مجلة جامعة دمشق لبحوث الزلازل والكوارث
المجلد 2 العدد(1) – 2025: 18-40

Damascus University Journal of Earthquake and Disaster Research
Vo 2 number (1) -2025: 18-40

استخدام النمذجة العدديّة في تقييم السّلامة الإنشائيّة وإعادة التأهيل لمباني البيتون المسلّح المتضرّرة بفعل الانفجارات

حسام نمر محمد*[1] هالة توفيق حسن [2]

*[1]. طالب ماجستير، مهندس في قسم الهندسة الإنشائيّة الزّلزاليّة، المعهد العالي للبحوث والدّراسات الزّلزاليّة، جامعة دمشق. HusamMohammad@DamascusUniversity.edu.sy.

[2]. دكتورة، مهندسة، أستاذة في قسم الهندسة الإنشائيّة الزّلزاليّة، المعهد العالي للبحوث والدّراسات الزّلزاليّة، جامعة دمشق. sy.edu.damascusuniversity@hasan.hala

الملخص:

تؤدّي الانفجارات إلى خسائر كبيرة في الأرواح والممتلكات، وقد حظيت دراسة هذا النوع من الأحمال باهتمام شديد من قبل الباحثين بالتزامن مع تزايد الهجمات الإرهابيّة حول العالم، حيث أدّت الانفجارات في سورية إلى تصدّع وانهيار أبنية سكنيّة وحيويّة هامّة بشكل جزئي أو كامل.

بالتزامن مع الإعداد لمرحلة إعادة الإعمار، ودراسة إمكانيّة إعادة تأهيل المنشآت المتضرّرة، فقد وجب البحث عن طرائق دراسة متقدّمة في تقييم الضّرر، واختيار طرائق تقوية فعّالة تحقّق الكفاءة، والاعتدال في استهلاك المواد، ومصادر الطاقة، وتحقّق مبدأ الاستدامة في الحفاظ على النظم الحيويّة، وتضمن استمرارها كمصادر نشطة ومنتجة مع مرور الوقت.

يقدّم البحث دراسة تحليليّة تهدف إلى تقييم السّلامة الإنشائيّة، ودراسة إمكانيّة إعادة تأهيل بناء واقعي قد تعرض لاستهداف إرهابي بواسطة سيّارة مفخّخة.

تمّ إنشاء النموذج العددي للبناء ومحاكاة الانفجار الحاصل باستخدام برنامج (ABAQUS)، وتصميم العناصر الهندسيّة المطلوبة للتقوية بحسب قيم مؤشّر الضّرر.

أعطت نتائج النمذجة العدديّة تقارباً كبيراً من حيث قيم التشوهات، وقيم المقاومة المتبقّية في العناصر الإنشائيّة المتضرّرة مع القياسات التجريبيّة للعناصر الإنشائيّة بعد الانفجار، وبفروق نسبيّة لا تتجاوز 5%، وقد أدى تصميم عناصر التقوية والوصل المطلوبة بحسب قيم مؤشّر الضّرر إلى رفع كفاءة البناء المتضرّر، وتحقيق مبدأ الاستدامة من خلال التقليل من استخدام المواد والأنشطة المنتجة للنفايات، وخفض استهلاك الطاقة المضرّة بالبيئة.

الكلمات المفتاحية: النمذجة العدديّة، مؤشّر الضّرر، تقييم السّلامة الإنشائيّة، إعادة التأهيل، الاستدامة.

تاريخ الإيداع: 2024/2/21
تاريخ القبول: 2024/4/25

حقـوق النشـر: جامعـة دمشـق – سـورية، يحـتفظ المؤلفـون بحقـوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

Using Numerical Modeling To Structural Safety Assessment And Damaged By Explosions Rehabilitation Of R.C Buildings

Husam Namar Mohammad*[1] Hala Tawfiq Hasan [2]

*[1]. Student, Eng, Higher Institute for Earthquake Studies and Research, Damascus University. HusamMohammad@DamascusUniversity.edu.sy.

[2]. Professor, Seismic Structural Engineering, Higher Institute for Earthquake Studies and Research, Damascus University.

hala.hasan@damascusuniversity.edu.sy

Received: 21/2/20243
Accepted: 25/4/2024

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

Abstract:

Explosions lead to large losses of life and property, and the study of this type of load has received a great attention from researchers in conjunction with the increase of terrorist attacks around the world, as it is known the explosions in Syria led to cracking and partial or complete collapse of important residential and vital buildings.

In conjunction with preparing for the reconstruction phase, and studying the possibility of rehabilitating damaged facilities, it was necessary to search for advanced calculation methods for assessing the damage, and choosing effective strengthening methods that achieve efficiency and moderation in the consumption of materials and energy sources. Furthermore, achieving the principle of sustainability in preserving vital systems, and ensuring being continually as active and productive sources over time.

The research presents an analytical study that aims to structural safety assessment, and study the possibility of rehabilitating a real building that has been subjected to a terrorist attack using a bomb car.

The numerical model of the building was created and the explosion simulated using the ABAQUS program, and designing the engineering elements required according to the damage index values.

The numerical modeling results gave a great convergence in terms of the values of deformations. The remaining resistance values in the damaged structural elements with the experimental measurements of the structural elements after the explosion has a relative differences not exceeding 5%.

The design of the required strengthening and connection elements according to the damage index values has led to raising the efficiency of the damaged building. Achieving the principle of sustainability by reducing the use of materials and waste-producing activities, and reducing energy consumption which is harmful to the environment.

Keywords: NUMERICAL MODELING, DAMAGE INDEX, STRUCTURAL SAFETY ASSESSMENT, REHABILITATION, SUSTAINABILITY.

المقدمة:

يتم سنوياً إنتاج مليارات الأطنان من نفايات الهدم في جميع أنحاء العالم نتيجة الحاجة إلى أنشطة بناء جديدة، كما أنّ التخلّص غير السليم من هذه النفايات يشكّل خطراً كبيراً على البيئة.

تركّز الاستدامة في الهندسة على التقليل من استخدام المواد والأنشطة المنتجة للنفايات، وخفض استهلاك الطاقة المضرّة بالبيئة، وتقليل تكاليف الموارد من خلال استخدام بدائل تعطي ذات الكفاءة.

تأتي أهمية الاستدامة من إدراك المخاطر الكبرى للهندسة التي لا تفكّر بالمستقبل، حيث من الممكن أن تتحوّل المشاريع المفيدة في الماضي إلى أعباء اقتصاديّة مستقبليّة.

يتضمّن مصطلح تقييم السّلامة الإنشائيّة للمنشآت البيتونيّة المسلّحة إجراء دراسة كاملة بهدف تحديد العيوب في التّصميم أو التّنفيذ أو الاستثمار، وتحديد مناطق الضّرر، ودراسة الأحمال والإجهادات المطبّقة على العناصر المدروسة، ومدى تحمّلها لهذه الإجهادات في ظروف مختلفة، وتحديد المخاطر المحتملة في العناصر الإنشائيّة، وتقديم الاقتراحات اللازمة لتقويتها.

يمكن تمييز ثلاث طرائق لتقييم السّلامة الإنشائيّة للمنشآت المعرّضة لأحمال الانفجار:

1. تقييم الضّرر بحسب ملاحظات العين المجرّدة.
2. القياسات التجريبيّة.
3. النمذجة العدديّة باستخدام برامج العناصر المحدودة.

يعرّف الانفجار بأنه تفاعل كيميائي يتسبب بتحرير عنيف للطاقة، وتشكّل موجة غازيّة كرويّة ذات ضغط، وكثافة ودرجة حرارة عالية جداً، حيث تتحرك الكتلة الغازيّة بشكل كروي مكوّنة ما يسمى بالموجة الانفجاريّة، وتنتشر هذه الموجة بسرعة تفوق سرعة الصوت مسببةً ارتفاعاً مفاجئاً وكبيراً في ضغط الهواء يفوق الضغط الجوي، وخلال زمن قصير جداً يصل الضغط إلى الذروة، ثم يعود إلى الضغط الطبيعي بعد مرور زمن معيّن وهي مدة الطور الموجب، وبعدها تبدأ مرحلة الطور السالب وتكون مدّتها أطول من مدّة الطور الموجب، حيث ينخفض الضغط إلى ما دون الضغط الطبيعي، ويبيّن الشّكل (1) السجل الزمني لموجة الضغط.

يحدّد معدّل الانخفاض في قيمة الضغط من العلاقة (Karlos et al., 2013):

$$P_s(t) = p_{s0}\left(1 - \frac{t}{t_0}\right).e^{-b(\frac{t}{t_0})} \qquad (1)$$

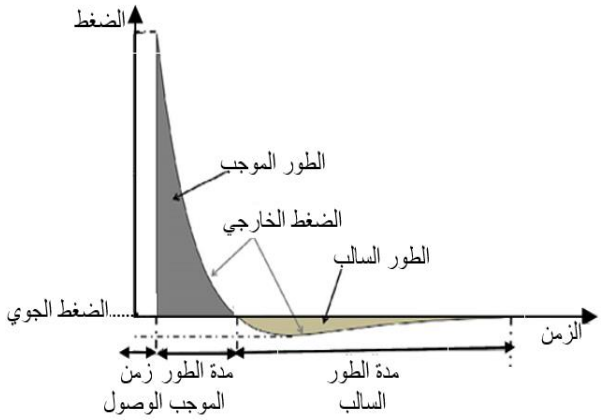
حيث:

P_{s0} : الضغط الوارد.

t : الزمن المنقضي منذ لحظة وصول موجة الضغط.

t_0 : مدّة الطور الموجب لموجة الضغط.

b : معامل الاضمحلال.



الشّكل (1) السجل الزمني لموجة الضغط (Karlos et al., 2013).

يستخدم مقياس الجذر التربيعي لربط خصائص موجة ضغط ناتجة عن انفجار شحنة من المواد المتفجّرة مع خصائص موجة ضغط ناتجة عن انفجار شحنة مواد متفجّرة أخرى، وذلك عند تماثل الظروف الخارجيّة ونوع الشحنة المتفجّرة وطبوغرافيّة الأرض، ويعبّر عن هذا المقياس بالعلاقة (Karlos et al., 2013):

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W_e}} \qquad (2)$$

حيث:

R : البعد عن مركز الانفجار.

W_e : الوزن المكافئ للمواد المتفجّرة من مادّة (TNT).

يعرّف الوزن المكافئ للمواد المتفجّرة من مادّة (TNT) بأنه الوزن من مادّة (TNT) المطلوب لتوليد موجة ضغط مساوية لقيمة ضغط واحدة الوزن من المادّة المتفجّرة المدروسة.

عند اصطدام موجة الضغط بسطح صلب يميل بزاوية محدّدة عن منحى انتشارها، فإن موجة الضغط تنعكس عن هذا السطح، وتكون قيمة الضغط للموجة المنعكسة أعلى من قيمة الضغط للموجة الواردة، حيث تتعلّق قيمة الضغط للموجة المنعكسة بعاملين:

1. قيمة الضغط للموجة الواردة.
2. الزاوية α بين منحى انتشار الموجة الواردة والناظم على السطح الذي يحصل عنده الانعكاس، وبحسب قيمة الزاوية α يمكن تمييز الحالات التالية:

a) حالة الضغط الجانبي: قيمة الضغط الجانبي مساوية لقيمة الضغط الوارد.

b) حالة الضغط الأعظمي: تحدّد قيمة الضغط المنعكس من العلاقة (Karlos et al., 2013):

$$P_{ra} = 2P_{s0}.\frac{4P_{s0} + 7P_0}{(P_{S0} + 7P_0)} \qquad (3)$$

حيث:

P_{ra} : الضغط المنعكس.

