تَقييم تأثير الحُمولات الانفجاريّة على العناصر المَعدنيّة

مُصعب النَّدَّاف[1]

مُحمّد بسَّام الخبَّاز[2]

المُلَخَّص

تُقدِّم المَقالة دراسةً جديدةً في حقلٍ بحثيٍ نادراً ما تَمّ البحث فيه في مُجتمع الهندسة الميكانيكّية، وهو مَجال الانفِجارات وأثرها في العناصر المَعدنيّة للآلات والمنشآت، حيث تُمثّل خطوة أولى بَسيطة في هذا الحقل يجب أن يَتبعها خطوات لاحقة لتوسعة المعلومات والمعرفة فيه.

انطلقت هذه الدراسة من دراسة مَرجعيّة سابقة ضمن مجال الهندسة المدنية، حول دراسة استجابة الأعمدة المُختلطة المُعرَّضة لحِمل انفجاري وسلوكها (عمود معدني ذي مقطع H مُحاط بالإسمنت وقضبان التسليح الطولي والعرضي)، قام الباحث بإعادة نَمذجة عمود مُختلط مُشابه للنَّموذج في الدراسة المَرجعيّة وعَرَّضه للحُمولة الانفجاريّة نفسها. تم استخدام أحد أهم برامج النَّمذجة والمُحاكاة التي تَستخدم طريقة العناصر المنتهية، وهو برنامج (LS-DYNA)، وكانت النتائج مُقاربة لنتائج الدراسة المَرجعيّة، ومن ثَم أُجريَت تعديلات على بعض مُتغيرات النَّموذج وخصائصه، وأُجريَت التحليلات اللازمة واستُخلِصت النتائج وبُيّن أثر هذه المتغيرات على العمود المعدني. حيث أُزيل الغلاف البيتوني وقضبان التسليح وأُبقيَ على العمود المعدني فقط وعُرّض للحمولة الانفجارية السابقة نفسها، ثم قُورن بين العمود المعدني المُغلَّف بالبيتون وفولاذ التسليح مع العمود المعدني غير المُغلَّف. وغُيّرَت قيمة الحمولة الانفجاريّة المؤثّرة على العمود المعدني، للوصول إلى أثر وجود البيتون بوصفه مادة محيطة بالأعمدة المعدنية. إذ توصَّل الباحث إلى أن البيتون يَمتص الجزء الأكبر من طاقة الانفجار ومن ثَم يُخفّض الأضرار الهيكليّة للعمود المعدني بنسبةٍ كبيرةٍ جداً، حيث انخفض الانحناء الكلي في العمود المعدني المحاط بالبيتون إلى 50% مقارنةً بالعمود المعدني غير المحاط بالبيتون، وكذلك انخفض التشوّه الموضعي في العمود المعدني المحاط بالبيتون إلى 10% مُقارنةً بالعمود المعدني غير المحاط بالبيتون.

الكلمات المفتاحيَّة: الحمولات الانفجاريَّة، العمود المعدني، العمود المُختلط، مُؤشر الضَّرر، الانفعال اللدن، التشوه الكلي، التشوه الموضعي، طريقة العناصر المنتهية.

(1) طالب دراسات عليا ماجستير اختصاص تصميم وبناء آلات، قسم هندسة التصميم الميكانيكي والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سورية

E-mail: musaab.alndaf@gmail.com

(2) أستاذ مساعد في قسم هندسة التصميم الميكانيكي والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سورية.

Evaluation the Effects of Blast Loads on Metallic Elements

Musaab Al-ndaf[(1)]
Muhammad Bassam Al-Khabbaz[(2)]

Abstract

The article presents a new study in a research field that has rarely been researched in the mechanical engineering community, which is the field of explosions and their impact on the metallic elements of machines and constructions. It represents a simple first step in this field that must be followed by subsequent steps to expand information and knowledge in it.

This study was launched from a previous reference study within the field of civil engineering, on the study of the response and behavior of mixed columns subjected to an explosive load (a metal column with an H-section surrounded by cement and longitudinal and transverse reinforcing bars).

The researcher re-modeled a mixed column similar to the model in the reference study and exposed it to the same explosive load. One of the most important modeling and simulation programs that uses the finite element method, which is the (LS-DYNA) program, was used, and the results were close to the results of the reference study. Then modifications were made to some of the model's variables and properties, and the necessary analyzes were conducted and the results were extracted and the impact of these variables on the metallic column was shown.

The concrete casing and the reinforcing bars were removed and only the metal column was left and exposed to the same previous explosive load, then it was compared between the concrete-covered metal column with the non-covered metal column. Then the value of the blast load that affected to the metal column was changed, to reach the effect of the presence of concrete as a material surrounding the metal columns.

The researcher concluded that the concrete absorbs the bulk of the energy of the blasting and thus reduces the structural damage to the metal column by a very large percentage. Where the total bending in the concrete-covered metal column was decreased to 50% compared to the non-covered metal column, and the local deformation in the concrete-covered metal column was decreased to 10% compared to the non-covered metal column.

Key Words: Blast Loads, Metal Column, Mixed Column, Damage Index, Plastic Strain, Total Deformation, Local Deformation, Finite Element Method.

[(1)]Master's degree student in design and construction of machines, Department of Mechanical Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Syria.

E-mail: musaab.alndaf@gmail.com

[(2)]Assistant Professor, Department of Mechanical Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Syria.

1. المُقدّمة

إنَّ تزايد حوادث الانفجار وآثارها الكارثية في المنشآت الصناعية وما تحويه من آلات ومعدات وأشخاص ولاسيما المنشآت الحساسة منها –كمنشآت الطاقة والمنشآت النفطية والبتروكيماوية والجسور والسدود وأبراج نقل الطاقة والاتصالات والمنشآت الاستراتيجية– فَرض مسألة تأثير الحمولات الانفجاريّة أثناء العملية التّصميمية لأخذها بعين الاهتمام ومعرفة آثارها السلبية، لتفادي هذه الآثار أو التخفيف منها على جميع المستويات البشريّة والماديّة، ولإيجاد تصميم آمن يضمن الاستثمار السّليم والمديد لهذه المُنشآت.

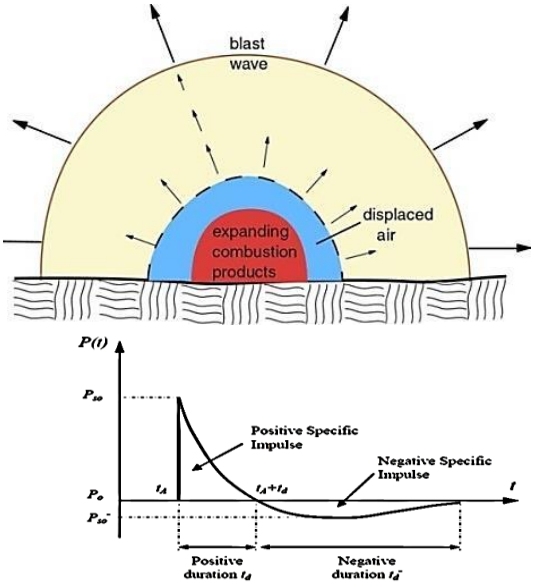
إنَّ فكرة البحث انطلقت من صميم الأزمة السّورية وما يُعانيه وطننا الحبيب، لعلّ هذا البحث أن يكون رافداً للقطاع الصناعيّ في مرحلة إعادة الإعمار.

