدى إلى تطور الضرر وفق نموذج CDP مع بقاء نموذج الضرر متشابهاً وحصول تغيرات صغيرة في قيم Damage T مما يشير إلى أنَّ زيادة المقاومة المميزة ضمن المجال المدروس لم تؤدي إلى تغير واضح في نموذج تطور الضرر.
2. يؤدي رفع إجهاد خضوع فولاذ التسليح المستخدم إلى زيادة واضحة في إجهادات الشد لفولاذ التسليح حيث بلغ متوسط نسب الزيادة 33.29% لحالة المقاومة المميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$ و 30.99 % لحالة المقاومة المميزة للبيتون $f_c^{/} = 30\ MPa$ مما يؤكد على التأثير المباشر لإجهاد الخضوع كأحد الخصائص الميكانيكية للفولاذ على الاستجابة المحلية لعناصر التسليح.
3. إن معامل السلوك اللامرن R يتمتع بحساسية محدودة تجاه تغير قيم إجهاد خضوع فولاذ التسليح (بلغ متوسط نسب الانخفاض في قيمه 2.23% باستخدام الفولاذ ذو الإجهاد الأعلى لحالة $f_c^{/} =$ 25 MPa والقيمة 3.5% باستخدام الفولاذ ذو الإجهاد الأعلى لحالة $f_c^{/} = 30\ MPa$) مقارنةً مع التأثر الواضح لإجهادات الشد لفولاذ التسليح، وبالتالي فإن زيادة إجهاد خضوع فولاذ التسليح لا يؤدي إلى تحسين الاستجابة اللاخطية للمنشأ وقدرة تبديد الطاقة الزلزالية مما يشير إلى إمكانية

استخدام قيم موحدة لمعامل السلوك اللامرن R ضمن المجال المذكور لإجهادات الخضوع لفولاذ التسليح.

4. إن تأثير نوع الهيكل الحامل للخزان أكبر من تأثير الخصائص الميكانيكية لمواد البناء في تحسين الأداء الزلزالي بزيادة الطاقة المبددة الناتجة عن الاستجابة اللامرنة ضمن المجال المدروس.
5. يوصى بتوسيع نطاق الدراسة ليشمل قيماً أخرى للخصائص الميكانيكية لمواد البناء وأشكال هندسية أخرى من خزانات المياه العالية للتحقق من وثوقية نتائج الدراسة.
6. إجراء دراسات إضافية لتقييم تأثير عوامل أخرى على قيم المعامل R وقدرة تبديد الطاقة (الاستجابة اللاخطية) سواء من الخصائص الميكانيكية لفولاذ التسليح أو البحث ضمن مفهوم الطاقة عن آليات تشكل اللدونة وتبديد الطاقة وتوزيعها ضمن النظام الإنشائي.
7. أن يتم اختيار مقاومة البيتون وإجهاد خضوع فولاذ التسليح وفق متطلبات المقاومة والمتانة للمنشأ وليس بهدف زيادة قيم المعامل R.

6. المراجع:

[1] الكود العربي السوري، 2012، *الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة*.

[2] الملحق (7) للكود العربي السوري،2022، *تصميم خزانات المياه الخرسانية المسلحة وتنفيذها*. سورية.

[3] ناصر، عصام ، حسن، مالك، وموسى منهل.2016، *دراسة تحليلية مقارنة لبعض طرق نمذجة السائل في خزانات المياه العالية*. مجلة جامعة حمص مجلد 38، العدد5.

[4] الطرشة، إحسان، غريب، تراث، الضايع، عبدالحليم. 2024، *التحليل الديناميكي اللاخطي لخزان عالي مع أخذ أثر حركة المياه ضمن الحلة*. مجلة جامعة حمص مجلد 46، العدد6.

[5] American Society of Civil Engineers.2010, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE7-10)*.Reston, VA, USA.

[6] American Concrete Institute (ACI).(2006).Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary (ACI350.3-6). Farmington Hills, Michigan, USA.

[7]Applied Technology Council (ATC). 1995, A Critical Review of Current Approaches to Earthquake-Resistant Design. Redwood city, California, USA.

[8] European Committee for Standardization, Eurocode8.2006, *Design of structures for earthquake resistance-Part4:Soils,tanks and pipelines*. Brussels, Belgium.

[9] Gholami, N; Garivani, S; Askariani, S, S.2021, *State – of – the Art Review of Energy – Based Seismic Design Methods.* Archives of Computational Methods in Engineering (2022) 29:1965-1996, CIMNE, Barcelona, Spain2021.

[10] Gurkalo, F; HE,C; Konstantinos P & He, N; (2024), *Effects of innovative reinforced concrete slit shaft configuration on seismic performance of elevated water tanks*. Scientific Reports , (2024) 14:6113 , https://doi.org/10.1038/s41598-024-56851-3.

[11] Housner, G, W.1963, *"The Dynamic Behavior of Water Tanks"* ,*Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, No. 2, pp. 381-387. February,.

[12] IITK-GSDMA Project Team. (2007),*Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks*. Indian Institute of Technology Kanpur and Gujarat State Disaster Management Authority, Kanpur, India

[13] Jani, B; Agrawal , V; Patel , V.(2020), *Effects of soil condition on elevated water tank using time history analysis with different staging systeme* . Article in International Journal of Civil Engineering , June . See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/342551140.

[14] Khiavi, P, Majid; Feizi, Atabak; Ramzi, Leila, (2021), *Effect of Strength Parameters on Seismic Performance of Elevated Tanks by Probabilistic Analaysis*. Journal of Hydraulic Structures, May.

[15] Segura, S., Sattar, S., & Hariri- Aredebili, M. A. (2022). *Quantifying Material Uncertainty in Seiamic Evaluation of Reinforced Concrete Bridge Column Structures*. Materials, 15(23),8479.

[16] Uniform Building Code .1997,Volume 2.