P_0 : الضغط الجوّي السائد.

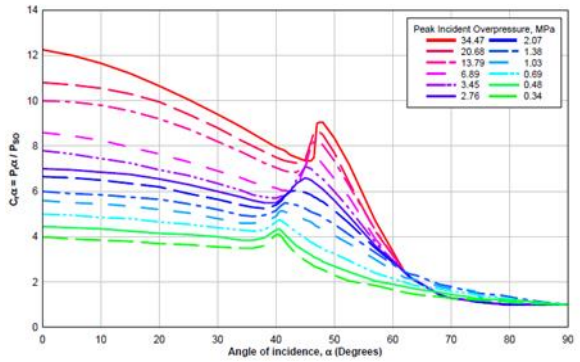
c) حالة الانعكاس المائل: تحدّد قيمة الضغط المنعكس من العلاقة (Karlos et al., 2013):

$$P_{ra} = C_{ra}.P_{S0} \qquad (4)$$

حيث:

C_{ra} : معامل الانعكاس.

يوضّح الشّكل (2) قيمة معامل الانعكاس بحسب زاوية الورود عند قيم مختلفة للضغط الوارد.



الشّكل (2) قيمة معامل الانعكاس بحسب زاوية الورود عند قيم مختلفة للضغط الوارد (Karlos et al., 2013).

تعتبر الخبرة العمليّة من أهم متطلّبات تقييم الضّرر وتحديد النقاط الخطرة في الأبنية المتضرّرة من الانفجار، ونتيجةً للصعوبة في تقدير درجة الضّرر فقد وجب البحث عن طرائق متقدمّة لتحديد درجة أمان البناء بشكل كامل.

تعطي النمذجة العدديّة فكرة واضحة عن السلوك الفراغي للبناء، حيث يتم تحديد مناطق الضّرر، ومناطق تركّز الإجهادات الناتجة عن إعادة توزّع الأحمال في العناصر الإنشائيّة بناءً على الظروف الجديدة للبناء بعد الانفجار.

يتمّ اختيار طريقة التقوية المناسبة بعد تقييم الحالة الفنيّة للبناء ودرجة الضّرر، وبعد دراسة إمكانيّة التّنفيذ، وتوفّر المواد المناسبة، ودراسة الجدوى الاقتصاديّة من عملية التقوية.

أجرى (Fu, 2017) محاكاة عدديّة لبناء فولاذي مكوّن من عشرين طابق تحت تأثير الانفجار، حيث تمّ وضع عبوة ناسفة بوزن (15 Kg) في الطابق الثاني عشر، ومحاكاة الانفجار من خلال إزالة بعض الأعمدة، وقد بيّنت الدراسة أن طريقة إزالة العمود لمحاكاة الانهيار لا تأخذ بعين الاعتبار القيم العالية لقوى القص الناجمة عن الانفجار، كما أظهرت الدراسة أيضاً أنه من غير الممكن أن يحدث انهيار متتالي في البناء بسبب انفجار شحنة منخفضة الشدّة، حيث يحدث إعادة توزيع سريعة للأحمال بحسب المسار البديل الأقرب.

أجرى (Elsanadedy et al., 2014) محاكاة عدديّة لانفجار عبوة ناسفة بوزن (500 Kg) بالقرب من بناء فولاذي مكوّن

من خمسة طوابق، وقد أظهرت الدراسة حدوث انهيار متتالي في البناء عند وضع الشحنة بالقرب من أحد الأعمدة الخارجيّة، وبيّنت الدراسة ضرورة تقوية الأعمدة الخارجيّة لمنع حدوث هذا الانهيار، ويمكن أن يتم ذلك باستخدام غطاء خرساني يزيد من صلابة العمود، أو بإضافة الألواح الفولاذيّة.

قام (Thai et al., 2019) بإجراء دراسة تحليليّة بهدف تقييم الضّرر في عمود خرساني مسلّح مزوّد بقميص فولاذي نتيجة انفجار شحنة متوضّعة على مسافة قريبة منه، وتمّ دراسة أثر سماكة القميص الفولاذي ومسافة المواجهة وقوّة الضغط المحوريّة على أداء العمود، وتحديد نقاط القوّة المتبقّية في العمود بعد الانفجار، وبيّنت النّتائج أن لنقصان مسافة المواجهة تأثير كبير في زيادة حجم الضّرر، وأدى زيادة القوّة المحوريّة من القيمة (0) إلى القيمة $(0.8A_g \times f_c`)$ إلى زيادة في تشوّه العمود بنسبة (90 %) من أجل شحنة متفجّرة متوضّعة عند قاعدة العمود، وزيادة تشوّه العمود بنسبة (20 %) من أجل شحنة متفجّرة متوضّعة عند منتصف العمود، وقد أدى زيادة سماكة القميص الفولاذي من القيمة (3 mm) إلى القيمة (6 mm) إلى انخفاض تشوّه العمود بنسبة (78 %) من أجل شحنة متفجّرة عند قاعدة العمود، وانخفاض تشوّه العمود بنسبة (66 %) من أجل شحنة متفجّرة عند منتصف العمود.

قام (Pham et al., 2022) بدراسة استجابة بلاطة خرسانيّة مسلحّة تحت تأثير الانفجار، ومقارنة نتائج التجربة مع نتائج النموذج العددي للبلاطة الخرسانيّة باستخدام برنامج العناصر المحدودة (ABAQUS)، وتحت تأثير نفس الشروط المحيطة المستخدمة في التجربة، وقد أظهرت النتائج إمكانيّة استخدام السلوك (JH2) لتوصيف سلوك مادة الخرسانة تحت تأثير الأحمال الانفجاريّة بدقّة، وإمكانيّة اعتماد هذا السلوك في أبحاث مستقبليّة هامّة فيما يتعلّق باستخدام الخرسانة في مشاريع خاصّة ذات مقاومة عالية للانفجار.

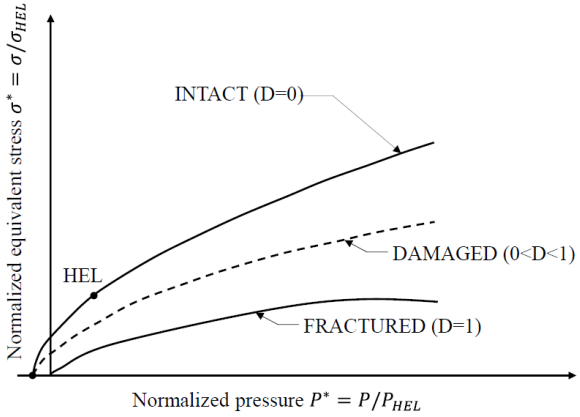
لاحظت (Jayasooriya et al., 2014) أنّ استخدام الأعمدة المركّبة المكوّنة من نواة فولاذيّة محاطة بالخرسانة يحقّق حماية عالية من الفشل نتيجة الانفجار، ويوفّر حماية كبيرة من حدوث انهيار متتالي في البناء، حيث يحدث تبديد كبير لطاقة الانفجار عند تحطّم خرسانة العمود، ثمّ تنتقل الأحمال الشاقوليّة بسرعة وأمان إلى النواة الفولاذيّة.

يعبّر السلوك (JH2) عن سلوك الخرسانة تحت تأثير التشوّهات الكبيرة، ومعدّلات الإجهاد والضغوط العالية مثل الصدمات والانفجارات، حيث تعتمد صياغة معادلات الحالة في هذا السلوك على قوّة المادّة والضغط والانفعال ومعدّل الانفعال وتطوّر الضّرر (D) الذي يلحق بالمادّة.

ينقسم سلوك المادّة وفق (JH2) إلى ثلاث حالات:

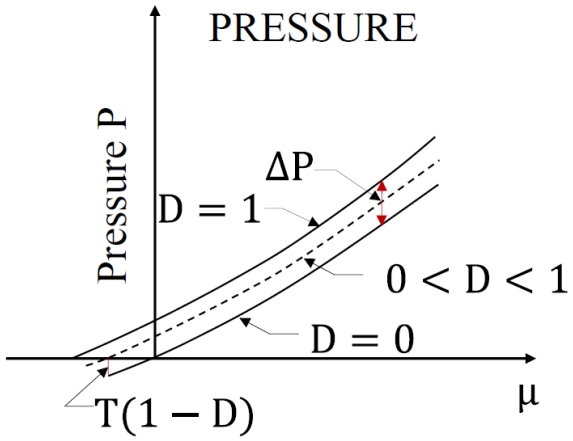
1. الحالة السليمة $(D = 0)$.
2. الحالة المتضررة $(1 > D > 0)$.
3. حالة الانهيار $(D > 1)$.

يبيّن الشّكل (3) منحني إجهاد–ضغط السلوك (JH2).



الشّكل (3) منحني إجهاد–ضغط السلوك (JH2) (Johnson et al., 1994).

يتم التعبير عن معادلة الحالة للمواد الهشة وفق السلوك (JH2) تحت تأثير الانفجار من خلال معادلة تربط بين قيمة الضغط P ونسبة الوزن μ كما هو موضّح في الشّكل (4).



الشّكل (4) علاقة الضغط مع نسبة الوزن وفق السلوك (JH2) (Johnson et al., 1994).

معادلة الحالة الخطيّة للمادة (Johnson et al., 1994):

$$P = K_1.\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad D = 0 \qquad (5)$$

معادلة الحالة اللاخطيّة للمادة (Johnson et al., 1994):

$$P = K_1.\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P \quad 1 > D > 0 \qquad (6)$$

معادلة نسبة الوزن (Johnson et al., 1994):

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0 - 1} \qquad (7)$$

حيث:

ρ: الكثافة الفعليّة.

ρ_0: الكثافة الأوليّة.

ΔP: الضغط الإضافي عند بداية تراكم الضرر.

يهدف البحث إلى استخدام النمذجة العدديّة في تقييم السّلامة الإنشائيّة لبناء واقعي متضرّر من الانفجار، واقتراح حل مناسب لإعادة تأهيل البناء باختيار طرائق تقوية فعّالة تحقّق الكفاءة، والاستدامة من خلال الاعتدال في استهلاك المواد، ومصادر الطاقة، وتقليل التلوّث البيئي الناجم عن نفايات الهدم.

اعتمد البحث المنهج التحليلي في تصميم النموذج العددي للبناء ومحاكاة الانفجار الحاصل، والمنهج التجريبي عند قياس مقاومة البيتون على الضغط لعناصر البناء الإنشائيّة بعد الانفجار باستخدام مطرقة الارتداد.

2. تصميم النموذج العددي للبناء المدروس:

1.2 المعطيات التصميميّة للبناء المدروس:

يقع البناء المدروس في حي الحمدانيّة في مدينة حلب، وهو بناء سكني مكوّن من خمسة طوابق بارتفاع طابقي (3.35 m).

البناء مصمّم بجملة إنشائيّة جداريّة مقاومة للزّلازل ذات صلابة عالية.

يوضّح الجّدول (1) المعاملات الزّلزاليّة التصميميّة للبناء (Code, S. E. B, 2004).

الجّدول (1) المعاملات الزّلزاليّة التصميميّة للبناء (Code, S. E. B, 2004)

المنطقة	حلب
معامل المنطقة الزّلزاليّة	0.25
معامل الأهميّة	1
المعامل R	4.5
المعامل الزّلزالي Ca	0.32
المعامل الزّلزالي Cv	0.47

يوضّح الجّدول (2) أبعاد وتسليح أعمدة البناء.