2. هدف البحث

التّعرف على آثار الانفجارات على العناصر المعدنية –والتي قد تُستخدَم في المنشآت المعدنيّة أو هياكل الآلات– ومعرفة العلاقة المُؤثِّرة فيما بينها، وأثر تغيير بعض الشروط والمتغيرات على مستوى الأضرار الحاصلة، وانعكاسات ذلك على عملية التصميم، وذلك من خلال المقارنة بين العمود المعدني المُغلَّف بالبيتون وفولاذ التسليح مع العمود المعدني غير المُغلَّف، وتغيير قيمة الحمولة الانفجارية المؤثرة على العمود المعدني، للوصول إلى أثر وجود البيتون كأحد المواد المحيطة بالأعمدة المعدنية.

3. الإطار النظري والتعريفات

الانفجار: هو تَحرُّر مُفاجئ وبسرعة عالية للطّاقة، مُترافق مع مَوجة ضغط وحرارة عاليتين، حيث يَنتج عنه موجة الضَّغط الموجب (أكبر من الضغط الجوي، وهي الأخطر)، تليها موجة الضَّغط السَّالب (أقل من الضَّغط الجوي) بعد عِدّة أجزاء من الثانية. كما هو موضَّح بالشكل (1).



الشكل (1) شكل الموجة الانفجارية [1]

العناصر المُعرَّضة للحِمل: العناصر المعدنيّة (أعمدة، وجوائز، وصفائح، وبلاطات، وجدران، وقضبان..) من معدن أو خليطة معدنيّة مُعيّنة، وبأبعاد ومقطع مُحدّد.

الدراسة التحليليّة الرقميّة: وهي دراسةٌ تتم بواسطة برامج حاسوبيّة –خاصة بالبحث العلمي– والتي توفر الجُهد والوقت والتكلفة على المُهندسين والباحثين، للحصول على النتائج بِدقّة وأمان دون التعرُّض لمخاطر التّجارب الواقعيّة؛ حيث تقوم هذه البرامج بدراسة السّلوك الديناميكي للعناصر والتنبّؤ بالمقاومة المتبقية بعد انتهاء مرحلة التحميل، مما يُعطي المُهندسين رؤية أوضح عن الإجهادات التي يَتعرَّض لها العنصر ليتمكنوا من تصميمه على نحو سليمٍ وآمنٍ. [8]

مُؤشر الضَّرر: هو معيار يتم اختياره لتقييم حالة العناصر المُعرَّضة للحمل الانفجاري، مثل التّشوّه اللّدن، والانتقالات والانفعالات، والرؤية المباشرة، التي استُخدِمت في البحث.

مُتغيرات الحِمل الانفجاري: كمية الشحنة الانفجارية وبُعد مركز الانفجار عن الهدف، ومن خلالهما نُحدِّد ما يُسمَّى مسافة كتلة الانفجار المُقاسة ويُرمز لها بالرمز (Z)، والذي تَعتمد عليه معظم دلائل (أكواد) التَّصميم.

ويُعطى بالعلاقة[2]: $Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$

حيث: Z: مسافة كتلة الانفجار المُقاسة ($m.Kg^{-1/3}$).

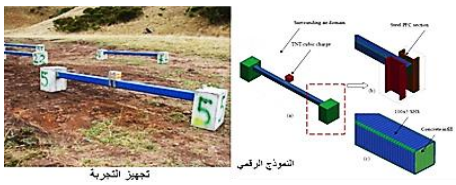
R: بُعد الشحنة عن العنصر (m).

W: كتلة الشحنة الانفجارية مُقدرة بـ(Kg) TNT.

قام عدد من العلماء بوضع علاقات لحساب الضغط الأعظمي الناتج عن الانفجار، وذلك كتابع للمُعامل Z، إذ إنَّه عن طريق مَعرفة أو فَرض (Z)، يُعرَف مقدار الضَّرر الحاصل –كالتشوه الأعظمي مثلاً– والذي بمعرفته نَستطيع وضع التَّصميم المناسب لمقاومة هذا التشوه.

4. الدِّراسات السَّابقة

4.1 قام الباحثون *(D & T Ngo et al., 2014 Mohotti)*، ببحث بعنوان: *"آليّة الاستجابة والفشل للأعمدة الفولاذية الأنبوبية المُعرّضة للانفجارات القريبة"* [3]، بهدف التحقق من آليّة تشوه أعمدة فولاذية جوفاء ذات مَقطع مُربَّع مملوءة بالخرسانة، تحت تأثير تفجيرات قريبة باستخدام النهج التّجريبي والعددي، حيث أُجريَت الدراسة على أعمدة أنبوبية مُربَّعة مَصنوعة من صلب الإنشاءات المُشكَّل على البارد، والتي عُرّضت لشحنة TNT شديدة الانفجار الشكل (2)، وتُناقش مزايا استخدام الخرسانة كمادة حَشو لتقليل الأضرار الهيكليّة. حيث كانت الشّحنة على بُعد 100 mm من عَيِّنَتَي الاختبار وهما: C1: عمود فولاذي أجوَف، C2: عمود فولاذي مملوء بالخرسانة، وتم استخدام تقنية النمذجة العدديّة الشاملة باستخدام طريقة Lagrangian- Eulerian (ALE) في العناصر المنتهية باستخدام برنامج LSDYNA في التحليل.



الشكل (2) النموذج الرقمي والتجهيز للتجربة الواقعية [3]

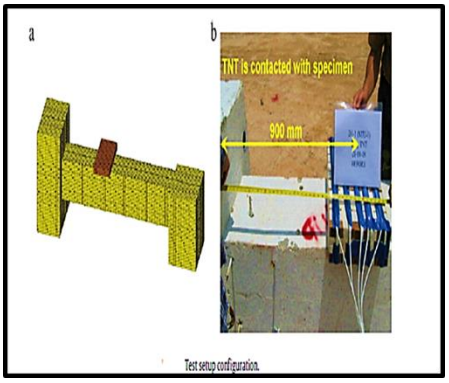
وقد توصَّل الباحثون إلى أن المُحاكاة العَدديّة قادرة على التنبّؤ بحالة الفشل بشكل جيّد؛ وبالتالي من الملاحظات التجريبية والحِسابية تم استنتاج أن العمود الفولاذي المجوَّف (C1) يَتعرَّض لفشلٍ وخَرقٍ كبيرٍ في مقطعه وتشوهٍ كليٍ شديدٍ عند تعرُّضه لانفجارٍ قريب المدى، أما العمود المملوء بالخرسانة (C2)، فقد تشوَّه تشوُّهاً لَدِناً مَحلياً شديداً، ولكنه لم يُخرَق بسبب وجود الحشوة الخرسانية داخله، حيث أن هذه الحشوة تبدأ بالتشوّه والخُضوع حتى تُسحق، وبذلك تَمتَص الحُمولة، وهذا مُوضَّح في الشكل (3).

