مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٦) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (6) 2026

دراسة حالة للأداء الزلزالي لخزان مياه عالي مستطيل الشكل واقتراح الحلول المثلى لإصلاحه وتقويته

د.م. سامر سليمان*

د.م. ميس غصون**

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٦/٢/٢٢ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/٤/٨)

□ ملخّص □

يعد التقييم المتقدم للصحة الإنشائية (ASHA) أمراً ضرورياً لضمان استدامة منشآت البنية التحتية المهمة على المدى الطويل، لا سيما في المناطق المعرضة للمخاطر الطبيعية. تقدم هذه الورقة البحثية دراسة متعمقةً لخزان مياه مرتفع من الخرسانة المسلحة (RC) يقع في منطقة ساحلية في سوريا، ذات الاحتمالية المرتفعة للنشاط الزلزالي. تهدف الدراسة إلى تقييم الحالة الحالية للخزان الذي تم تصميمه وفقاً لمعايير إنشائية قديمة تفتقر إلى تحليل مفصل لمقاومة الأحمال الزلزالية. ولتحقيق ذلك تم اعتماد منهجية بحثية متكاملة تجمع بين التقييم التفصيلي للعيوب الإنشائية في الموقع، وتطبيق الاختبارات غير المتلفة (NDT) لتقدير الخواص الميكانيكية في الموقع بدقة، والتحليل العددي المتقدم باستخدام برمجيات طريقة العناصر المحدودة (FEM).

تتيح هذه المنهجية المتكاملة إجراء تقييم تفصيلي للأداء الإنشائي للخزان في ظل سيناريوهات تحميل مختلفة، مع التركيز بشكل خاص على استجابته الديناميكية للأحمال الزلزالية الحرجة. بينت النتائج وجود تدهور إنشائي يتطلب التدخل، وحدد التحليل العددي نقاط ضعف محددة في مقاومة الأحمال الزلزالية. استناداً إلى هذه النتائج، تقترح الدراسة تقنيات تقوية متعددة. وتظهر أن استخدام تقنية التطويق بطبقة واحدة من الـ CFRP بعد تدوير الزوايا بقطر ٧٥ مم كطريقة فعالة لتحسين قدرة الأعمدة على تحمل الأحمال الزلزالية. تشير المحاكاة العددية إلى أن هذه التقنية تزيد قدرة التحمل القصوى للأعمدة بنسبة تزيد عن ١٠٪ مما يحسن الأداء الزلزالي العام للخزان. كما يقدم هذا البحث مساهمة علمية قيّمة من خلال إظهار أهمية المنهجيات المتكاملة في تقييم السلامة الإنشائية للهياكل الحيوية في المناطق النشطة زلزالياً، وتقديم توصيات عملية وقابلة للتطبيق لضمان سلامتها واستدامتها.

الكلمات المفتاحية: الأداء الزلزالي، خزان مياه عالي، تقنيات التقوية والإصلاح، محاكاة عددية بطريقة العناصر المنتهية، SAP2000، ANSY٢٠.

* أستاذ مساعد في كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، طرطوس – سوريا. إيميل: samerslaiman1@gmail.com

**مدرس في كلية الهندسة، جامعة الوادي الدولية الخاصة، حمص – سوريا. إيميل: dr-maisghassoun@wiu.edu.sy

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٦) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (6) 2026

A Case Study of the Seismic Performance of a Rectangular High Elevated Water Tank and Typical Methods for Repair and Strengthening

Dr. Samer Suleiman*

Dr. Mais Ghassoun**

(Received 22/2/2026 . Accepted 8/4/2026)

□ ABSTRACT □

An Advanced Structural Health Assessment (ASHA) is essential for ensuring the long-term sustainability of important infrastructure, particularly in regions subject to natural hazards. This paper presents an in-depth investigation into a reinforced concrete (RC) elevated water tank located in a coastal region of Syria, where seismic activity is prevalent. The study aims to evaluate the tank's current condition, which was designed according to outdated structural standards lacking detailed seismic load resistance analysis. An integrated research methodology combining detailed on-site structural defect assessment, the application of non-destructive testing (NDT) to accurately estimate in-situ mechanical properties and advanced numerical analysis using finite element method (FEM) software was adopted to achieve this.

This integrated approach enabled a thorough evaluation of the tank's structural performance under different loading conditions, particularly its response to significant seismic forces. The results revealed structural deterioration requiring intervention, with numerical analysis identifying specific weaknesses in seismic load resistance. Based on these findings, the study proposes optimised strengthening techniques. It highlights that the typical strengthening technique in this case is the use of CFRP confinement with rounding the section angles by 75mm diameter because it increases load bearing capacity by more than 10% that improves the seismic performance. This research makes a valuable scientific contribution by demonstrating the importance of integrated methodologies for assessing the structural health of vital structures in seismically active regions and by offering practical recommendations for ensuring their safety and sustainability.

Keywords: Seismic performance, Elevated Water Tanks, Repair and Strengthening Techniques, Finite Element Analysis, SAP2000, ANSYS٢٠.

1-Assistant Professor, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria - E-mail: samerslaiman1@gmail.com

2- Lecturer _Wadi International University-Homs-Syria - E-mail: dr-maisghassoun@wiu.edu.sy

١. المقدمة:

تعتبر خزانات المياه العالية (EWTs) من الهياكل الهندسية الهامة التي تضمن استدامة إمدادات المياه لأغراض الشرب ومكافحة الحرائق، خاصةً في أعقاب الكوارث الطبيعية [١٠]. وتكمن أهميتها في الحفاظ على ضغط المياه وتوفير احتياطيات استراتيجية [١٥]. إن أي عطل في هذه الهياكل يشكل خطراً كبيراً على السلامة العامة [١٣]. وتتميز هذه الخزانات بتصاميم متنوعة وغالبًا ما تقع في المراكز الحضرية، مما يزيد من احتمالية حدوث أضرار بسبب الانهيار [٢٥]. كما أن لبعض الخزانات القديمة قيمة تاريخية، مما يعني ضرورة الحفاظ عليها وجعلها أكثر مقاومة للزلازل [١٥]. أبرزت الأحداث الزلزالية الأخيرة أهمية تقييم المقاومة الزلزالية للبنى التحتية الحيوية [٤،٧]. تُستخدم تقنيات النمذجة المتقدمة على نطاق واسع لتحليل سلوك المنشآت المائية تحت الأحمال الزلزالية [٨،٢٠]. تمكّن هذه النماذج من محاكاة الاستجابات الهيكلية غير الخطية وتحديد أنماط الانهيار المحتملة في مختلف المكونات مثل الجوائز والأعمدة والجدران. وتُستخدم هذه الطرق أيضاً لتقييم تأثير أبعاد الخزان على الأداء الزلزالي وتطوير معاملات الاستجابة الزلزالية المناسبة للتصميم [٨،٢١]. بالإضافة إلى التحليل العددي، تزداد أهمية مراقبة الصحة الإنشائية لفهم الحالة الراهنة لهذه الهياكل. ويشمل ذلك عمليات الفحص البصري والفحص غير الميكانيكي لتقييم حالة المواد والهيكل واستخدام أجهزة استشعار متقدمة لجمع بيانات مستمرة عن السلوك الإنشائي مع مرور الوقت [٥،١٩]. تُعد نتائج هذه التقييمات حاسمة في تحديد أولويات أعمال الصيانة والإصلاح، وتقييم الحاجة إلى التقوية الزلزالية، لا سيما بالنسبة للهياكل القديمة والمتدهورة [٦،١٦]. تسلط الدراسات الضوء على أهمية النظر في تأثيرات الأحداث الزلزالية المتعددة والمتسلسلة في تقييم الأداء الزلزالي [١٧،٢٣].

تطورت خزانات المياه البيتونية المسلحة عبر التاريخ وأصبحت الخيار السائد في أنظمة توزيع المياه الحديثة [١٥،١٤]. تمثل خزانات المياه العالية أنظمة إنشائية استراتيجية ذات سلوكيات معقدة تحت الأحمال الزلزالية [١١]. وبالتالي، لضمان سلامة واستدامة الهياكل، يجب دمج تقنيات النمذجة المتقدمة مع إجراءات التقييم الهيكلي الشامل. تقدم هذه المقالة العلمية دراسة حالة مفصلة تركز على تقييم السلامة الإنشائية لخزان مياه مرتفع من الخرسانة المسلحة بسعة ٦٠ متراً مكعباً في مدينة طرطوس في سوريا. يخدم هذا الخزان مجتمعاً يضم أكثر من ٥,٠٠٠ شخص وفق تقديرات مؤسسة مياه محافظة طرطوس، وقد تم تشييده في بداية تسعينيات القرن الماضي بناءً على معايير البناء الخرسانية المسلحة السورية السائدة في ذلك الوقت، والتي كانت تفتقر إلى أحكام تصميم زلزالي شاملة. يتألف الهيكل الإنشائي للخزان من أربعة أعمدة وجدران (عناصر قشرية RC) وبلاطات، يبلغ الارتفاع الكلي للهيكل حوالي ١١ متراً تقريباً مع مجازات صافية تبلغ ٣,٣ متراً بين الأعمدة وارتفاع صافي لأسفل الحلة مقداره ٨,٠ متر (الشكل ١)، بُني الخزان في منطقة سكنية جانب أحد البيوت السكنية في قرية الجراص وقريب من الطريق الرئيسي الواصل بين طرطوس والدريكيش.

وبالنظر إلى النشاط الزلزالي المرتفع في المنطقة والدور الهام للخزان فإن إجراء تقييم شامل ومتعمق أمر هام للغاية. تدمج هذه الدراسة بين الفحص الحقلي الشامل باستخدام الاختبارات غير المتلفة (NDT) للكشف عن التضررات لتحديد حالة المواد الحالية والسلامة الهيكلية مع التحليل العددي المتقدم باستخدام SAP2000 للسلوك الإنشائي العام وANSYS لتقييم الإجهاد التفصيلي داخل عناصر الجدران الخرسانية القشرية وفق طريقة العناصر المنتهية. توفر هذه المنهجية المتكاملة فهماً جيداً لحالة الخزان الحالية ونقاط الضعف المحتملة فيه، مما يمهد

الطريق لحلول التقوية المستهدفة والفعالة لتعزيز مقاومته الزلزالية وضمان استدامته على المدى الطويل. تساهم هذه الدراسة في إثراء المعرفة العلمية في تقييم السلامة الإنشائية للمنشآت الحيوية في المناطق النشطة زلزالياً وتوفر إطاراً منهجياً قابلاً للتطبيق على نطاق واسع لتقييم وإعادة تأهيل المنشآت المماثلة.



الشكل (١) الشكل العام للخزان المدروس من جهات مختلفة

٢. التحديات الزلزالية والحاجة الملحة للتقييم:

يقع الخزان قيد الدراسة في منطقة لها تاريخ من النشاط الزلزالي. وقد تعرضت مؤخراً في شهر شباط ٢٠٢٣ لزلزال ذو شدة تجاوزت السبع درجات على مقياس ميركالي المعدل (MMI) وقد تم بناء الخزان في بداية التسعينيات من القرن الماضي وفقاً لمعايير البناء السائدة التي لم تتضمن تحليلاً مفصلاً لمقاومة الأحمال الزلزالية. مع التطورات الأخيرة في فهم السلوك الزلزالي للمنشآت وتحديثات قوانين البناء وملاحق الكود العربي السوري، أصبح من الضروري إعادة تقييم المقاومة الزلزالية لهذه الأنواع من المنشآت. ويُعد استخدام أدوات التحليل العددي المتقدمة مثل SAP2000 و ANSYS أمراً بالغ الأهمية في هذا السياق، حيث تُمكّن هذه الأدوات البرمجية

المهندسين والباحثين من محاكاة السلوك الإنشائي المعقد في ظل ظروف التحميل الديناميكية والتنبؤ بدقة بالاستجابة الإنشائية [٣،٢]. بالإضافة إلى ذلك، توفر أداة NDT بيانات واقعية عن الخواص الميكانيكية للمواد في الموقع. وهذا يحسن دقة النماذج العددية ويعزز موثوقية نتائج التحليل.