الجّدول (2) أبعاد وتسليح أعمدة البناء.

العمود	الأبعاد (cm)	التسليح الطولي	التسليح العرضي
C1	20×30	6T16	Ø8/20
C2	25×75	10T22	3Ø8/20
C3	30×70	10T22	3Ø8/20

يوضّح الجّدول (3) أبعاد وتسليح جوائز البناء.

الجّدول (3) أبعاد وتسليح جوائز البناء.

الجائز	الأبعاد (cm)	التسليح		
		السفلي	العلوي	العرضي
B1	20×40	3T16	2T12	2Ø8/20
B2	20×50	5T16	3T12	2Ø8/10
B3	20×60	5T16	3T12	2Ø8/15
B4	20×70	5T18	3T14	2Ø8/10
B5	20×80	5T18	3T14	2Ø8/10
B6	20×65	3T18	2T12	2Ø8/15
B7	25×60	5T18	5T18	2Ø10/10
B4`	20×70	5T18	3T16	2Ø8/10
B5`	20×80	5T22	3T18	2Ø8/10

يوضّح الجّدول (4) أبعاد وتسليح جدران قص البنا

الجّدول (4) أبعاد وتسليح جدران قص البناء.

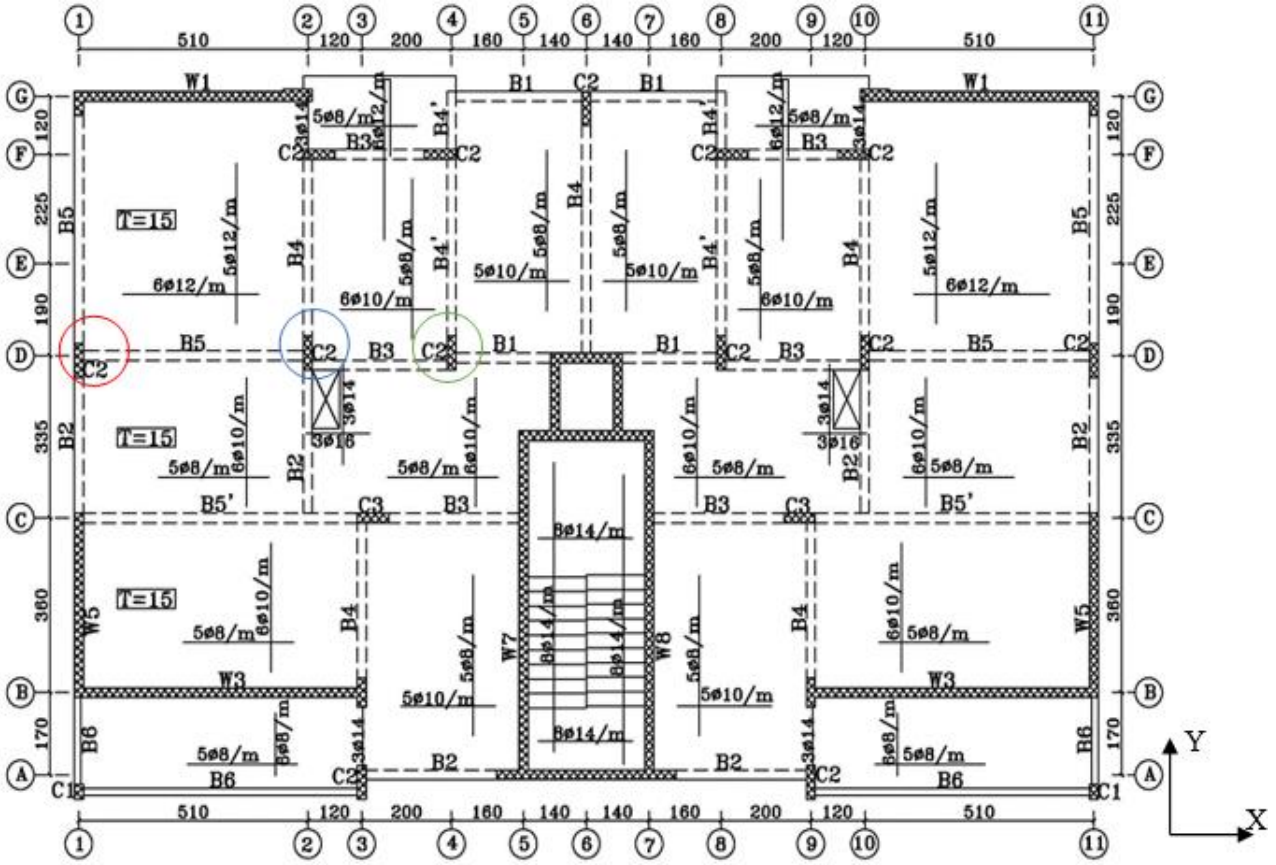
الجدار	الطابق	A×B (cm)	AS_1	AS_2
W1 W2	0	530×20	17T25	2×5T10/m
	1-2	530×20	10T25	2×5T10/m
	3-4	530×20	6T25	2×5T10/m
W3 W4	0	650×20	20T25	2×5T10/m
	1-2	650×20	10T25	2×5T10/m
	3-4	650×20	6T25	2×5T10/m
W5 W6	0	370×20	10T25	2×5T10/m
	1-2	370×20	10T20	2×5T10/m
	3-4	370×20	6T16	2×5T10/m
W7 W8	0	720×20	24T25	2×5T10/m
	1-2	720×20	14T25	2×5T10/m
	3-4	720×20	6T25	2×5T10/m

يوضح الشّكل (5) مسقط وتفاصيل تسليح بلاطة الطابق المتكرّر.

تمّ اعتماد قيمة المقاومة الوسطية للبيتون على الضغط بحسب قياسات مطرقة الارتداد لمقاومة بيتون العناصر الإنشائية الداخليّة السليمة بعد الانفجار (30 MPa)، وقيمة إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح (400 MPa).

تمّ تقدير وزن الشحنة المتفجّرة بما يعادل (300 Kg) من مادة (TNT) بناءً على حجم السيارة المفخخة، وقطر الحفرة المتولّدة في الأرض بعد الانفجار، حيث يقع مصدر الانفجار على بعد (3 m) من العمود (CA-1).

أدّى الانفجار إلى ضرر كبير في العناصر الإنشائيّة الحاملة القريبة من مصدر الانفجار، وانهيار الكتلة الغربيّة، وتضرّر العناصر الإنشائيّة المتبقّية بنسب متفاوتة، حيث انخفضت مقاومة بعض العناصر عن القيمة التصميميّة، وخرجت بعض العناصر الأخرى عن العمل.



الشّكل (5) مسقط وتفاصيل تسليح بلاطة الطابق المتكرّر (cm).

2.2 النمذجة العددية وبارامترات المواد:

تمّ تصميم النموذج العددي للبناء المدروس باستخدام برنامج (ABAQUS)، وإدخال بارامترات المواد بحيث تتطابق مع المقاومة التصميميّة لمواد البناء قبل الانفجار.

يوضّح الجّدول (5) بارمترات مادة البيتون وفق السلوك (JH2) (Pham et al., 2022).

الجّدول (5) بارمترات مادة البيتون وفق السلوك (JH2) (Pham et al., 2022).

Material parameter	Value	Material parameter	Value
A	0.79	$\varepsilon^{f}_{p,min}$	0.001
B	1.6	$\varepsilon^{f}_{p,max}$	1
N	0	σ_i^{max} (GPa)	8.1
C	0.007	`	1.1
M	0.61	K_1 (GPa)	85
G (GPa)	14.86	K_2 (GPa)	-171
P_{HEL} (MPa)	30	K_3 (GPa)	208
ε_0	1.0	HEL (GPa)	0.8
D_1	0.04	T (MPa)	3.54

حيث:

A, B, N, C, M : ثوابت مادة البيتون.

G : معامل القص.

$\mathbf{P_{HEL}}$: مقاومة البيتون بعمر 28 يوم على الضغط.

$\boldsymbol{D_1, D_2, \varepsilon^{f}_{p,min},, \varepsilon^{f}_{p,max}}$: حدود الضّرر.

K_1, K_2, K_3 : ثوابت تُحدّد من اختبارات تأثير المواد.

T : إجهاد الشد الهيدروستاتيكي الأعظمي للبيتون.

β : معامل التحويل.

يبيّن الجّدول (6) بارمترات مادة الفولاذ (SD 400) (Mai et al., 2021).

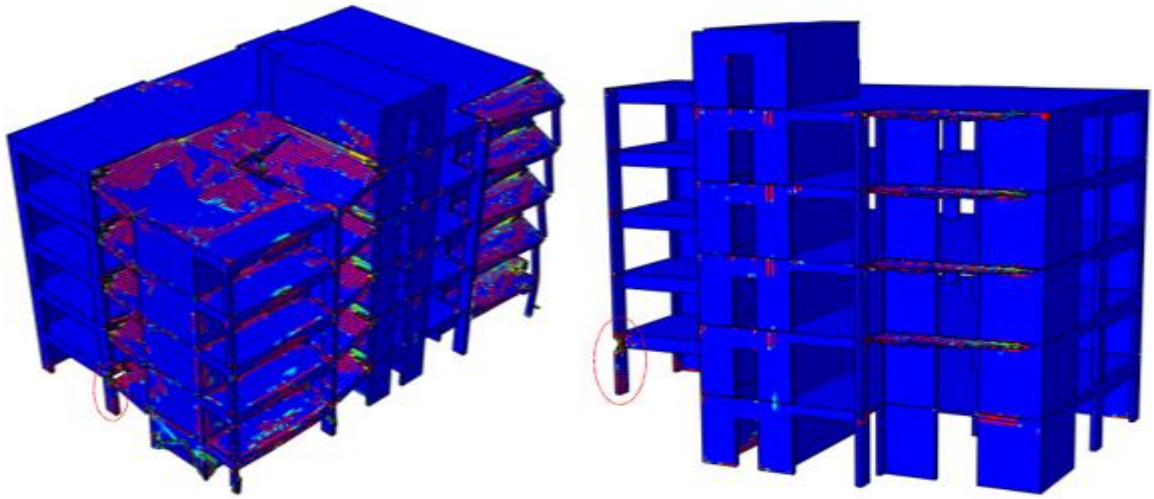
الجّدول (6) بارمترات مادة الفولاذ (SD400) (Mai et al., 2021).

parameter	Value
Elastic Modulus (MPa)	205940
Poission's Ratio	.30
Weight density (N/mm^3)	7.7×10^{-5}
Yeild strength (MPa)	400
Ultimate strength (MPa)	560

3. مقارنة نتائج الدراسة التحليليّة مع القياسات التجريبيّة:

1.3 مقارنة التشوّهات:

(أ)



(ب)

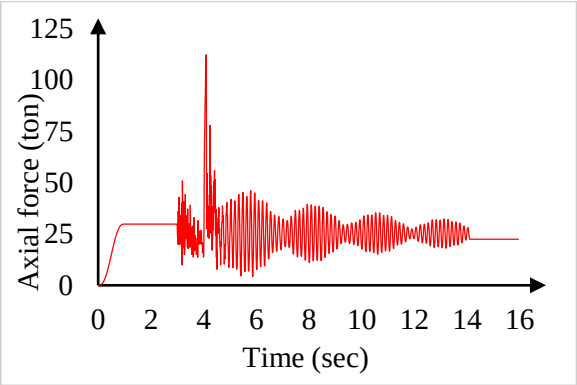
الشّكل (6) مقارنة التشوّهات.

(أ) الوضع الحالي للبناء بعد الانفجار. (ب) نتائج الدراسة التحليليّة باستخدام برنامج (ABAQUS).