الشكل (3) عمودَي الدراسة (التجربة الواقعية والنموذج الرقمي) [3]

4.2 قام الباحثون (Wu, Li, Tsai, 2011)، ببحث بعنوان " تأثيراتُ نِسبة كتلة الشّحنة الانفجارية على قُدرة تَحمُّل الضَّغط المتبقية في الأعمدة المختلطة المتضرّرة بانفجارٍ قريب" [4]، بهدف دراسة أثر نسبة كتلة شحنة انفجار (W_{tnt}) على المُقاومة المحوريّة المُتبقية للأعمدة المُختلطة المُعرَّضة لقوة انفجار، حيث أن (W_{tnt}): هي نسبة كتلة الشّحنة الانفجاريّة إلى كتلة البيتون لمترٍ واحدٍ من الارتفاع.

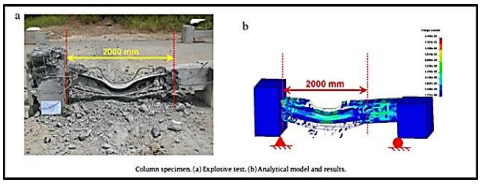
قام الباحثون بإجراء دراسةٍ تَجريبيةٍ واقعيةٍ ومقارنتها مع الدراسة التحليليّة –كما هو موضح بالشكل (4)– وذلك لتقييم مَدى فَعاليّة طريقة العناصر المُنتهية في دراسة سلوك المُنشآت المُعرَّضة لانفجارات، تم استخدام برنامج LS-DYNA لإجراء مُحاكاة رقميّة للاستجابة الديناميكية للأعمدة المُختلطة أثناء تَعرُّضها لانفجار، وفي التّجربة تم استعمال سِت عيّنات للأعمدة

تختلف فيما بينها بالمقطع العرضي والارتفاع، المقطع العرضي الأوّلي المُستخدم مُربَّع بيتوني 40x40 cm يحوي مَقطع مَعدني ذي أبعاد mm HB200*200*8*12 (مقطع H بُعد عَصَبه 200 mm بِسماكة 12 mm، وطول جَناحه 200 mm بِسماكة 12 mm)، وتم استعمال TNT 25 Kg وُضِعَت على تماسٍ مباشرٍ مع العمود.

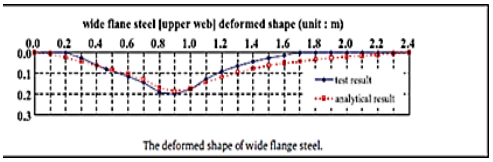


الشكل (4) التجربة الواقعية والنموذج الرقمي [4]

قام الباحثون بمُعايرة نتائج التحليل الرّقمي من برنامج LS-DYNA مع نتائج التّجربة الحقيقية، وذلك بمقارنة تشوّه المقطع المعدني المُغلَّف في كِلتا الحالتين كما هو مُبيَّن بالشكل (5)، كما أن الشكل (6) يُظهِر المُقارنة بين مُنحني تشوّه العمود المعدني بِحالتَي التجربة والدراسة التحليلية، حيث يُبيّن المنحني الأزرق تشوّه العمود الناتج عن التجربة الواقعيّة، ويُبيّن المنحني الأحمر تشوّه العمود الناتج عن التحليل الرقمي، ويُظهِر المنحنيان تَطابقاً كبيراً، حيث أن تشوهّ العمود المعدني بالتجربة على بُعد 90 cm من القاعدة = 198 mm، وتشوّه العمود المعدني بالتحليل الرقمي على بُعد 90 cm من القاعدة = 185 mm.



الشكل (5) النموذج الرقمي والتجربة الواقعية بعد تطبيق الحمولة الانفجارية [4]



الشكل (6) مقارنة بين منحنيي تشوه العمود المعدني بحالتَيّ التجربة الواقعية والدراسة التحليلية [4]

كما تَوصّل البحث إلى أنه عندما تكون نسبة كتلة شحنة الانفجار (W_{tnt}=0.4) فإن المقاومة المُتبقية تكون حوالي 90% إذا كان الانفجار على ارتفاع متر ونصف من أسفل العمود، بينما تكون حوالي 60% عندما تكون شحنة الانفجار أسفل العمود.

4.3 قام الباحث (الخميص، 2019)، ببحث بعنوان: "تقييم انهيار الأعمدة المُختلَطة المُعرَّضة لحمل انفجاري وأثر هذه الأحمال على المُقاومة المُتبقية" [8]، بهدف تقييم مدى فعالية برنامج LS-DYNA في تحليل استجابة المُنشآت المُعرَّضة لحِمل انفجاري، ودراسة سُلوك الأعمدة المُختلطة تحت تأثير هذا الحِمل، حيث تمَّ استخدام عمود مختلط (عمود معدني مُغلّف بالبيتون) تمَّ تَعريضه لشحنة انفجارية مُلاصِقة من مادة TNT، وتمَّ قياس أثر تغيير مجموعة من المُتغيرات كتغيير نوع الاستناد، والنِّسبة بين حَد الانقطاع وحَد السَّيلان للفولاذ المُستخدَم، وتغيير التَّباعد بين أساور التَّسليح العرضيَّة. وقد تَوصَّل البحث إلى مَجموعةٍ من النتائج، أهمها: يُمكن مُحاكاة استجابة الأعمدة المُختلطة وتَمثيل سُلوكها نتيجة تعرُّضها لحِمل انفجاري باستخدام برنامج العناصر المنتهية LS-DYNA وذلك لِوجود تَطابق بين نتائج التحليل والتجربة الواقعية بنسبة 95.5%، بحيث يمكن تقييم الضَّرر الحاصل في هذه الأعمدة.

نُقصان مساحة الضَّرر للعمود بنسبة 15%، 31%، 40% بانخفاض التباعد بين فولاذ التسليح العرضي من 150 mm، 100 mm، 75 mm على الترتيب، عنه في حال التباعد 200 mm. نُقصان التّشوه الأعظمي للعمود المعدني بنسبة 35%،

53%، 84% بانخفاض المسافة بين فولاذ التَّسليح العَرضي من 150 mm، 100 mm، 75 mm على الترتيب، عنه في حال التباعد 200 mm. تغيير نوع الاستناد للعمود من (وثاقة– وثاقة) إلى (مَسند – مَسند) أدى لزيادة تشوّه العمود المعدني بنسبة 75%، وازدياد مَساحة المنطقة المُتضرّرة بنسبة 20%. حدوث تَشظٍّ وانهيارٍ واضحٍ بالخرسانة في حالة نَموذج الاستناد للعمود (مسند – مسند).

ازدياد قيمة الضَّرر الحاصل ونسبة تشوّه العمود المعدني بنسبة 18% في حال استخدام نسبة US/YS=1.25 وزادت كمية الطاقة المُبدَّدة بنسبة 3.5% عنه بحال استخدام نسبة US/YS=1.05.