٣. نتائج الفحص البصري والكشوف الأولية

من خلال الزيارات الميدانية المتعددة لموقع الخزان لمعاينة المنشأ من الخارج وتوصيف الحالة العامة للاطلاع على الوضع الراهن للخزان ومعاينته من الداخل عند المستويات المختلفة وإجراء بعض القياسات والاختبارات تبين ما يلي:

حالة جدران حلة الخزان مقبولة إلى جيدة بشكل عام مع وجود مناطق واسعة من البقع الداكنة وبعض مناطق الشقوق الدقيقة (انظر الأشكال ١ إلى ٤). عانى ما يقرب من ٣٠٪ من مساحة سطح الجدران من تنقرات سطحية من دون وجود تشققات كبيرة. الحالة العامة لأسفل أرضية الحلة الخرسانية مرضية في المنتصف مع وجود بعض العيوب بالقرب من الحواف الخارجية. العيوب الوحيدة المرئية في منتصفها هي بعض المناطق الصغيرة من البقع وبعض مناطق التشققات الدقيقة (انظر الشكل ٢). كما لوحظت مناطق صغيرة منعزلة من التشققات وتساقط الغطاء الخرساني بالقرب من الحواف، خاصة الجانب الغربي، حيث حصل تساقط الغطاء الخرساني وتكشف التسليح. وأيضاً لوحظ تآكل قضبان التسليح الفولاذية في هذه المناطق التي غطتها البقع والشقوق بالكامل (انظر الشكل ٣). بالنسبة للجوائز تحتوي غالبية المجازات في المستوى العلوي (المستوى ٢) على مناطق واسعة من التساقط في الغطاء البيتوني مع تآكل متوسط إلى شديد في قضبان التسليح المكشوفة مع فقدان كبير في مقاطعها (انظر الأشكال ٢ إلى ٤). أما في المستوى ١، يوجد تشقق عميق في الغطاء الخرساني على الجوائز الشرقية والجنوبية مع وجود تسليح مكشوف. في حين كانت الحالة العامة للجوائز الغربية والشمالية من جيدة مع وجود بعض التفكك في طبقة الطينة الخارجية.

أما فيما يخص الأعمدة فيمكن تلخيص وضعها بالشكل التالي:

العمود C1: العمود في حالة جيدة بشكل عام، ولكن مع تقشر في طبقة الملاط الخارجي في عدة مناطق

العمود C2: العمود في حالة جيدة بشكل عام، ولكن مع وجود شرخ طولي في الزاوية

العمود C3: العمود بحالة جيدة بشكل عام، ولكن مع تقشر غطاء الملاط الخارجي في عدة مناطق.

العمود C4: لوحظ وجود تشقق في الغطاء الخرساني وقضبان التسليح المكشوفة بالإضافة إلى تقشر غطاء الملاط الخارجي على جانب واحد.



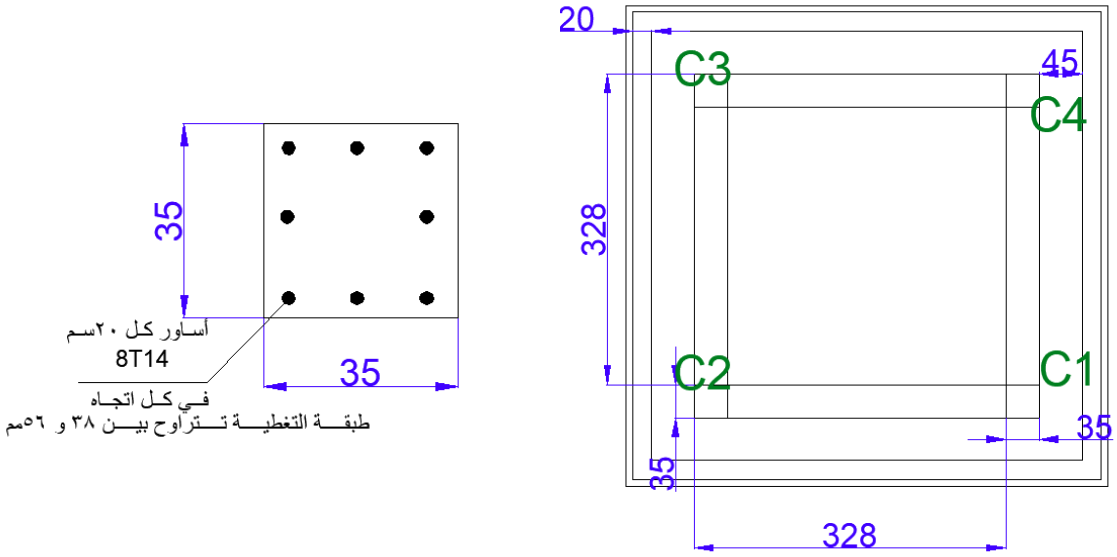
الشكل ٢: الحالة العامة لأسفل أرضية الحلة الخرسانية مرضية في المنتصف