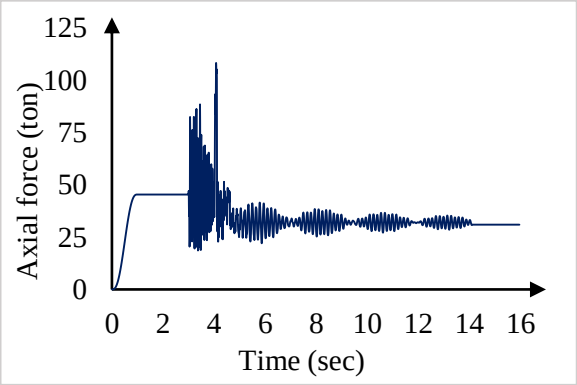
تمّ تطبيق الأحمال الميتة وفق النموذج العددي بشكل تدريجي، وتطبيق الحمل الانفجاري في اللحظة (3 sec)، حيث تضرّرت جدران القص، والأعمدة الأقرب إلى مصدر الانفجار بشدّة ما أدى إلى خروجها عن الاستثمار، ثم حصلت إعادة توزيع

للأحمال خلال محاولة البناء في التوازن، والاستقرار وفق الوضع الجديد.

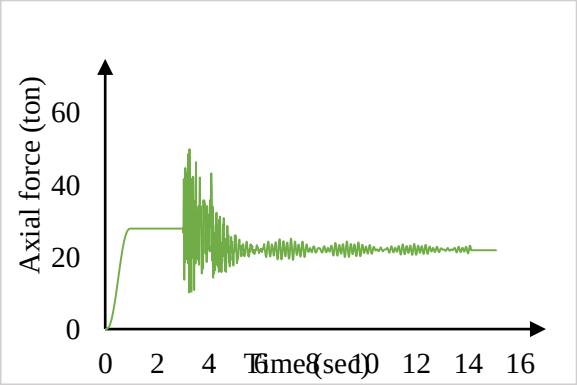
انتقلت الأحمال إلى الأعمدة وجدران القص الأقرب، وأدى ذلك إلى تعرّضها لإجهادات ضغط نتيجة الأحمال الإضافيّة المنقولة من البلاطات، وإجهادات شد نتيجة اللامركزيّة وعزوم القلب، وتوضّح الأشكال (7)، (8)، (9) السجل الزمني لقيم القوة المحوريّة في الأعمدة (CD1)، (CD2)، (CD4) على التوالي خلال وبعد لحظات الانفجار.



الشّكل (7) السجل الزمني لقيم القوة المحوريّة في العمود (CD1).



الشّكل (8) السجل الزمني لقيم القوة المحوريّة في العمود (CD2).



الشّكل (9) السجل الزمني لقيم القوة المحوريّة في العمود (CD4).

تمّ تحديد قيمة المقاومة المتبقّية في الأعمدة والجوائز بعد الانفجار عن طريق حساب قيم مؤشّر الضّرر، وهو معامل يعبر عن مقدار الطاقة المفقودة من العنصر الإنشائي بعد تعرّضه لعوامل تخريبيّة خارجيّة.

تستخدم المعادلة التالية لحساب قيمة مؤشّر الضّرر (Gholipour et al., 2020):

$$D_I = 1 - \frac{P_r - P_L}{P_N - P_L} \qquad (8)$$

حيث:

D_I: مؤشّر الضّرر.

P_r: قدرة التحمّل المتبقّية في العمود بعد الضرر.

P_N: قدرة التحمّل الإسمية للعمود.

P_L: الحمل المحوري للعمود خلال مرحلة الخدمة.

تمّ تحديد قيمة المقاومة المتبقيّة في العمود بعد التعرض لقوى الصدم والانفجار بحسب (Gholipour et al., 2020) كما هو موضّح في الشّكل (10)، حيث تم تطبيق الأحمال على أربع مراحل كما يلي:

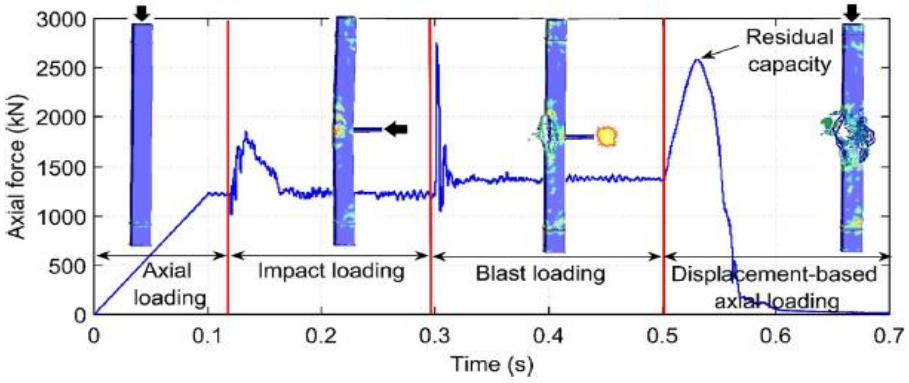
1- تطبيق الحمل المحوري بشكل تدريجي على الطرف العلوي من العمود للوصول إلى قيمة الحمل المحوري للعمود خلال مرحلة الخدمة.

2- تطبيق قوة الصدم.

3- تطبيق قوة الانفجار.

4- تطبيق انتقال تدريجي أعلى العمود حتى الوصول إلى مرحلة الانهيار.

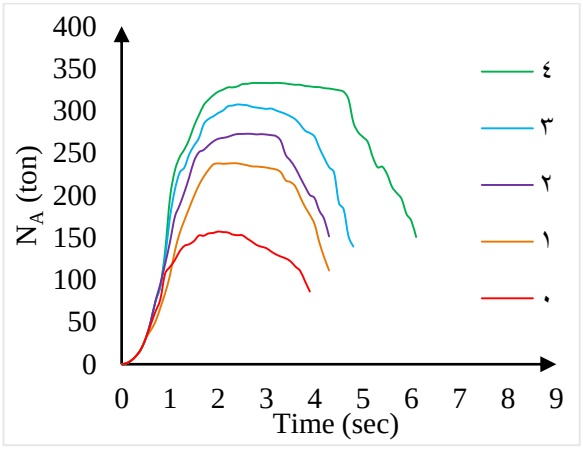
2.3 مقارنة قياسات مقاومة البيتون على الضغط في العناصر المتضرّرة مع نتائج الدراسة التحليليّة:



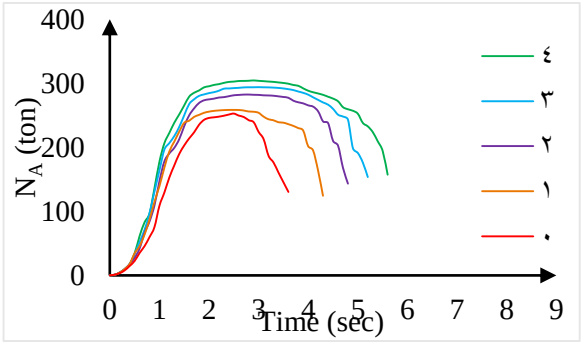
الشّكل (10) تحديد المقاومة المتبقّية في عمود بيتوني مسلّح بعد التعرّض لقوى الصدم والانفجار (Gholipour et al., 2020).

تمّ تطبيق قوة ضغط محورية أعلى الأعمدة المتضرّرة بهدف تحديد مقاومتها المتبقّية بعد الانفجار.

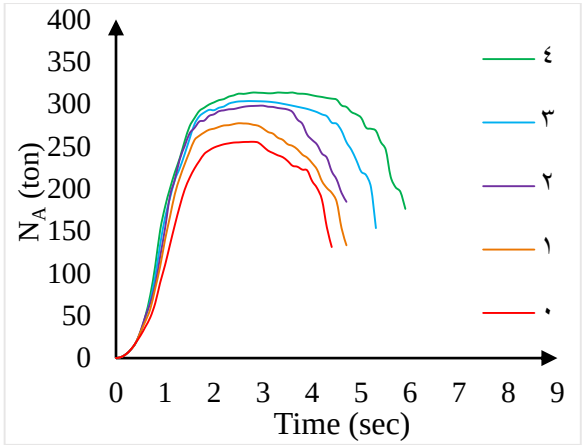
توضّح الأشكال (11)، (12)، (13) السجل الزمني لتطبيق قوّة الضغط أعلى الأعمدة المتضرّرة (CD1)، (CD2)، (CD4) على التوالي.



الشّكل (11) السجل الزمني لتطبيق قوّة الضغط أعلى الأعمدة (CD1).

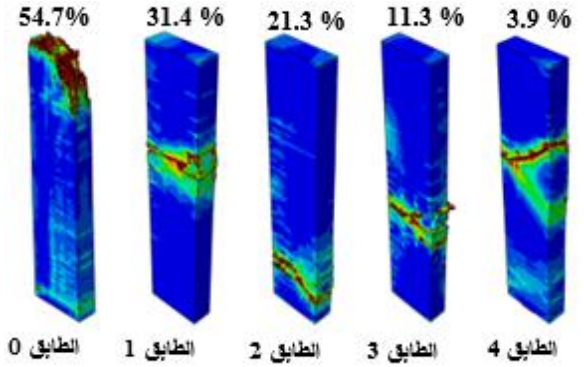


الشّكل (12) السجل الزمني لتطبيق قوّة الضغط أعلى الأعمدة (CD2).



الشّكل (13) السجل الزمني لتطبيق قوّة الضغط أعلى الأعمدة (CD4).

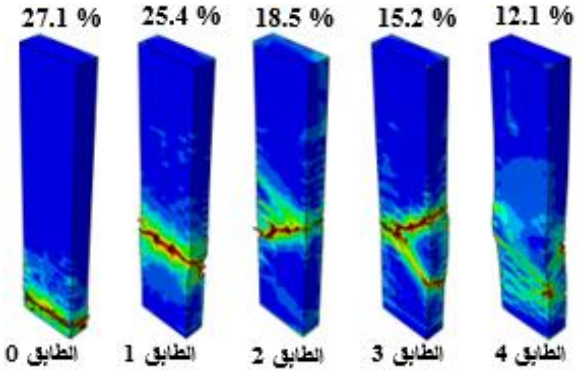
توضّح الأشكال (14)، (15)، (16) مقدار مؤشّر الضّرر في الأعمدة (CD1)، (CD2)، (CD4) على التوالي، حيث يُلاحَظ انخفاض قيمة الضّرر في الأعمدة مع الابتعاد عن مصدر الانفجار.



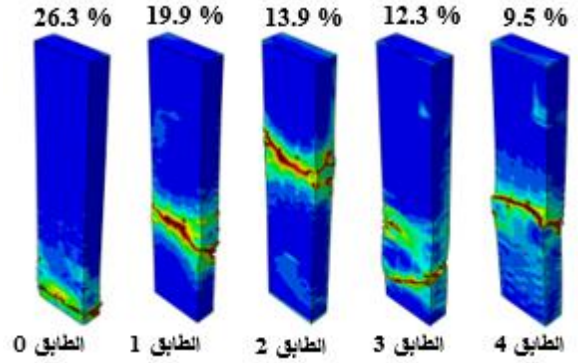
الشّكل (14) مقدار مؤشّر الضّرر في الأعمدة (CD1).

تـمّ تطبيـق قـوّة مركّـزة فـي منتصـف مجـاز الجـوائز المتضـرّرة بهدف تحديد مقاومتها المتبقّية بعد الانفجار، وتوضّـح الأشكال (17)، (18) السـجل الزمنـي لتطبيـق قـوّة مركّـزة فـي منتصـف مجاز الجوائز المتضرّرة (B5-D)، (B5-1) على التوالي.