5. مَواد البحث وطرائقه ونموذج الدّراسة:

قام الباحث بإعادة نَمذجة عمود مُختلط مُشابه للنّموذج في الدِّراسة المرجعيّة [8] (عمود فولاذي ذي مَقطع H مُحاط بالبيتون مع التّسليح الطّولي والعرضي)، وتَعريضه لِنَفس الحمولة الانفجارية (25 kgمن مادة TNT مُلاصقة له)، وذلك باستخدام برنامج (LS-DYNA) وهو حزمة برمجية للمُحاكاة مُتعددة الفيزياء للأغراض العامّة المُتقدِّمة، من تطوير شركة (LSTC) وقد قامت شركة (ANSYS) بالاستحواذ عليها عام 2019، حيث تَستمر الحزمة بالتطور والتوسُّع لاحتواء المزيد من التحليلات المُحاكِية للمُشكلات المُعقّدة في العالم الحقيقي، ويُستخدَم البرنامج بشكلٍ كبيرٍ في مَجال صناعة السيارات والطيران والفضاء، وهندسة الزلازل والهندسة المدنية والعسكرية، وتشكيل الصفائح المعدنيّة والبلاستيك وقَطع المعادن وتحليل الفشل.

من خلال برنامج (LS-DYNA) تم استخدام طريقة العناصر المُنتهية لإجراء التحليلات الديناميكية اللاخطيّة، كما استُخدِمَت طريقة أويلر–لاغرانج (ALE) في نَمذجة المَسألة (الوسط المُستمِر والجسم المُتّصل معه مُترافقان بتشوهات كبيرة جداً) [5].

5.1 مُكوّنات النَّموذج وخَصائصها:

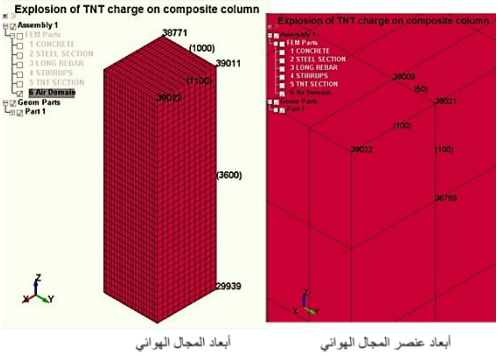
يَتكوّن نَموذج الدِّراسة من عِدة مُكونات وهي: المجال الهوائي، وشحنة TNT متفجرة، وقضبان التّسليح العَرضي والطُّولي، والعمود المعدني، بالإضافة للبيتون المُغلِّف.

5.1.1 المجال الهوائي:

وهو الحَيّز المُحيط بالعمود المُختلَط، ويُعتبَر جزءاً من نَموذج الدِّراسة، وتُقدَّر الكتلة الحجمية له (Volume density):$1.225\ kg/m^3$، يُوضِّح الجدول (1) خصائص هذا المجال، كما يُبيّن الشكل (7) هذا المجال وعناصره وأبعاده.

الجدول (1) خصائص المجال الهوائي في البرنامج

أبعاد المجال الهوائي الكلية	X	Y	Z
	1100 mm	1000 mm	3600 mm
أبعاد عنصر المجال الهوائي	100 mm	50 mm	100 mm
مركز المجال الهوائي	200	200	1250
عدد العناصر:	789	عدد العقد:	9316
نوع العنصر:	solid		



الشكل (7) أبعاد المجال الهوائي وعناصره

5.1.2 شحنة الـ TNT:

تم نَمذجة الشّحنة الانفجاريّة في النَّموذج المَدروس على شَكل مُتوازي مُستطيلات، حيث أنّ أبعادها وعناصرها مُوضَّحة بالجدول (2) والشكل (8).

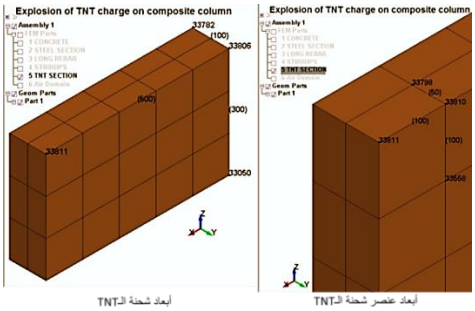
كتلة الشحنة (Weight of detonation):25 kg.

الكتلة الحجمية لمادة TNT (Volume density) : $1.63\ t/m^3$.

سرعة الموجة الانفجارية لمادة TNT (Detonation velocity): $6900\ m/sec$.

الجدول (2) خصائص الشحنة المنفجرة في البرنامج

أبعاد الشحنة الكلية	X	Y	Z
	500 mm	100 mm	300 mm
أبعاد عنصر الشحنة	100 mm	50 mm	100 mm
مركز الشحنة	200	-50	900
عدد العناصر:	30	عدد العقد:	72
نوع العنصر:	solid		



أبعاد شحنة الـTNT أبعاد عنصر شحنة الـTNT

الشكل (8) أبعاد الشحنة وعناصرها

5.1.3 قُضبان التّسليح العرضي:

وهي عِبارة عن قضبان فولاذية بقطر 6 mm، على شكل أساور مُربَّعة، مُتوضِّعة بتباعدٍ ثابتٍ بين بعضها بمقدار 175 mm، على كامل طول العمود المَدروس، يُوضّح الجدول (3) خَصائص هذه القضبان.

الجدول (3) خصائص التسليح العرضي في البرنامج

التسليح العرضي على شكل حلقات مربعة، بطول ضلع:	368 mm	عدد الحلقات المربعة	19
قطر القضيب	6 mm	التباعد بين الحلقات	175 mm
مركز القضبان	0	0	0
عدد العناصر:	756	عدد العقد:	1596
نوع العنصر:	Beam	طول العنصر:	40.88 mm

5.1.4 قُضبان التّسليح الطُّولي:

وهي عِبارة عن قضبان فولاذية بقطر 16 mm، مُتوضِّعة بشكل طولي موازٍ للعمود المعدني وعلى مُحيط العمود البيتوني، على كامل طول العمود المَدروس، يُوضِّح الجدول (4) خَصائص هذه القضبان.

الجدول (4) خصائص التسليح الطولي في البرنامج

التسليح الطولي على شكل قضبان بطول:	3300 mm	عدد القضبان	8
قطر القضيب:	16 mm	التباعد بين القضبان	178 mm
عدد العناصر:	656	عدد العقد:	1320
نوع العنصر:	Beam	طول العنصر:	40.24 mm

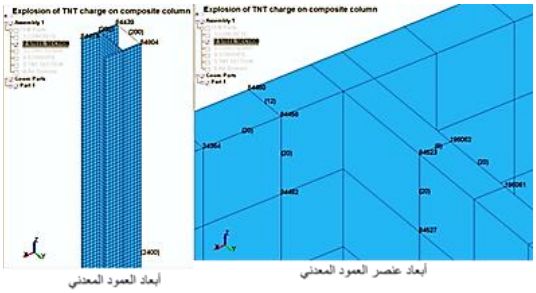
5.1.5 العمود الفولاذي:

وهو عِبارة عن عمود معدني ذي مَقطع H، مُتوضِّع في مركز العمود البيتوني وعلى كامل طوله حيث يُشكّل نواةً له. يُبيّن الجدول (5) خصائص هذا العمود، كما يوضّح الشكل (9) أبعاد مقطعه وعناصره.