الشكل ٣: الحواف الخارجية لأسفل أرضية الحلة الخرسانية

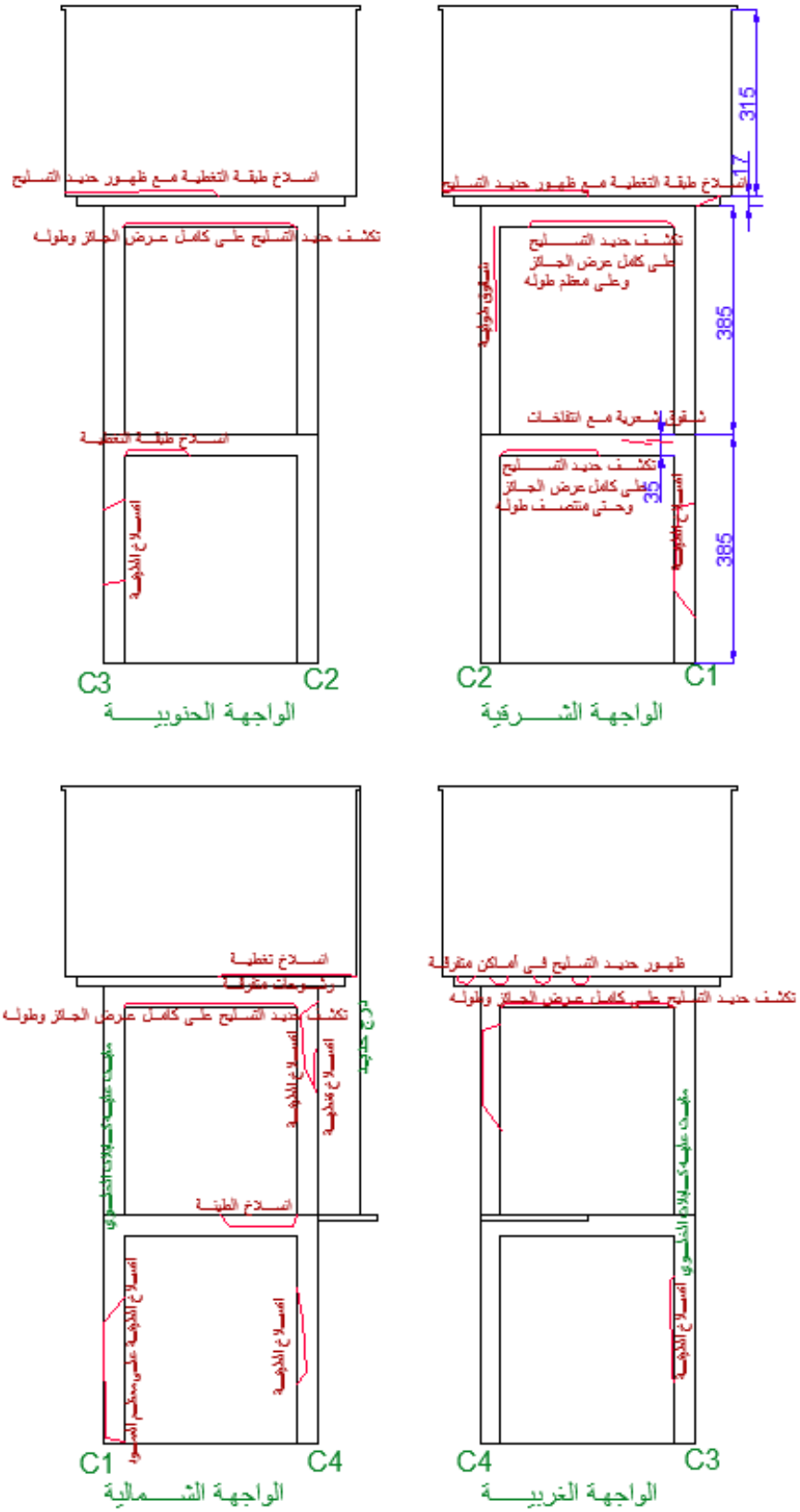


الشكل ٤: الحواف الغربية لأسفل أرضية الحلة الخرسانية

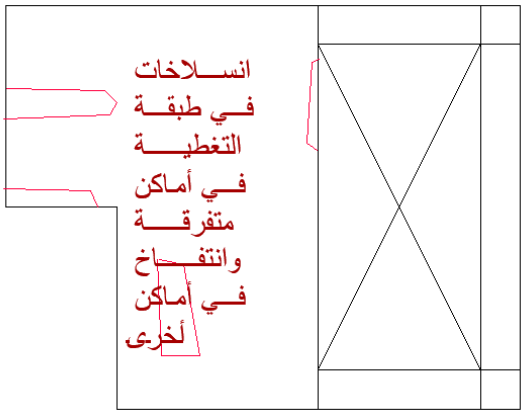


مقطع عرضي في الأعمدة

الشكل ٥: مسقط أفقي للخزان يبين تسميات الأعمدة ومقاطعها



الشكل ٦: التشققات والتضررات على الواجهات المختلفة للخزان



الشكل ٧: مسقط أفقي يبين التشققات والتضررات على الوجه السفلي لبلاطة الخدمة النصفية

٤. ملخص طرق ونتائج الاختبارات غير المتلفة:

تم إجراء اختبار الخرسانة على أسطح الأعمدة والجوائز والبلاطات وجدران الحلة. حيث شمل اختبار عدة مناطق في كل عنصر، بما في ذلك قياس سمك طبقة التغطية البيتونية وفقاً لمعيار BS١٨٨١-٢٠٤ واختبار مطرقة شميدت وفقاً لمعيار ASTM C٨٠٥-٠٨. تباينت امتدادات مناطق الاختبار لتناسب كل موقع. تم اختيار مناطق الاختبار عشوائياً بالقرب من مركز العناصر نظراً لعدم وجود عيوب. حيث أزيلت طبقة التغطية البيتونية المتكسرة أصلا لكشف التسليح. وقد أتاح ذلك فحص وقياس الفولاذ في المناطق المكشوفة والتحقق من نتائج اختبار قياس سمك طبقة التغطية البيتونية. كما تم ضرب سطح الخرسانة بمطرقة صغيرة من أجل تحديد المناطق المتقشرة وتسجيل مواقعها وامتدادها ورسمها على مخططات التضرر.