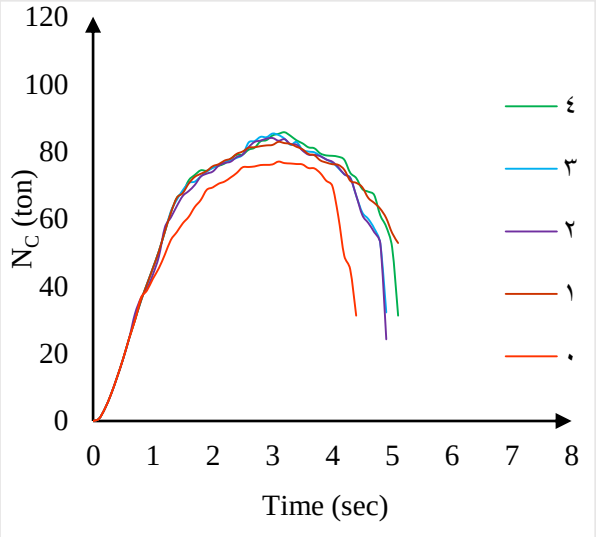
توضّح الأشكال (19)، (20) مقدار مؤشّر الضّرر في الجوائز (B5-D)، (B5-1) على التوالي.



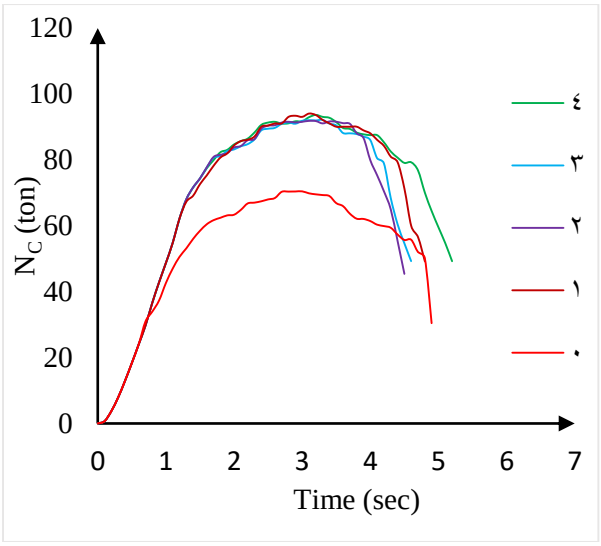
الشّكل (15) مقدار مؤشّر الضّرر في الأعمدة (CD2).



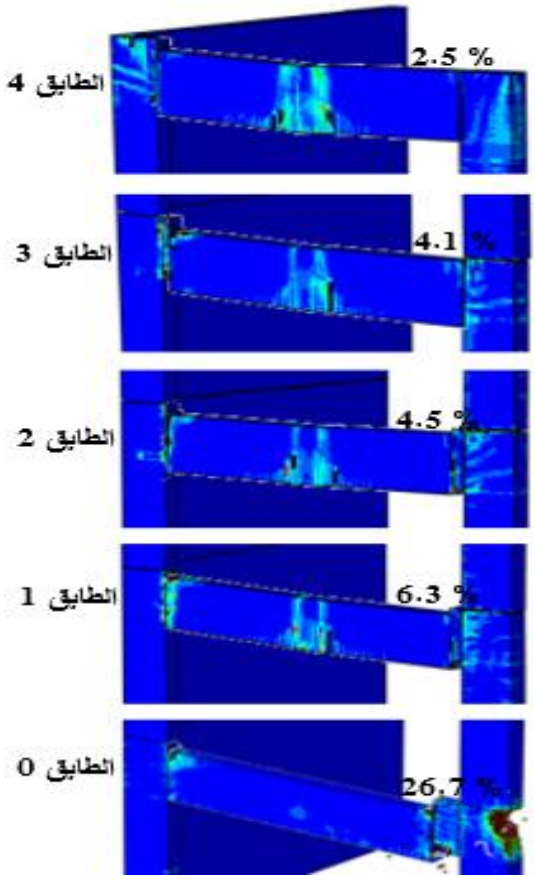
الشّكل (16) مقدار مؤشّر الضّرر في الأعمدة (CD4).



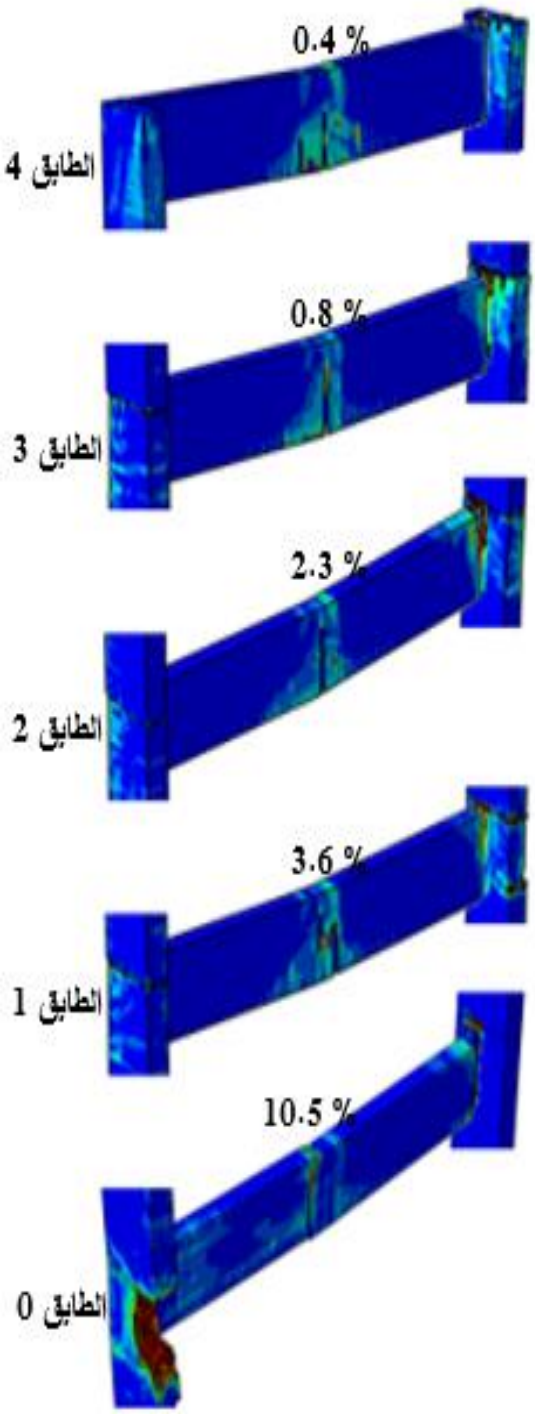
الشّكل (17) السجل الزمني لتطبيق قوّة مركّزة في منتصف مجاز الجوائز (B5-D).



الشّكل (18) السجل الزمني لتطبيق قوّة مركّزة في منتصف مجاز الجوائز (B5-1).



الشّكل (20) مقدار مؤشّر الضّرر في الجوائز (B5-1).



الشّكل (19) مقدار مؤشّر الضّرر في الجوائز (B5-D).

تمّ تحديد مقاومة البيتون على الضغط في الأعمدة، والجوائز المتضرّرة بعد الانفجار باستخدام العلاقة (Eskew, 2017).

$$\sigma_{y,D} = \sigma_y \times (1 - D) \quad (9)$$

حيث:

$\sigma_{y,D}$: مقاومة مادّة العنصر المتضرّر.

σ_y: المقاومة التصميميّة لمادّة العنصر.

يوضّح الجّدول (7) مقارنة قياسات مقاومة البيتون على الضغط في العناصر الإنشائية المتضرّرة باستخدام مطرقة الارتداد مع نتائج الدراسة التحليليّة.

الجّدول (7) مقارنة قياسات مقاومة البيتون على الضغط في العناصر الإنشائية المتضرّرة باستخدام مطرقة الارتداد مع نتائج الدراسة التحليليّة.

العنصر الإنشائي	الطابق	D مؤشّر الضّرر (%)	$\sigma_{y,D}$ بحسب الدراسة التحليليّة (MPa)	$\sigma_{y,D}$ بحسب قياسات مطرقة الارتداد (MPa)	الفرق النسبي (%)
CD1	4	3.9	28.8	29	0.6
	3	11.3	26.6	27	1.4
	2	21.3	23.6	24	1.6
	1	31.4	20.6	21	1.9
	0	54.7	13.6	13	4.6
CD2	4	12.1	26.4	26	1.4
	3	15.2	25.4	25	1.8
	2	18.5	24.4	25	2.2
	1	25.4	22.4	23	2.7
	0	27.1	21.9	23	4.9
CD4	4	9.5	27.2	27	0.6
	3	12.3	26.3	27	2.6
	2	13.9	25.8	25	3.3
	1	19.9	24.0	25	3.9
	0	26.3	22.1	23	4
B5-D	4	0.4	29.9	30	0.4
	3	0.8	29.8	30	0.8
	2	2.3	29.3	29	1.1
	1	3.6	28.9	28	3.3
	0	10.5	26.9	28	4.1
B5-1	4	2.5	29.2	29	0.8
	3	4.1	28.8	29	0.8
	2	4.5	28.7	29	1.2
	1	6.3	28.1	29	3
	0	26.7	22	23	4.4

4. تقييم السّلامة الإنشائيّة للعناصر المتضرّرة:

تمّ تصنيف الضّرر بحسب قيمة مؤشّر الضّرر إلى:

1. الضّرر الشديد: من أجل $D_I \geq 50\%$
2. الضّرر المتوسّط: من أجل $50\% \geq D_I \geq 13\%$
3. الضّرر الطفيف: من أجل $D_I \leq 13\%$

تمّ تصنيف السّلامة الإنشائيّة بحسب درجة الضّرر إلى:

1. خطر وغير آمن: من أجل درجة الضّرر الشديد.

2. سليم بتحفّظ: من أجل درجة الضّرر المتوسّط. 3. سليم: من أجل درجة الضّرر الطفيف.

يوضّح الجّدول (8) تقييم السّلامة الإنشائيّة للأعمدة والجوائز الأكثر تضرّراً من الانفجار.

الجّدول (8) تقييم السّلامة الإنشائيّة للأعمدة والجوائز الأكثر تضرّراً من الانفجار.