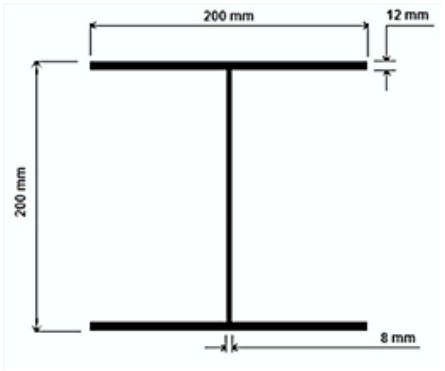
الجدول (5) خصائص العمود المعدني في البرنامج

أبعاد العمود الفولاذي الكلية	X	Y	Z
	200 mm	200 mm	2400 mm
مقطع العمود:	H - section		
مركز العمود:	200	200	1200
عدد العناصر:	3600	عدد العقد:	7502
نوع العنصر:	solid	أبعاد العنصر:	20 X 20 X thickness

حد الخضوع	$\sigma_y = 250$ Mpa
معامل المرونة	$E = 206$ Gpa
معامل بواسون	$\vartheta = 0.29$
معامل القص	$G = 80.17$ Gpa
كثافة الفولاذ	$\rho = 7833\ Kg/m^3$
حد الانقطاع	$y = 434.37$ Mpa
طول العمود	$L = 2.4$ m



أبعاد العمود المعدني أبعاد عنصر العمود المعدني



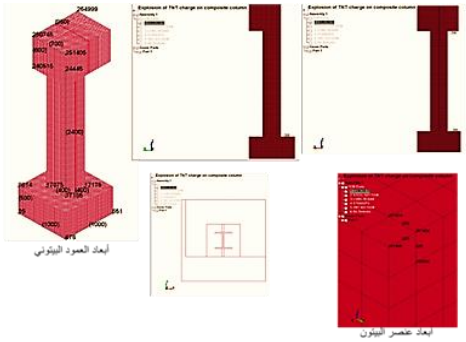
الشكل (9) أبعاد العمود المعدني ومقطعه وعناصره

5.1.6 البيتون:

وهو عِبارة عن المادة الأساسيّة المالِئة للعمود المُختلط، بحيث يُغلِّف العمود المعدني وقضبات التّسليح الطّولي والعَرضي. يَعرُض الجدول (6) خصائص البيتون المُستخدَم، كما يُبيّن الشكل (10) أبعاده وعناصره.

الجدول (6) خصائص البيتون المُستخدم في البرنامج

أبعاد البيتون الكلية	X	Y	Z
الرأس	950 mm	700 mm	600 mm
جسم العمود	400 mm	400 mm	2400 mm
القاعدة	1000 mm	1000 mm	500 mm
أبعاد عنصر البيتون	20 mm	20 mm	20 mm
مركز البيتون	208	247	1100
عدد العناصر:	160100	عدد العقد:	177678
نوع العنصر:	solid	المقاومة الأسطوانية على الضغط بعد ٢٨ يوم	40Mpa



الشكل (10) شكل وأبعاد البيتون وعناصره

5.2 الأوامر البرمجية المُستخدَمة لمُحاكاة العمود في برنامج النَّمذجة LS-DYNA [5]:

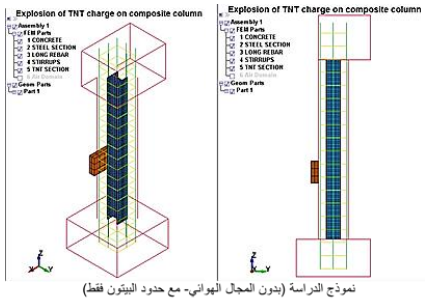
MAT09 (MAT_NULL): تُستخدم لنَمذجة جُزيئات الهواء، مُترافقة مع معادلة الحالة Linear_ Polynomial.

MAT08 (MAT_HIGH_EXPLOSIVE_ BURN): تم استعمالها لنمذجة الشّحنة الانفجارية مُترافقة مع مُعادلة الحالة لمادة الـTNT، وهي مُعادلة JONES-WILKINS-LEE (JWL).

Mat024 (PEICEWISE_ LINEAR_ PLASTICITY) تم استعمالها لنمذجة مادة قضبان التّسليح الطولي والعَرضي.

Mat 098 (Mat_ simplified_ JOHNSON_ COOK): تم استعمالها لنمذجة مادة العمود المعدني.

Mat 159 (MAT_CSCM): تم استعمالها لنمذجة مادة الخرسانة.

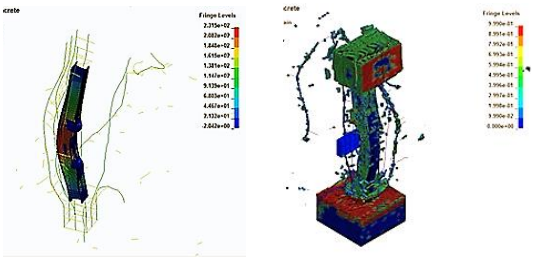


نموذج الدراسة (بدون المجال الهوائي- مع حدود البيتون فقط)

الشكل (11) نموذج الدراسة ومكوناته

6. مُعايرة النَّموذج

بَعد عمليّة تَعريض العمود للحمولة الانفجارية وإجراء التحليل برمجياً، وُجِدَ تأثُّر العمود المُختلط بالانفجار وتَشظّيه وتشوّه العمود المعدني وقضبان التسليح الطولي والعَرضي كما هو موضح بالشكل (12).

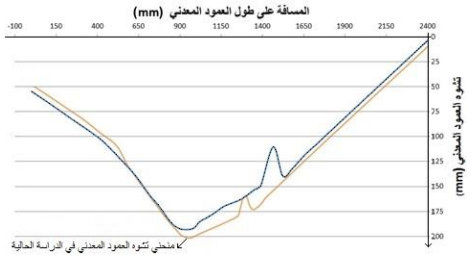


الشكل (12) تأثّر نموذج العمود المُختلط ومكوناته بعد الانفجار

أعطَت النّتائج التحليلية في الدِّراسة المَرجعيّة [8] أن أكبر تشوّه للعمود المعدني كان باتجاه Y (اتجاه تَقدُّم المَوجة الانفجارية نحو العمود) وذلك في الجناح السُفلي وبَلَغَت قيمته 239 mm [8]، بينما في الدّراسة الحاليّة تمّ مُلاحظة أن أكبر تشوّه للعمود المعدني باتجاه Y وفي الجناح السّفلي أيضاً وقد بلغَت قيمته حوالي 233 mm، وهو قريب للتشوّه الأعظمي في الدّراسة المرجعيّة، وبالتالي فالتّقارب بنسبة 97.4%.

وعلى الجناح العُلوي للعمود المعدني كانت النّتائج كما في المُخطط البياني شكل (13)، والذي يُقارِن بين مُنحنيي تشوّه العمود المعدني بين الدّراسة الحاليّة والدّراسة المرجعيّة [8] على طُول مَسافة العمود.