تم إجراء اختبار مطرقة شميدت باستخدام ٢٥ موقع اختبار لكل مكون بعد تحضير سطح الاختبار ليكون أملسا وإزالة جميع الأتربة والغبار عن سطح الاختبار. واستخدمت مخططات المعايرة بناءً على نشرة مواصفات الشركات المصنعة واختبارات المعايرة المخبرية النموذجية للسماح بتحويل القياسات في الموقع إلى المقاومة المميزة للخرسانة على الضغط. يوضح الجدول (١) جودة الخرسانة بناءً على نتائج اختبار مطرقة شميدت.

الجدول ١: نتائج اختبار مطرقة شميدت وتصنيف حالة الخرسانة والمقاومة المميزة للخرسانة على الضغط

العينة	مكان الاختبار	R_{mi}	R_m	جودة الخرسانة	المقاومة المميزة f_{ck}cyl.m (MPa)
العمود C1	الجهة الغربية	52	43.3	ممتازة	39.5
	الجهة الجنوبية	51	42.5	ممتازة	38.5
العمود C2	الجهة الشمالية	51.5	42.9	ممتازة	39
	الجهة الغربية	50	41.7	ممتازة	37
العمود C3	الجهة الغربية	59	49.2	ممتازة	48
العمود C4	الجهة الجنوبية	60	50.0	ممتازة	48
الجائز B1	بين(C3-C4)	46	38.3	جيدة جداً	35
الجائز B2	بين (C3-C٢)	49	40.8	ممتازة	38
البلاطة S1	T	45	37.5	جيدة جداً	32

حيث: Rmi: القيمة المتوسطة لقراءة المطرقة الأولية

Rm : القيمة المتوسطة لقراءة المطرقة بعد المعايرة

الجدول ٢: التصنيف النوعي لنتائج اختبار مطرقة شميدت وتقييم حالة الخرسانة

جودة البيتون	متوسط القراءات
ممتاز	>40
جيد جداً	30 – 40
جيد	20 – 30
معتدل	10 – 20
ضعيف	٥ to 10
ضعيف جداً	٥ >

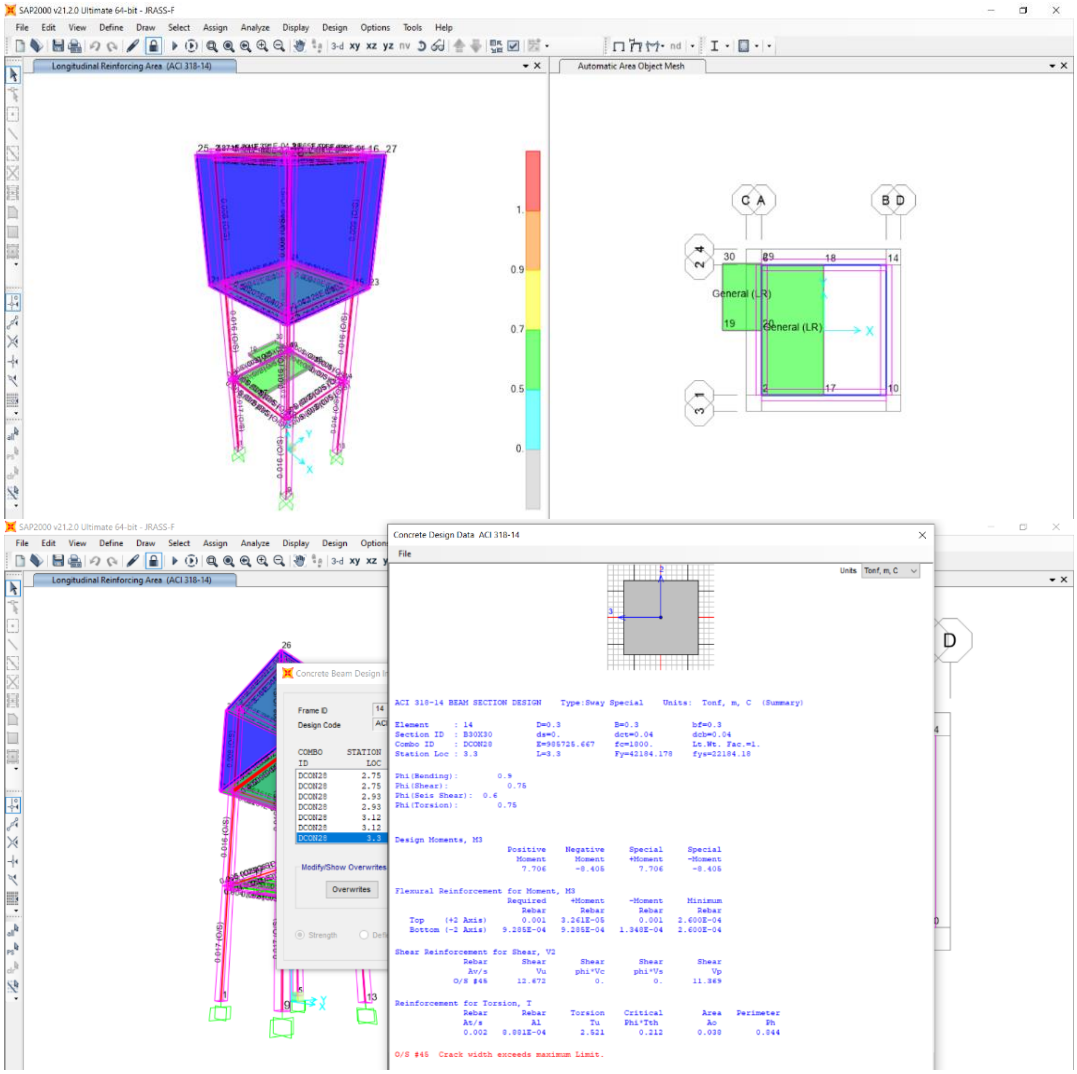
٥. النمذجة بطريقة العناصر المحدودة باستخدام SAP 2000 لتحليل الاستجابة الزلزالية