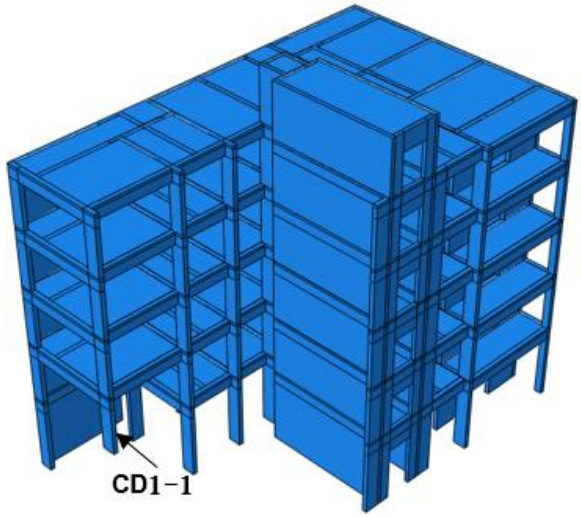
العنصر الإنشائي	الطابق	مؤشّر الضّرر (%)	درجة الضّرر	درجة السّلامة الإنشائيّة
CD1	4	3.9	ضرر طفيف	سليم
	3	11.3	ضرر طفيف	سليم
	2	21.3	ضرر متوسّط	سليم بتحفّظ
	1	31.4	ضرر متوسّط	سليم بتحفّظ
	0	54.7	ضرر شديد	خطر وغير آمن
CD2	4	12.1	ضرر طفيف	سليم
	3	15.2	ضرر طفيف	سليم
	2	18.5	ضرر متوسّط	سليم بتحفّظ
	1	25.4	ضرر متوسّط	سليم بتحفّظ
	0	27.1	ضرر متوسّط	سليم بتحفّظ
CD4	4	9.5	ضرر طفيف	سليم
	3	12.3	ضرر طفيف	سليم
	2	13.9	ضرر متوسّط	سليم بتحفّظ
	1	19.9	ضرر متوسّط	سليم بتحفّظ
	0	26.3	ضرر متوسّط	سليم بتحفّظ
B5-D	4	0.4	ضرر طفيف	سليم
	3	0.8	ضرر طفيف	سليم
	2	2.3	ضرر طفيف	سليم
	1	3.6	ضرر طفيف	سليم
	0	10.5	ضرر طفيف	سليم
B5-1	4	2.5	ضرر طفيف	سليم
	3	4.1	ضرر طفيف	سليم
	2	4.5	ضرر طفيف	سليم
	1	6.3	ضرر طفيف	سليم
	0	26.7	ضرر متوسّط	سليم بتحفّظ

5. إعادة تأهيل البناء المتضرّر من الانفجار:

1.5 تقوية العناصر المتضرّرة من الانفجار:

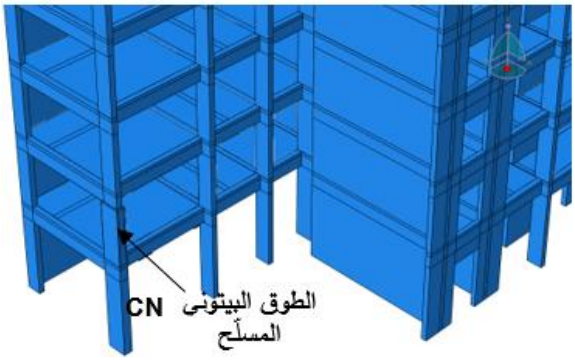
1.1.5 التقوية عن طريق زيادة أبعاد مقطع العنصر بتطويقه بطوق من البيتون المسلّح:

تمّ اعتبار الضّرر في العمود (CD1-0) بحسب نتائج الدراسة التحليليّة بأنّه ضرر شديد، واعتبار الضّرر في الجائز (B5-1-0) بأنه ضرر متوسّط، وتمّ اعتماد حل استبدال العمود (CD1-0) مع الجوائز (B5-1-0) و (B5-D-0)، والبلاطة المتّصلة كما هو موضّح في الشّكل (21).



الشّكل (21) إزالة العمود المتضرّر (CD1-0) مع الجوائز (B5-1-0) و (B5-D-0) والبلاطة المتّصلة.

يتم تأمين اتصال العمود الجديد (CN) مع العمود (CD1-1) بعد تخشين سطحه باستخدام طوق بيتوني مسلّح كماهو موضّح في الشّكل (22).



الشّكل (22) وضع البناء بعد تنفيذ الطوق البيتوني المسلّح وتنفيذ العمود CN مع الجوائز والبلاطة المتّصلة.

يتم حساب قوّة التحمّل التصميميّة لعمود بيتوني مسلّح خاضع لضغط مركزي من العلاقة التالية (الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت البيتونيّة المسلّحة، 2012):

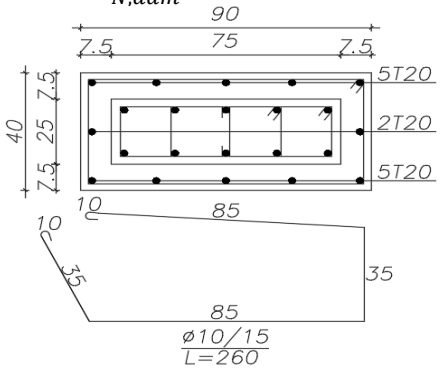
$$P_N = \Phi.\Omega.0.8.\left[0.85f`_c.A_c + f_y.A_s\right] \quad (10)$$

قوّة التحمّل التصميميّة للعمود (CD1-1):

$$P_N = 0.8 \times 0.65 \times (0.85 \times 30 \times 250 \times 750 + 400 \times 3801.33)/9810$$
$$P_N = 334.04\ ton$$

قوّة تحمّل العمود المتضرّر (CD1-1):

$$P_{N,dam} = 0.8 \times 0.65 \times (0.85 \times 20.6 \times 250 \times 750 + 400 \times 3801.33)/9810$$
$$P_{N,dam} = 254.63\ ton$$



الشّكل (23) مقطع عرضي في العمود (CD1-1) بعد التقوية باستخدام القميص البيتوني المسلّح (cm).

يتم حساب مساحة المقطع العرضي للقميص البيتوني من العلاقة التالية (ACI 318- 014, 2014):

$$A_g = \frac{P_u}{0.6375[(0.85f_c') + \rho(f_y - 0.85f_c')]} \quad (11)$$

حيث:

A_g: مساحة المقطع العرضي للقميص البيتوني.

ρ: نسبة التسليح الطولي.

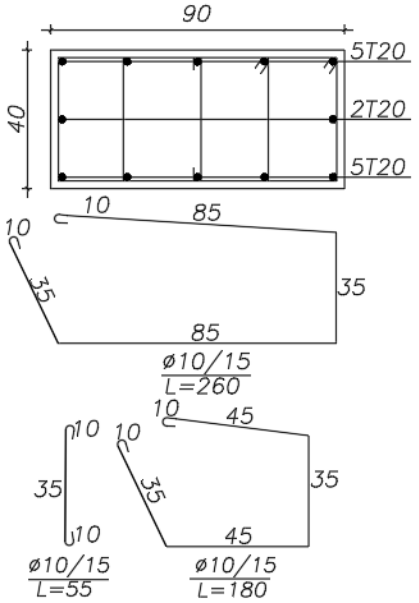
$$A_g = (400 \times 900) - (250 \times 750)$$
$$A_g = 172500\ mm^2$$
$$A_s = \frac{12 \times \pi \times 20^2}{4}$$
$$A_s = 3769.91\ mm^2$$
$$\rho = \frac{3769.91}{172500} \times 100$$
$$\rho = 2.19\ \%$$
$$P_u = 172500 \times \frac{0.6375}{9810}[(0.85 \times 30) + 0.0219(400 - 0.85 \times 30)]$$
$$P_u = 377.79\ \text{ton}$$

قوّة تحمل العمود المتضرّر (CD-1-1) بعد التقوية:

$$P_{tot} = P_{N,dam} + P_u \quad (12)$$
$$P_{tot} = 254.63 + 377.79 = 632.42\ ton$$

يوضّح الشّكل (23) مقطع عرضي في العمود (CD1-1) بعد التقوية باستخدام القميص البيتوني المسلّح.

يوضّح الشّكل (24) أبعاد وتفاصيل تسليح العمود (CN).



الشّكل (24) أبعاد وتفاصيل تسليح العمود (CN) (cm).

2.1.5 التقوية باستخدام قميص معدني:

تمّت تقوية الأعمدة المتضرّرة التي تمّ تصنيف درجة سلامتها الإنشائيّة بأنها سليمة بتحفّظ باستخدام قميص معدني.

يتكوّن القميص من أربع زوايا معدنيّة شاقوليّة عند أركان العمود، وتربط بينها صفائح وصل أفقيّة، ويُوضَع كرسي معدني مؤلّف من أربع زوايا أفقيّة عند أعلى وأسفل العمود، ويتم إملاء طينة إسمنتيّة في الفراغات خلف وبين الزوايا.

قوّة تحمّل العمود المتضرّر (CD2-0):

$$P_{N,dam} = 0.8 \times 0.65 \times (0.85 \times 21.9 \times 250 \times 750 + 400 \times 3801.33)/9810$$

$$P_{N,dam} = 265.61\ ton$$

القوة المطبقّة على الزوايا المعدنيّة:

$$N_{ang} = P_N - P_{N,dam} \quad (13)$$

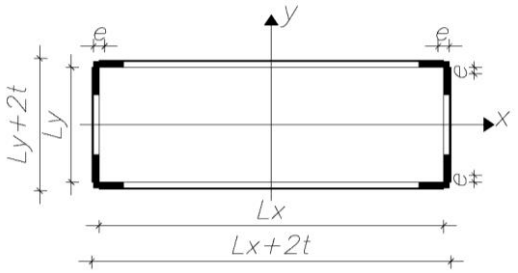
$$N_{ang} = 334.04 - 265.61 = 68.43\ ton$$

يوضّح الجدول (9) الخصائص الهندسيّة للزوايا المعدنيّة المستخدمة في التقوية.

الجّدول (9) الخصائص الهندسيّة للزوايا المعدنيّة المستخدمة في التّقوية.

h (mm)	80
t (mm)	10
A (mm^2)	1510
e (mm)	23.4
r_x (mm)	24.1
r_y (mm)	24.1
I_x (mm^4)	875000
I_y (mm^4)	875000
r_v (mm)	15.4
r_z (mm)	30.3

يوضّح الشّكل (25) مقطع عرضي ضمن عمود بيتوني مسلّح مقوّى باستخدام قميص معدني.



الشّكل (25) مقطع عرضي ضمن عمود بيتوني مسلّح مقوّى باستخدام قميص معدني.

عزم عطالة الزوايا المعدنيّة كعمل مشترك حول (X):

$$I_x = 4I_{xa} + 4A \times \left(\frac{L_y}{2} + t - e\right)^2 \quad (14)$$

$$I_x = 78.726 \times 10^6\ mm^4$$

نصف قطر الدوران لمجموعة الزوايا حول (X):

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (15)$$

$$r_x = 78.726 \times 10^6\ mm$$

نسبة النحافة:

$$\lambda = \frac{K.L}{r_x} \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{1 \times 3650}{114.17} = 31.97$$

الإجهاد الفعلي المطبّق على الزاوية:

$$f_{sa} = \frac{N_a}{4A_a} \quad (17)$$

$$f_{sa} = \frac{68.43 \times 9810}{4 \times 1510} = 111.14\ MPa$$

المعامل Cc (AISC 360-16, 2010):

$$C_c = \pi\sqrt{\frac{2E}{f_y}} \qquad (18)$$

$$C_c = \pi\sqrt{\frac{2\times 210000}{240}} = 131.36 > \lambda$$

الإجهاد المسموح لفولاذ الزوايا (AISC 360-16, 2010):

$$f_a = \frac{(1-0.5\times\left(\frac{K.L}{r_x.C_c}\right)^2)\times f_y}{\frac{5}{3}+\frac{3}{8}\left(\frac{K.L}{r_x\times C_c}\right)-\frac{1}{8}\left(\frac{K.L}{r_x.C_c}\right)^3} \qquad (19)$$

$$f_a = 132.6\ MPa$$

$$f_{sa} < f_a$$

يوضّح الجّدول (10) الخصائص الهندسيّة لصفائح الوصل الأفقيّة الرابطة بين الزوايا المعدنيّة، حيث يجب أن تكون قادرة على مقاومة قوّة الشّد الناتجة عن الضغوط الأفقيّة.