حيث التّشوّه في الدّراسة المرجعيّة على الجناح العُلوي: 190 mm [8]، وفي الدّراسة الحاليّة: 203.6 mm، أما في التّجربة الواقعيّة في دراسة (Wu Li Tsai) [4] (وهي الدّراسةُ التي اعتمدتها دراسة (الخميص)[8] كدراسة مرجعية لها، حيث تمّ تَفجير عمود مُختلط بشكل واقعي): 199 mm، ومنه: نسبة التّقارب مع الدّراسة المرجعيّة (الخميص)[8]: 93.3%، ونسبة التّقارب مع تجربة Wu Li Tsai الواقعيّة[4]: 97.74%.



الشكل (13) مُخطط بياني لمقارنة التشوّه في الجناح العُلوي على طول العمود في نموذج الدراسة الحالية والدراسة المرجعية

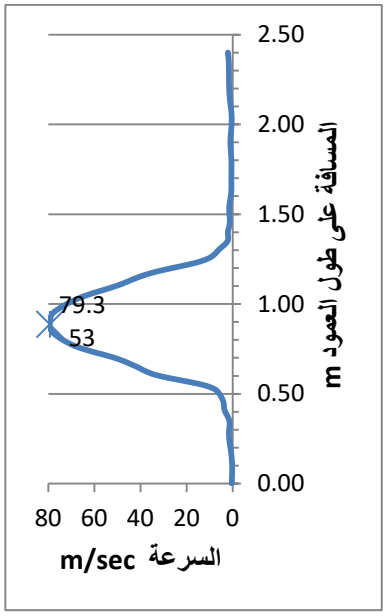
وعليه تَدلُّ النّتائج على مَدى كفاءة برنامج LS-DYNA بتمثيل الحالة الحقيقية للعنصر والحِمل المدروسين، مِمّا يُعطي نتائج دقيقة توفِّر الكلَف العديدة التي تستهلكها التّجارب الواقعيّة، كما تُؤكِّد النّتائج على صَلاحيّة النَّموذج المُستخدَم، لِيَتِمَّ بَعد ذلك القيام بتغيير عدد من خصائص ومُتغيرات النَّموذج والقيام بالتحليلات الخاصَّة واستخلاص النّتائج لكلّ تغيير.

7. استنتاجاتٌ إضافيةٌ

إضافةً لاستنتاجات الباحث في الدّراسة المرجعيّة[8]، يمكن إضافة استنتاجات أُخرى من تحليل النَّموذج الأوَّلي، وهي:

7.1 السُّرعة:

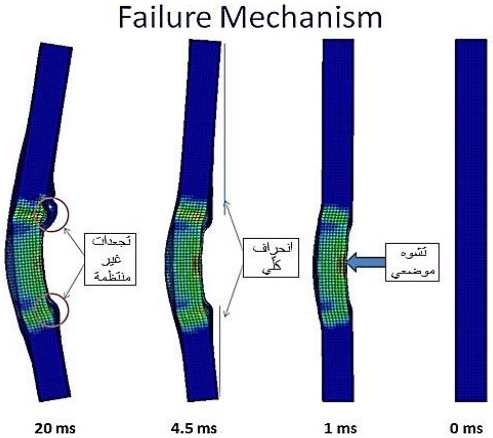
وُجِدَ من المُخطط البياني شكل (14): تَوزُّع السّرعة الأوليّة (في اللّحظة 0.25 ms من تطبيق الحُمولة الانفجارية) على طول العمود المعدني، حيث أنه من الواضح أن مُعظم الطَّاقة المُتفجرة يتم تطبيقها على الجزء الموجود في المَوقع المركزي من العمود تحت الشِّحنة المُتفجرة مُباشرةً، ويَمتد حوالي (400 mm) من كِلا الجانبين، وهذا ما يُؤكد الطّبيعة المَحليّة والتأثيرات المَوضعيّة التي تتطور خلال عمليّة التّفجير القَريب.



الشكل (14) مُخطط بياني لتوزّع السّرعة الأوليّة (في اللحظة 0.25 ms) على طول العمود المعدني

7.2 مَراحل تَطور الضَّرر بالعمود Failure Mechanism

بِمُجرَّد أن يُنتِج التّفجير غازاته وخلال لحظات الانفجار الأولى، يَبدأ تشوّه مَوضعي (مَحلي) فوراً تحت موضع الشّحنة المُتفجرة مُباشرةً، تشوه لدن كبير؛ ثمّ يَبدأ انعِطاف العمود حَول مَركز الشّحنة انعِطافاً كُلّيّاً، مع استمرار التّشوّهات اللّدنة بالزّيادة والانتشار؛ تَظهر انثناءات وتَجعُّدات غير مُنتظمة في بعض مَناطق العمود، كما هو مُوضَّح في الشكل (15).



الشكل (15) مراحل تطور الضّرر بالعمود خلال فترة الانفجار

7.3 تَشكُّل مَفاصل الدّوران اللّدنة

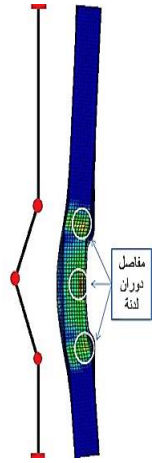
عِند الانفجار يَتعرَّض العمود المعدني لإجهادات وعُزوم انحناء كبيرة، وتَبدأ التَّشوّهات المَرِنة في المَقطع

العَرضي للعمود المعدني الواقع تحت الشّحنة المُنفجرة مُباشرة؛ إنَّ الإجهادات في المَقطع تكون أقلّ من حَدِّ الخُضوع وتَسلك سُلوكاً خَطّيّاً تابعاً لقانون هوك، ومع زيادة الإجهادات حتى تَصل إلى حَدِّ الخُضوع يَبدأ المَقطع بالتّلدُّن، وبالتالي يَدخل العمود بمرحلة اللدونة.

تزداد قيمة التّشوّهات في بعض نقاط العمود فَجأة وتتحوّل إلى تشوّهات لَدِنة نتيجة تَركُّز الإجهادات فيها، عِندها يَتم تَشكُّل المفاصل اللدنة التي تَسمح بدَوَران أجزاء من العمود المعدني؛ يَتشكَّل في البداية المفصل اللدن في العمود تحت مَركز الشّحنة مباشرةً (المفصل الوسطي) كما في الشكل (16).

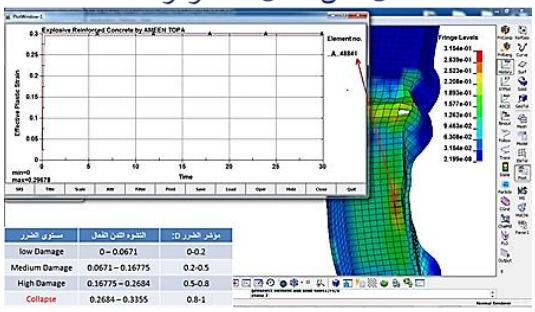
ومع زيادة الحُمولة يَبدأ جُزئَي العمود بالدَّوَران بشكلٍ متعاكسٍ حَول هذا المفصل اللدن.