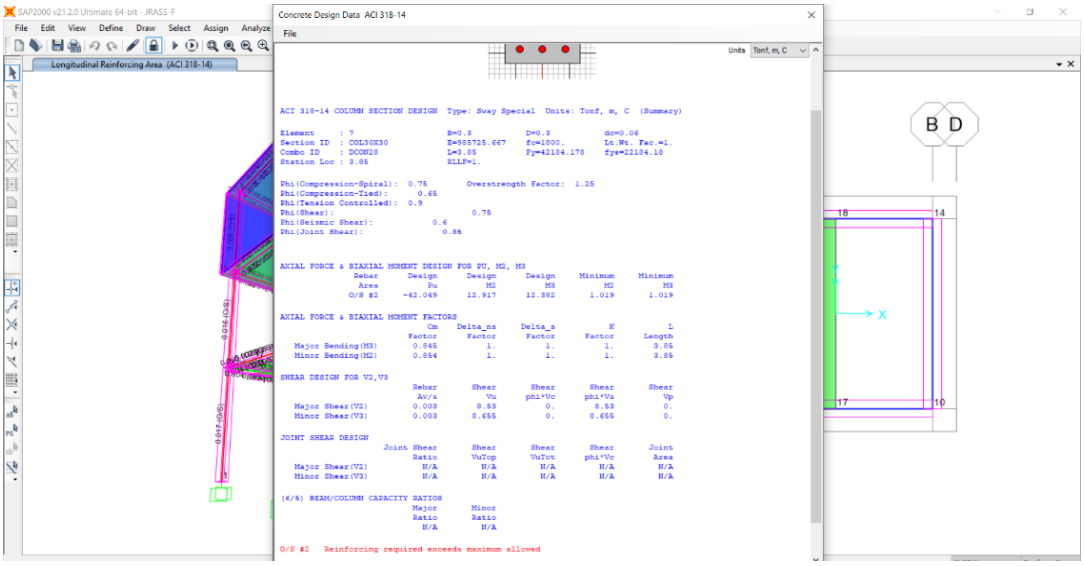
تم تطوير نموذج العناصر المحدودة للخزان باستخدام برنامج SAP2000 وتمثيل العناصر الهيكلية باستخدام أنواع العناصر المناسبة، أي عناصر إطارية للأعمدة والجوائز، وعناصر مستوية للبلاطات والجدران. تم تحديد الحمولات وخصائص المواد على النحو التالي:

اعتبار حمولة الماء في الخزان كحمولة حية ومقدارها ٦٠ طناً حسب المواصفات التصميمية المأخوذة من مؤسسة مياه طرطوس واعتبارها تطبق أحمالاً رأسية على أرضية الخزان وأيضاً قوى ضاغطة على جدرانه. كما تم أخذ حمل ميت إضافي مقداره ٢,٥ kN/m^2 مع الوزن الذاتي كحمولة شاقولية على البلاطة السفلية للخزان. إن السلوك الديناميكي للخزانات المرتفعة معقد نسبياً بسبب حركة السوائل في الخزان ففي حين أن الماء الموجود في الأجزاء العلوية من الخزان يولد موجات للسوائل تحت التسارع الجانبي، فإن الماء الموجود في قاع الخزان يتحرك مع هيكل الخزان ويزيد من القصور الذاتي لهيكل الخزان]٩[.

بعد مراجعة القيم التي تم الحصول عليها من الاختبارات غير المتلفة السابقة، والأخذ في الاعتبار إزالة الأخطاء المحتملة للمطرقة المرتدة ($\pm 50\%$) نحصل على قيمة المقاومة المميزة للخرسانة على الضغط $f'c$ ووفقاً لخصائص فولاذ التسليح المتوفر في السوق السورية خلال فترة بناء هذا الخزان، يمكن اعتبار قوة الخضوع لفولاذ التسليح هي $fy = 360MPa$ في حين تم اعتماد قيم المقاومة المميزة للخرسانة المسلحة الجديدة التي سيتم استخدامها في تقوية المكونات الجديدة $f'c = 30MPa$ وإجهاد الخضوع لفولاذ التسليح $fy =$ $400\ MPa$.

تعتمد معظم الكودات الزلزالية العالمية نموذج درجة حرية واحدة لتحليل الخزانات المرتفعة [١٢,٢٤]. يمكن أن يكون هذا الافتراض واقعياً بالنسبة للخزانات التي تزيد نسبة الارتفاع/نصف القطر عن ٤. يتبنى الكود [١] ACI 371R-١٦ نموذج درجة حرية واحدة في الحالات التي يكون فيها وزن الماء حوالي ٨٠% من الوزن الزلزالي الكلي للخزان. على الرغم أن الكود الزلزالي (IBC ٢٠٠٠) لا يحدد كيفية تحليل الخزانات المرتفعة، إلا أنه يتم استخدام نموذج متعدد درجات الحرية بشكل عام في الحسابات العملية. يوصي IBC ٢٠٠٠ بمعامل أهمية منشأ مقداره I = ١,٢٥ لخزانات المياه ومعامل استجابة [١٨] R = ٢.





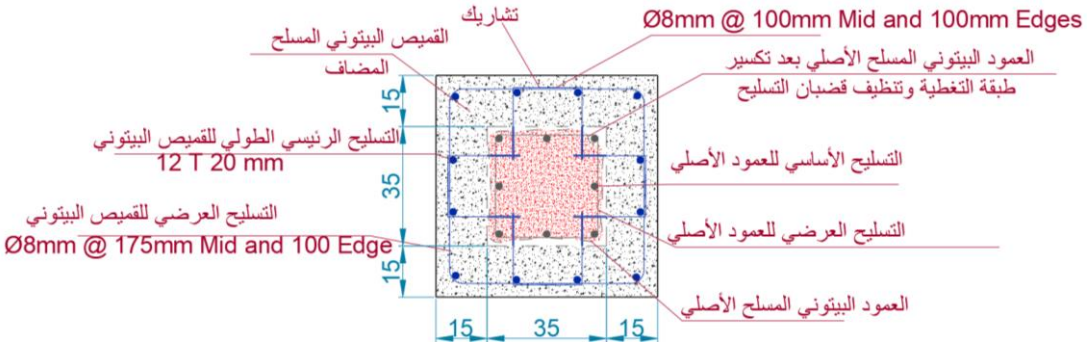
الشكل (٨): نموذج Sap٢٠٠٠ يُظهر سلوكاً غير آمن في أعمدة الخزان تحت تأثير الأحمال الزلزالية