الجّدول (10) الخصائص الهندسيّة لصفائح الوصل الأفقيّة.

h (mm)	120
t (mm)	10
S (mm)	250
f_{ys} (MPa)	355

إجهاد الحصر المطبّق على الصفائح:

$$P_h = 0.1f`_c \qquad (20)$$

$$P_h = 0.1\times 21.9 = 2.19\ MPa$$

قوّة الشّد المطبّقة على صفيحة واحدة:

$$N_h = P_h \times L_x \times \frac{S}{2} \qquad (21)$$

$$N_h = 2.19\times 750\times\frac{250}{2}\times 10^{-3} = 205.3\ KN$$

قوّة الشّد لمنع الزوايا من التحنيب:

$$N_{hb} = 0.025\times\frac{N_{ang}}{2} \qquad (22)$$

$$N_{hb} = 0.025\times\frac{671.3}{2} = 8.4\ KN$$

قوّة الشّد الإجمالية المطبّقة على صفيحة واحدة:

$$N_{hs} = N_h + N_{hb} \qquad (23)$$

$$N_{hs} = 205.3 + 8.4 = 213.7\ KN$$

إجهاد الشّد الأعظمي المطبّق على صفائح الوصل:

$$f_{st} = \frac{N_{hs}}{h\times t_2} \qquad (24)$$

$$f_{st} = \frac{213.7\times 10^3}{120\times 10} = 178.08\ MPa$$

الإجهاد المسموح لفولاذ صفائح الوصل:

$$f_{all} = 0.6\times 0.85\times f_{ys} \qquad (25)$$

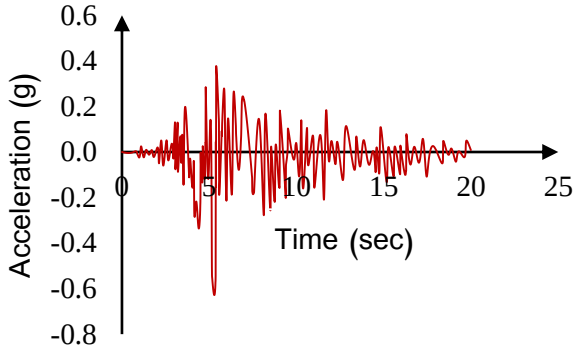
$$f_{all} = 0.6\times 0.85\times 355 = 181.05\ MPa > f_{st}$$

2.5 تـأمين اتصـال البنـاء بعـد التقويـة مـع الكتلـة الغربيّة:

إن إعادة تشييد الكتلة الغربيّة دون وجود أي اتصال مع البناء المتضـرّر بعـد التقويـة غيـر آمـن، حيـث تعمـل العناصـر الإنشائيّة لكل كتلـة بشكل منفصل عند تعرّض البنـاء للقوى الزّلزاليّة، ويجب تـأمين اتصـال الكتلتين من أجل إعادة عمل الجملة الإنشائية للبناء للوضع السليم كجملة متكاملة مقاومة للزلازل، وسيتم ذلك من خلال وصلات القص المعدنيّة.

1.2.5 تصميم وصلات القص المعدنية:

تمّ تحليل النموذج العددي للبناء تحت تأثير القوى الزّلزاليّة باستخدام برنامج العناصر المحدودة (ETABS) بهدف تحديد قيمة قوة القص الأعظميّة المطبقّة على الوصلات المعدنيّة، ويوضّـح الشّـكل (26) السـجل الزّلزالـي لزلـزال تركيـا (7-February-2023) المسـجّل مـن موقـع الرصـد الزلزالـي (Kahramanmaras Pazarck) عند نقطة الرصد (4615).



الشّكل (26) السجل الزّلزالي لزلزال تركيا (7-February-2023) (https://deprem.afad.gov.tr/).

تمّ تطبيق السجل الزلزالي عند قاعدة البناء بالاتجاه (X).

قوّة القص التصميميّة بحسب (Eurocode 3, 2005):

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6\times f_{ub}\times A}{\gamma_{m2}} \qquad (26)$$

$$A = \frac{1.25\times F_{v,Rd}}{0.6\times 500}$$

- تصميم وصلات القص المعدنيّة للبلاطات:

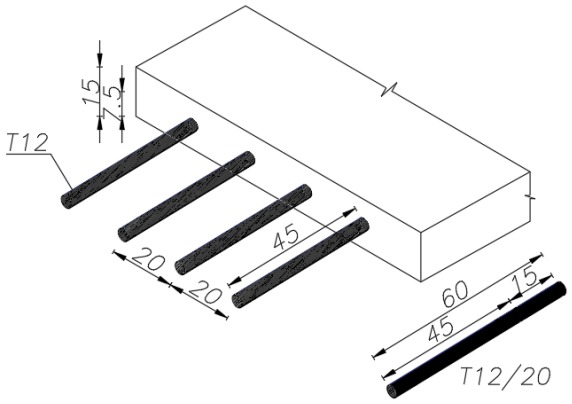
$$A = \frac{1.25 \times 2659.57}{0.6 \times 500}$$

- تصميم وصلات القص المعدنيّة للجوائز:

$$A = \frac{1.25 \times 106768.38}{6 \times 0.6 \times 500}$$

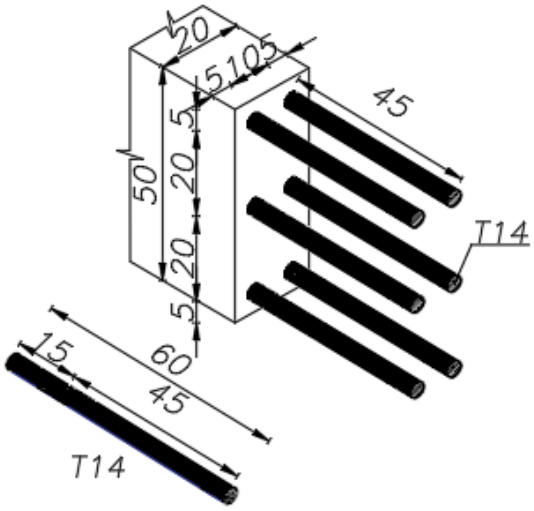
$$D_b = 14\ mm$$

يوضّح الشّكل (27) أماكن توضّع وصلات القص المعدنيّة ضمن البلاطة.



الشّكل (27) أماكن وصلات القص المعدنيّة ضمن البلاطة (cm).

يوضّح الشّكل (28) أماكن توضّع وصلات القص المعدنيّة ضمن الجائز (B2).



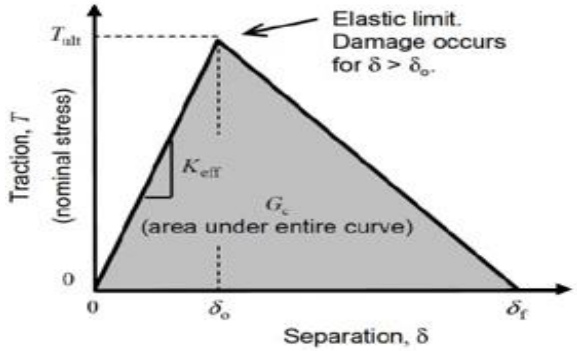
الشّكل (28) أماكن وصلات القص المعدنيّة ضمن الجائز (B2) (cm).

2.2.5 تثبيت وصلات القص المعدنيّة في البيتون باستخدام الإيبوكسي:

$$D_s = 12\ mm$$

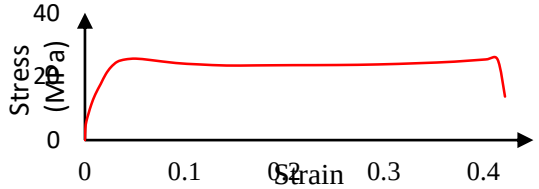
يتميّز راتنج الإيبوكسي بالصلادة، وقابلية الالتصاق، والمقاومة الكيميائيّة العالية نسبياً، وتعود قابلية التصاقه النوعية العالية إلى تركيبه الكيميائي المتمثّل في مجموعة الإيثرات والهيدروكسيل، والمجاميع القطبيّة، ولذلك فهو يُستعمَل في التطبيقات التي تتطلب أداءاً وظيفياً عالياً.

تمّ استخدام طبقة بسماكة (1mm) من مادة الإيبوكسي اللاصقة لتثبيت وصلات القص المعدنيّة ضمن بيتون البناء المتضرّر بعد التقوية، وتعريف سطح الاتصال بين الوصلات المعدنيّة والبيتون ضمن برنامج (ABAQUS) باستخدام السلوك (جر – فصل) للمواد اللاصقة كما هو مبين في الشّكل (29).



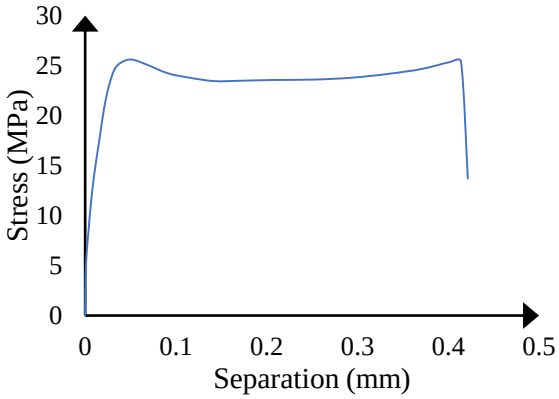
الشّكل (29) منحني السلوك (جر – فصل) للمواد اللاصقة (ABAQUS Standard User's Manual, 2011).

يوضّح الشّكل (30) منحني (إجهاد – انفعال) لمادة الإيبوكسي تحت تأثير قوة الشد.



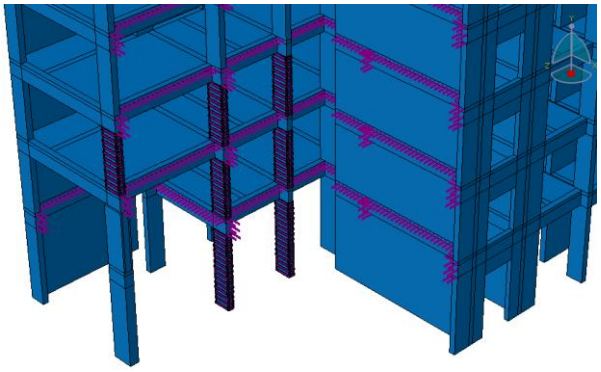
الشّكل (30) منحني (إجهاد – انفعال) لمادة الإيبوكسي تحت تأثير قوة الشد (Aghdam et al., 2021).

يوضّح الشّكل (31) منحني السلوك (جر – فصل) لمادة الإيبوكسي بسماكة (1 mm).



الشّكل (31) منحني السلوك (جر – فصل) لمادة الإيبوكسي بسماكة (1 mm).

يوضّح الشّكل (32) مواقع وصلات القص المعدنيّة ضمن البناء بعد التقوية.



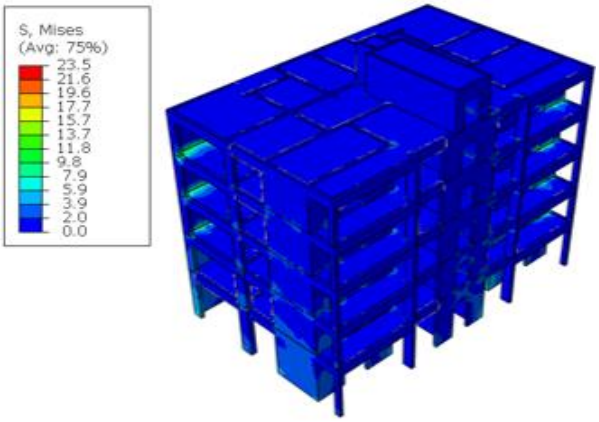
الشّكل (32) مواقع وصلات القص المعدنيّة ضمن البناء بعد التقوية.