ونتيجة زيادة الإجهادات في المَنطقتين القَريبتين من أطراف الشّحنة أعلى وأسفل المفصل اللدن، وبسبب تَركُّز الإجهادات فيهما، فإنَّهما تَصِلان إلى مَرحلة اللدونة وبالتالي يَتشكَّل عندهما مفصلين لدنين آخرين. تَطوُّر الانفعال اللدن في مَفاصل الدَّوران وقِيَمه مُوضَّحة بالشكل (17).

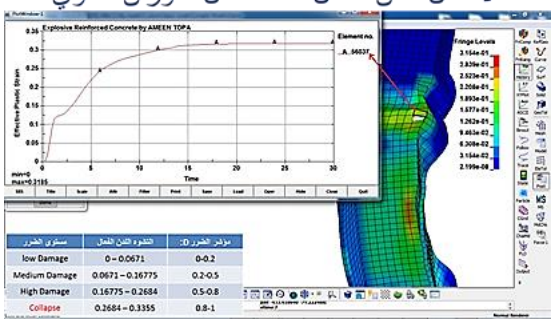


الشكل (16) تشكّل مفاصل الدّوران اللّدنة

الانفعال اللدن الفعال عند مركز الشحنة



الانفعال اللدن الفعال عند مفصل الدوران العلوي



الشكل (17) الانفعال اللدن الفعّال في مفاصل الدوران

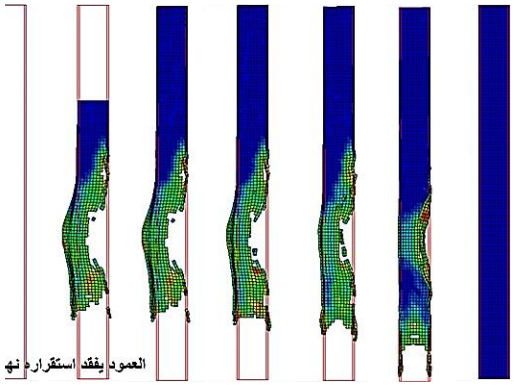
- **وبالتّالي فإنّ التّشوّه في العمود المعدني يكون على مَرحلتين:**

➢ المرحلة الأولى (مَحلي/مَوضعي Local) خلال فترةٍ قصيرةٍ، حيث يَحدُث تشوّه مَحلي في العمود تحت مَوضِع الشّحنة، ويتشوّه العمود تشوهاً لدناً كبيراً.

➢ المرحلة الثانية (شامل– Global) خلال فترة لاحقة، حيث يَحدُث انعطاف كبير في العمود ككل حول مركز الشّحنة.

8. دِراسة المُتغيّرات ونتائجها

تمّ إزالة الغلاف البيتوني وقضبان التّسليح الطّولي والعرضي، والإبقاء على العمود المعدني فقط، وتَعريضِه لِنفس الشّروط والأحمال السّابقة (25 kg TNT)، حيث وُجِدَ **أن العمود المعدني قد تَشظَّى مُباشرةً وتَطاير إلى أجزاءٍ صغيرةٍ وانهار كُلّيّاً**. كما هو مُبيّن بالشكل (18).



الشكل (18) انهيار العمود المعدني غير المحاط بالبيتون المُعرّض لشحنة 25 kg

- نتيجةً لذلك تمَّ القيام بعدد من التغييرات على كُتلة الشّحنة المتفجرة، حيث تم تَخفيضها مرّات عدّة

وإجراء التّحليل، ولم يتم الوصول إلى نتيجةٍ مقاربةٍ للعمود المعدني المُحاط بالبيتون، حيث أنه:

- إمّا أن تكون الشّحنة كبيرة بحيث يحصل تشوّه كُلّي مُقارب للتّشوّه الكُلّي في النّموذج المُحاط بالبيتون، ولكن يَحصل عندها تَشوّه مَوضعي كبير جداً وتتطاير أجزاء كبيرة من العمود المعدني.
- أو تكون الشّحنة صغيرة بحيث يَحصل تشوّه مَوضعي مُقارب للتشوّه المَوضعي الحاصل في العمود المُحاط بالبيتون (أي دُون تَشظٍّ أو تَطايُر أجزاء)، ولكن يكون عندها التشوّه الكُلّي صغيراً وبَعيداً عن قيمة التشوّه الكُلّي في النموذج الأوّلي المُحاط بالبيتون، كما هو مُبيَّن بالجدول (7) أدناه.

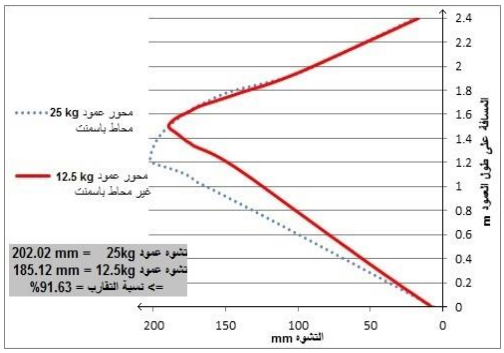
الجدول (7) التشوه المحلي والكلي الحاصل حسب حجم الشحنة

- بالتالي وبَعد إجراء تجاربٍ وتحليلاتٍ عِدَّة بتخفيض كتلة الشّحنة المُتفجرة، تم الوصول إلى النَّتيجتين التاليتين تِبعاً لحالَتَيّ التشوّه الكلّي والمَوضعي:

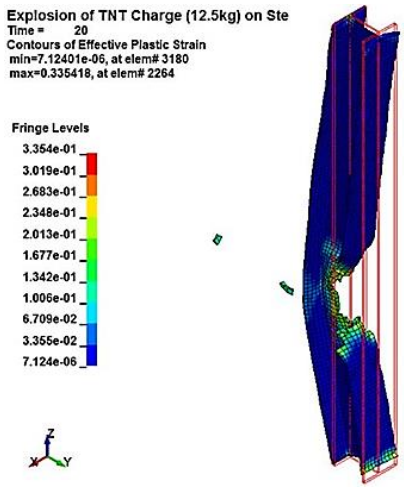
- أقرب كتلة شحنة متفجرة يَحصل عندها تشوّه كلّي مُقارب للتشوّه الكلّي الحاصل في العمود المُحاط بالبيتون هي عند كتلة شحنة 12.5 kg (50% من كتلة شحنة النَّموذج الأوّلي).
- أقرب كتلة شحنة مُتفجّرة يحصل عندها تشوّه مَوضعي مُقارب للتشوّه المَوضعي الحاصل في العمود المُحاط بالبيتون (دُون تُشظٍ أو فُقدان أجزاء من العمود المعدني) هي عِند كتلة شحنة 2.5 kg (10% من كتلة شحنة النَّموذج الأوّلي).