نلاحظ من الشكل (٨) أن نموذج Sap2000 يُظهر سلوكاً غير آمن في أعمدة خزان المياه المدروس تحت الأحمال الزلزالية. في هذه الحالة، من الواضح أنه بدون التدعيم، ستزداد نسبة سعة الطلب) التي يتم الحصول عليها بقسمة الأحمال المحسوبة/ السعة المتوقعة) بشكل أكبر للهيكل المتضرر. وهذا يشير إلى ضعفه في الزلازل المستقبلية.

٦. الطرق المقترحة للإصلاح والتقوية:

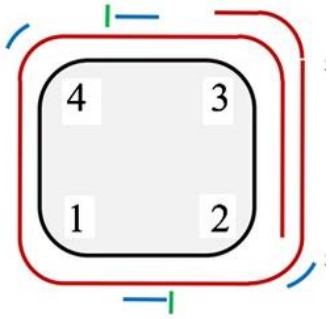
تظهر النتائج المستمدة من عمليات الاختبارات والمعاينات والفحوصات الهيكلية التفصيلية في الموقع، جنباً إلى جنب مع التحليلات الرقمية المتقدمة، تدهوراً هيكلياً كبيراً لخزان المياه، يؤثر بشكل أساسي على أعمدة الخزان والتي تظهر قدرة محدودة على مقاومة القوى الزلزالية، بالإضافة إلى علامات واضحة على تدهور المواد. لذلك، هناك حاجة ماسة إلى إعادة تأهيل وتقوية هيكلية لمقاومة الزلازل ولضمان سلامة تشغيل الخزان وإطالة عمره الوظيفي. ومن خلال الدراسة التقييمية نجد أن خزان المياه يحتاج إلى زيادة القوة والمطاوعة معاً [22].

الخيار الأول للتقوية: يمكن استخدام القمصان الخرسانية المسلحة لزيادة مقاومة عزم الانعطاف وقوة القص وكذلك زيادة صلابة الأعمدة. يجب أن يتم تثبيت القمصان الطولية الإضافية بشكل جيد مع الأعمدة الأصلية والجوائز وأيضاً مع القاعدة. فالصلابة العالية للأعمدة الخرسانية المسلحة من شأنها أن تحسن استجابتها للزلازل عن طريق تقليل إزاحة الخزان. تم اختبار أربعة أبعاد للقمصان (٥٠ × ٥٠ و٥٥ × ٥٥ و٦٠ × ٦٠ و٦٥ × ٦٥ سم) بشكل منفصل للأعمدة الجديدة باستخدام برنامج SAP٢٠٠٠ . وقد وجد أن المقطع الجديد بأبعاد مقطعية ٦٥ سم مناسب لهذا الخزان لزيادة مقاومة عزوم الانعطاف وقوة القص وكذلك زيادة صلابة الأعمدة، حيث زادت الصلابة بمقدار ٤ أضعاف مما كانت عليه دون تدعيم.



الشكل (٩): المقطع العرضي الجديد ذو أبعاد ٦٥ × ٦٥ سم

الخيار الثاني للتقوية هو تطويق الأعمدة الخرسانية المسلحة برقائق البوليميرات المقواة بألياف الكربون (CFRP) التي تزيد المطاوعة والمقاومة. بالنسبة لهذا الخزان وجد أن تطويق أعمدته بالـ CFRP هي الطريقة الملائمة للتقوية بسبب سهولة التنفيذ والاقتصادية. إن تحسين خصائص الخرسانة المطوقة من شأنها أن تقوي استجابته الزلزالية. تم تحديد عدد طبقات شرائح الـ CFRP ونصف قطر الزوايا التي تحتاج إلى تدوير وإدخالها في نموذج SAP٢٠٠٠ لحالة حمل زلزالي شديد. تبين أن أضافة طبقة واحدة من CFRP بنصف قطر ٧٥ مم أدت إلى زيادة في قدرة التحمل القصوى للأعمدة بنسبة تزيد عن ١٠٪.



الشكل (١٠): المقطع العرضي الجديد بعد تدوير الزوايا والتطويق بالـ CFRP

٧- الاستنتاجات والتوصيات:

تؤكد الدراسة على أهمية إجراء تقييمات منتظمة للسلامة الهيكلية للخزانات العالية التي تقع في مناطق نشطة زلزالياً، لا سيما تلك التي تم تشييدها وفقاً لمعايير تصميم قديمة. وتتيح منهجية التقييم الشامل التي تجمع بين عمليات الفحص والاختبارات الميدانية غير المتلفة والنمذجة الرقمية المتقدمة فهماً شاملاً لحالة الخزان وتدعم اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن تقنيات الإصلاح والتقوية اللازمة.

تحدد دراسة التقييم هذه عيوباً هيكلية كبيرة في خزان المياه الذي تم فحصه، مع ملاحظة ضعف خاص في الأعمدة، مما يستلزم تدخلات محددة الهدف لتعزيز قوته ومطاوعته. تم تحديد التطويق بطبقة واحدة من الـ CFRP بعد تدوير الزوايا بقطر ٧٥ مم كطريقة فعالة لتحسين قدرة الأعمدة على تحمل الأحمال مقابل القوى الزلزالية. تشير المحاكاة العددية إلى أن هذه التقنية تزيد قدرة التحمل القصوى للأعمدة بنسبة تزيد عن ١٠٪ مما يحسن الأداء الزلزالي العام للخزان.