3.5 الدراسة التحليلية للبناء بعد التقوية والوصل تحت تأثير القوى الزّلزاليّة:

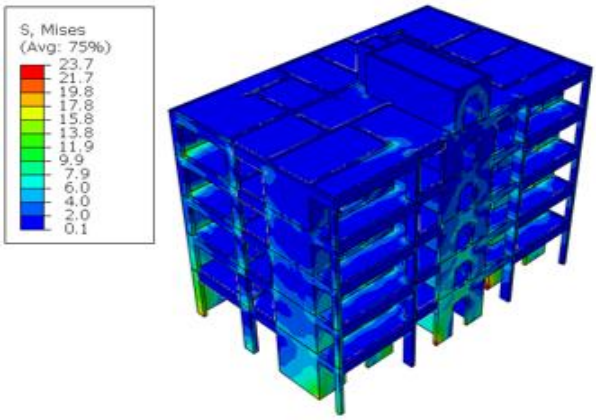
تمّ تحليل النموذج العددي للبناء بعد التقوية والوصل تحت تأثير القوى الزّلزاليّة باستخدام برنامج (ABAQUS)، وتطبيق السجل الزلزالي الموضّح في الشّكل (26) عند قاعدة البناء بالاتجاه (X).

توضّح الأشكال (33)، (34)، (35)، (36)، (37) الإجهادات الأعظميّة نتيجة الزلزال في بيتون البناء بعد التقوية والوصل عند الأزمنة (4.3 sec)، (5.3 sec)، (6.3 sec)، (8.3 sec)، (10.3 sec) على التوالي، حيث يلاحظ عدم تجاوز قيمة الإجهادات في البيتون للقيمة المسموحة لمقاومة البيتون على الضغط (30 MPa).

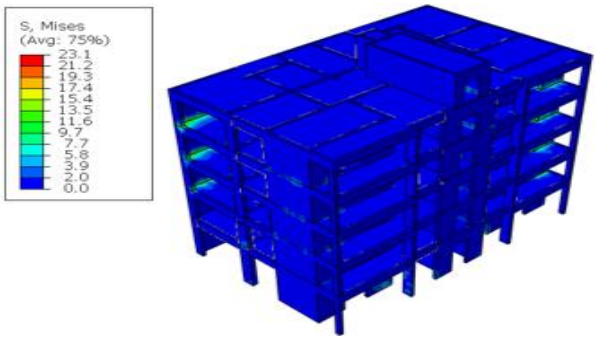
يوضّح الشّكل (38) الإجهادات الأعظميّة نتيجة الزّلزال في الفولاذ بعد التقوية والوصل عند الزمن (5.3 sec)، حيث يلاحظ عدم تجاوز قيمة الإجهاد في الفولاذ لإجهاد الخضوع (400 MPa).



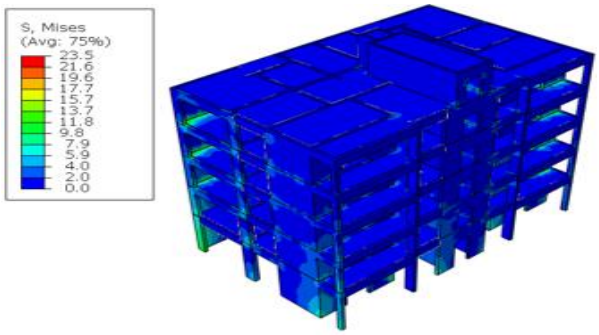
الشّكل (33) الإجهادات الأعظميّة نتيجة الزلزال في بيتون البناء بعد التقوية والوصل عند الزمن (4.3 sec) (MPa).



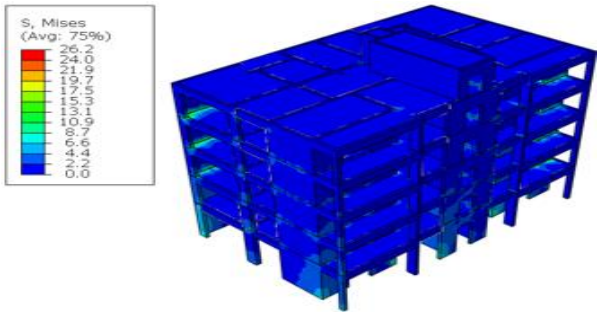
الشّكل (34) الإجهادات الأعظميّة نتيجة الزلزال في بيتون البناء بعد التقوية والوصل عند الزمن (5.3 sec) (MPa).



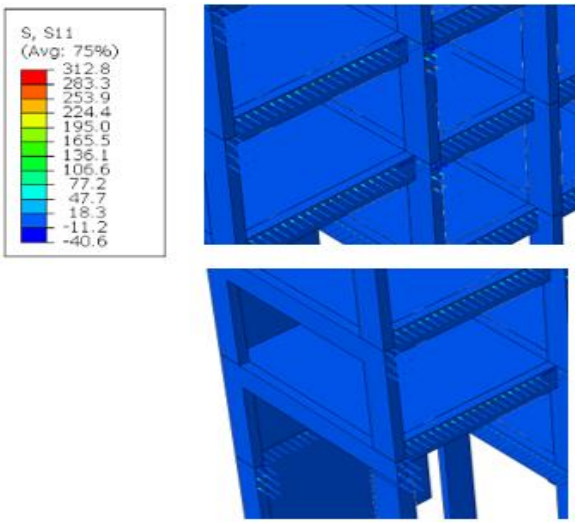
الشّكل (35) الإجهادات الأعظميّة نتيجة الزلزال في بيتون البناء بعد التقوية والوصل عند الزمن (6.3 sec) (MPa).



الشّكل (36) الإجهادات الأعظميّة نتيجة الزلزال في بيتون البناء بعد التقوية والوصل عند الزمن (8.3 sec) (MPa).

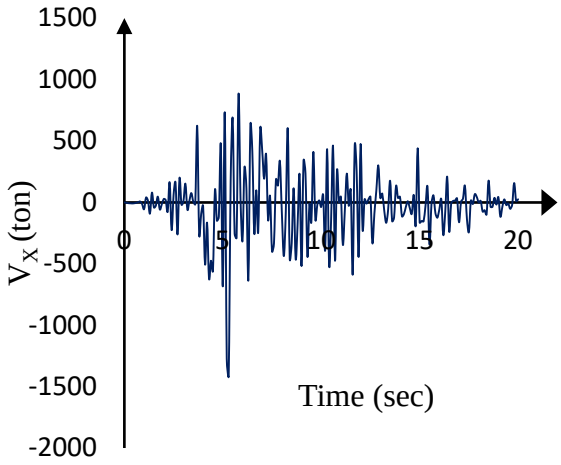


الشّكل (37) الإجهادات الأعظميّة نتيجة الزلزال في بيتون البناء بعد التقوية والوصل عند الزمن (10.3 sec) (MPa).



الشّكل (38) الإجهادات الأعظميّة نتيجة الزلزال في الفولاذ بعد التقوية والوصل عند الزمن (5.3 sec) (MPa).

يوضّح الشّكل (39) السجل الزمني لقوة القص القاعدي للبناء بالاتجاه (X).



الشّكل (39) السجل الزمني لقوة القص القاعدي للبناء بالاتجاه (X).

6. الاستنتاجات والتوصيات:

1. أعطى استخدام السلوك (JH2) ضمن النموذج العددي في توصيف مادة البيتون تحت تأثير معدّلات الإجهاد والضغوط العالية الناتجة عن الانفجار نتائج دقيقة، وبفروق نسبية في قيم التشوّهات والإجهادات بمقدار (5%) كحد أقصى عن قيم القياسات التجريبيّة.

2. وصلت القيمة الأعظميّة لمؤشّر الضّرر في أعمدة البناء المتبقّية القريبة من مصدر الانفجار إلى حد (55%)، وانخفضت القيمة إلى حد (4%) مع الابتعاد عن مصدر الانفجار.

3. أدى تصميم عناصر التقوية والوصل المطلوبة بحسب قيم مؤشّر الضّرر إلى رفع كفاءة البناء المتضرّر، وتحقيق مبدأ الاستدامة من خلال التقليل من استخدام المواد والأنشطة المنتجة للنفايات، وخفض استهلاك الطاقة المضرّة بالبيئة.

يوصى بدراسة إمكانيّة التقوية باستخدام طرائق تقوية أخرى كاستخدام الألياف الكربونية، وإجراء تقييم سلامة إنشائيّة لأبنية متضرّرة من قذائف صاروخيّة، وأخذ الأثر الناجم عن الصدم والانفجار بعين الاعتبار.

التمويـــل: هـذا البحـث ممـول مـن جامعـة دمشـق وفـق رقم التمويل (501100020595).

References:

1. الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلّحة. (2012). منشورات نقابة المهندسين، سوريا، الطبعة الرابعة.
2. Abaqus Analysis User's Manual 6.11.
3. ACI 318- 014, Building Code Requirements for Structural Concrete with Commentary 2014.
4. Aghdam, A. K., Behjat, B., Marques, E., Carbas, R., Silva, L., Mamaqani, H. R., (2021). Effect of reduced graphene oxide on mechanical behavior of an epoxy adhesive in glassy and rubbery states. JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS (0 (0) 1–9). https://dx.doi.org/10.1177/00219983211031659.
5. AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings, 2010.
6. Code, S. E. B. (2004). Syrian engineering association publications. Damascus, Syria (In Arabic).
7. Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alharbi, Y. R., Al- Salloum, Y. A., Abbas, H., (2014). Progressive collapse potential of a typical steel building due to blast attacks. Journal of Constructional Steel Research (101, 143–157). https://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.005.
8. Eskew, E., (2017). Structural Health Monitoring of Buildings for Safety Assessments Under Explosions .(Doctoral dissertation, University of Connecticut
9. Eurocode 3, Design of steel structures, 2005.
10. Fu, F., (2013). Dynamic response and robustness of tall buildings under blast loading. Journal of Constructional Steel Research (80, 299–307). https://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.10.001.
11. Gholipour, G., Zhang ,C., Mousavi, A. A., (2020). Numerical analysis of axially loaded RC columns subjected to the combination of impact and blast loads. Engineering Structures Journal (219, 110924). https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110924.
12. Jayasooriya, R., Thambiratnam, D. P., Perera, N.J., (2014). Blast response and safety evaluation of a composite column for use as key element in structural systems. Engineering Structures (61, 31–43). https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.007.
13. Johnson, G. R., Holmquist, T. J., (1994). An improved computational constitutive model for brittle materials. AIP Conference Proceedings, 309(1), pp. 981–984. https://doi.org/10.1063/1.46199.
14. Karlos, V., Solomos, G., (2013). Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components. Luxembourg, Publications Office of the European Union.
15. Mai, V. C., Vu, N. Q., (2021). Assessment of Dynamic Response of 3D Ultra High Performance Concrete Frame Structure under High Explosion Using Johnson-Holmquist 2 Model. KSCE Journal of Civil Engineering (25(3):1008-1018). https://doi.org/10.1007/s12205-020-1373-7.
16. Pham, D.H., Le, B. D., (2022). A comparison between experimental and numerical studies for reinforced concrete slabs under blast loading. International Journal of GEOMATE (Vol. 22, Issue 93, pp.1-8). https://doi.org/10.21660/2022.93.j2378.
17. Thai, D. K., Pham, T. H., Nguyen, D. L., (2019). Damage assessment of reinforced concrete columns retrofitted by steel jacket under blast loading. Struct Design Tall Spec Build (e1676). https://doi.org/10.1002/tal.1676.
18. https://deprem.afad.gov.tr/, for seismic record.