References:

[1] ACI 371R-16: Guide for the Analysis, Design, and Construction of Elevated Concrete and Composite Steel-Concrete Water Storage Tanks, (n.d.).
[2] G. Calvi, R. Nascimbene, Seismic Design and Analysis of Tanks, John Wiley & Sons, 2023.
[3] S. CSI, Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA, Sa (2000).
[4] E. Damcı, R. Temür, Z. Kanbir, Ç. Şekerci, E. Öztorun Köroğlu, Comprehensive Investigation of Damage Due to 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in Türkiye: Causes, Consequences, and Mitigation, Journal of Building Engineering 99 (2025) 111420. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111420.
[5] S. De Santis, M. Sangirardi, V. Altomare, P. Meriggi, G. De Felice, Computer Vision-Based Dynamic Identification of a Reinforced Concrete Elevated Water Tank, J Civil Struct Health Monit 15 (2025) 105–125. https://doi.org/10.1007/s13349-024-00817-6.
[6] M. Dilena, M.F. Dell'Oste, A. Gubana, A. Morassi, F. Polentarutti, E. Puntel, Structural Survey of Old Reinforced Concrete Elevated Water Tanks in an Earthquake-Prone Area, Engineering Structures 234 (2021) 111947. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111947.

[7] S.C. Dutta, S. Dutta, R. Roy, Dynamic behavior of elevated tanks with soil–structure interaction, Engineering Structures 31 (2009) 2617–2629. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.06.010.
[8] R. Ghateh, M.R. Kianoush, W. Pogorzelski, Seismic Response Factors of Reinforced Concrete Pedestal in Elevated Water Tanks, Engineering Structures 87 (2015) 32–46. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.017.
[9] Ghassoun, M., Danhash, G., & Almahmoud, F. (2023). An analytical study of the dynamic responses of reinforced concrete elevated water tanks in Syria under the effect of the February 2023 earthquake. Journal of University of Duhok, 26(2), 57–64. https://doi.org/10.26682/sjuod.2023.26.2.7
[10] N. Gupta, Review on Active Study of Water Tank Structure Performance Which Is Elevated & Concrete Shaft Maintaining, Materials Today: Proceedings 81 (2023) 940–946. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.305.
[11] C. Jaiprakash Chitte, S. Charhate, S. Sangita Mishra, Seismic Performance of R. C. Elevated Water Storage Tanks, Materials Today: Proceedings 65 (2022) 901–907. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.523.
[12] R. Livaoğlu, A. Doğangün, Evaluation of Seismic Models for Fluid-Elevated Tanks Systems Suggested in Codes, (n.d.).
[13] A. Mohammad Mansour, M.M. Kassem, F. Mohamed Nazri, Seismic Vulnerability Assessment of Elevated Water Tanks with Variable Staging Pattern Incorporating the Fluid-Structure Interaction, Structures 34 (2021) 61–77. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.062.
[14] F.J. Martínez-Martín, V. Yepes, F. González-Vidosa, A. Hospitaler, J. Alcalá, Optimization Design of RC Elevated Water Tanks under Seismic Loads, Applied Sciences 12 (2022) 5635. https://doi.org/10.3390/app12115635.
[15] C. Mori, S. Sorace, G. Terenzi, Seismic Assessment and Retrofit of Two Heritage-Listed R/C Elevated Water Storage Tanks, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 77 (2015) 123–136. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.05.007.
[16] C.B. Nayak, S.B. Thakare, Seismic performance of existing water tank after condition ranking using non-destructive testing, Int J Adv Struct Eng 11 (2019) 395–410. https://doi.org/10.1007/s40091-019-00241-x.
[17] S. Öztürk, E. Altunsu, O. Güneş, A. Sarı, Investigation of Industrial Structure Performances in the Hatay and Gaziantep Provinces During the Türkiye Earthquakes on February 6, 2023, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 179 (2024) 108569. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108569.
[18] M. Paz, W. Leigh, International Building Code IBC-2000, in: M. Paz, W. Leigh (Eds.), Structural Dynamics: Theory and Computation, Springer US, Boston, MA, 2004: pp. 757–781. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0481-8_25.
[19] G. Shahanawaz, P. Nirupama, T. Raghavendra, Structural Health Assessment of Overhead Water Tank - a Case Study, J Build Rehabil 9 (2024). https://doi.org/10.1007/s41024-024-00492-6.
[20] H. Shakib, F. Omidinasab, Effect of Earthquake Characteristics on Seismic Performance of RC Elevated Water Tanks Considering Fluid Level within the Vessels, Arab J Sci Eng 36 (2011) 227–243. https://doi.org/10.1007/s13369-010-0029-1.
[21] S. Soroushnia, Sh.T. Tafreshi, F. Omidinasab, N. Beheshtian, S. Soroushnia, Seismic Performance of RC Elevated Water Tanks with Frame Staging and Exhibition Damage Pattern, Procedia Engineering 14 (2011) 3076–3087. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.387.

[22] S. Suleiman, J. Owen, K. Elliott, R. Barton, Cyclic Performance of RC Beams Strengthened with CFRP Sheets Experimental and FE Modelling, in: ResearchGate, John Wiley& Sons Ltd, England, 2008. https://www.researchgate.net/publication/310818576_Cyclic_Performance_of_RC_Beams_Strengthened_with_CFRP_Sheets_Experimental_and_FE_Modelling (accessed July 15, 2025).
[23] P.K. Thippa, R.K. Tripathi, G. Bhat, A Case Study on Performance of Structures During Turkey-Syria Multiple Earthquakes Occurred on February 6, 2023, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1280 (2023) 012023. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1280/1/012023.
[24] United States Atomic Energy Commission titled "Nuclear Reactors and Earthquake," Reactor technology TID-4500 (22nd Edition, August 1963, TID-7024). Available online, (n.d.).
[25] N. Workeluel, P. Saha, S. Matiyas, T. Mohanty, A Comparative Study on Analysis and Design of R. C. C Elevated Water Tank Using Different Country Codes, Materials Today: Proceedings (2023). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.486.