8.1 مُقارنة بين العمود المعدني في حالتَيّ شحنة 25 kg مُحاط بالبيتون – 12.5 kg غير مُحاط بالبيتون:

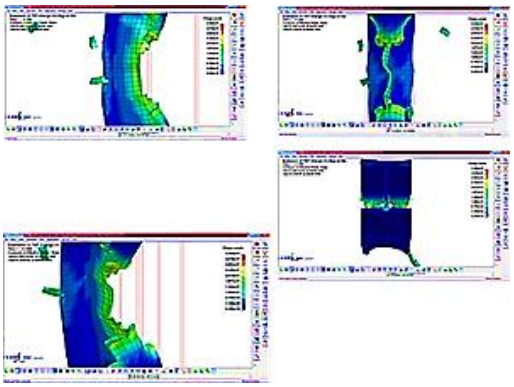
تم مُقارنة العمود المعدني المُحاط بالبيتون عند شحنة 25 kg مع العمود المعدني غير المُحاط بالبيتون عند شحنة 12.5 kg على كامل طول العمودين، وكانت قيَم التّشوهين الكُلّيين الحاصِلين مُتقاربة كما هو مُوضَّح بالمُخطط البياني شكل (19)، لكن التشوّه المَوضعي في العمود المعدني غير المُحاط بالبيتون عند شحنة 12.5 kg كان كبيراً، كما هو مُوضَّح بالشكلين (20–21)، حيث يُلحَظ تشوّه مَوضعي كبير وتطاير أجزاء من العمود.



الشكل (19) مُخطط بياني لمقارنة التشوه على طول العمود عند شحنة 25 kg محاط بالبيتون، و12.5 kg غير محاط بالبيتون



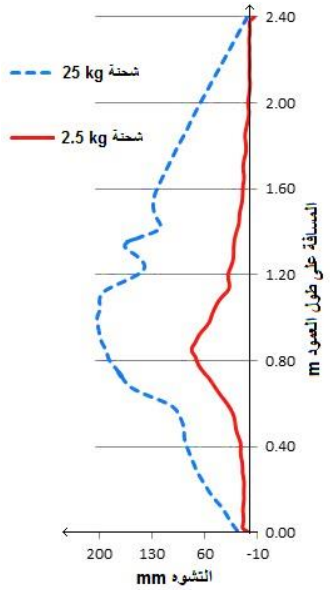
الشكل (20) التشوّه الكلّي للعمود المعرّض لشحنة 12.5 kg غير محاط بالبيتون



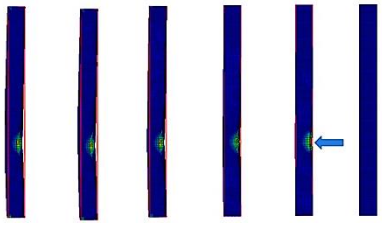
الشكل (21) التشوّه الموضعي للعمود المعرّض لشحنة 12.5 kg غير محاط بالبيتون

8.2 مُقارنة بين العمود المعدني في حالتَيّ 25 kg مُحاط بالبيتون – 2.5 kg غير مُحاط بالبيتون:

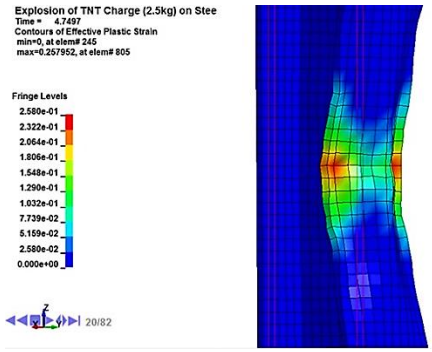
تمَّ مُقارنة العمود المعدني المُحاط بالبيتون عند شحنة 25 kg مع العمود المعدني غير المُحاط بالبيتون عند شحنة 2.5 kg على كامل طول العمودين، حيث نَلحَظ تشوهاً مَوضعياً بَسيطاً دُون تَشظٍ أو فُقدان أجزاء من العمود كما هو مُوضَّح بالشكل (24)، أما قِيَم التّشوهين الكُلّيين الحاصلين في كِلا العمودين فقد كانا مُختلفين كثيراً كما هو مُوضَّح بالمُخطط البياني شكل (22). وتَطوُّر التشوّه الكُلّي في العمود المعدني غير المُحاط بالبيتون عند شحنة 2.5 kg مُوضَّح الشكل (23).



الشكل (22) مُخطط بياني لمقارنة التشوّه على طول العمود عند شحنة 25 kg مُحاط بالبيتون، و2.5 kg غير مُحاط بالبيتون



الشكل(23) تطوُّر التشوّه الكلّي للعمود المعرّض لشحنة 2.5 kg



الشكل (24) التشوّه الموضعي للعمود المعرّض لشحنة 2.5 kg

9. الاستنتاجات والمُناقشة

– مِمَّا سَبق من تحليلات نَستنتج الطَّبيعة المَحليّة والتأثيرات المَوضعيّة التي تتطوَّر خِلال عمليّة التّفجير القَريب، حيث أنّ التشوّه في العمود المعدني يكون على مَرحلتين، الأولى (مَحلي/ مَوضعي Local) خلال فترةٍ قصيرةٍ، حيث يَحدث تشوّه مَحلي في العمود تحتَ مَوضع الشّحنة، ويتشوّه العمود مَوضِعيّاً تشوّهاً لدناً كبيراً؛ والثانية (شامل Global) خِلال فترةٍ لاحقةٍ، حيث يَحدث انعِطاف كبير في العمود كَكُل حول مركز الشحنة.

– إن وجود البيتون مع قضبان التّسليح قَدَّم دعماً كبيراً للعمود المعدني، حيث أن الميّزة الرئيسية للبيتون المُسلّح هي قُدرته على امتصاص جزءٍ من الطّاقة المَنقولة إلى العمود الفولاذي مِمَّا يَحميه ويَمنع حُدوث خَللٍ كبيرٍ فيه وبالتالي فإنّه يَتعرّض لأضرارٍ أقل.

حيث أن البيتون المُسلّح يَبدأ بالتشوّه والخُضوع حتى يَتشظّى وتَتطاير أجزاء كبيرة منه، وبذلك يَمتص

الجزء الأكبر من الحُمولة، وبالتالي يُخفِّض الأضرار الهيكليّة والتشوّهات للعمود المعدني بِنسبةٍ كبيرةٍ جداً.

بالتالي واعتماداً على كُتَل الشّحنات المُتفجرة وُجِد:

- انخفاض الانحناء الكُلّي في العمود المعدني المُحاط بالبيتون إلى 50% مُقارنةً بالعمود المعدني غير المُحاط بالبيتون.
- انخفاض التّشوّه المَوضِعي في العمود المعدني المُحاط بالبيتون إلى 10% مُقارنةً بالعمود المعدني غير المُحاط بالبيتون.

10. المراجع Reference

1. Ngo,T. Mendis,P. Gupta A. & Ramsay, J. (2007). Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview. EJSE International Journal. PP. 76-91. Melbourne: Australia. The University of Melbourne.

2. Stolz, A. Doormaal, A. Haberacker, C. Husken, G. Larcher, M. Saarenheimo, A. et al. (December 2013). Resistance of structures to explosion effects: Review report of testing methods. pp. 78. Luxembourg: Luxembourg. Publications Office of the European Union.

3. Ngo, T, Mohotti, D, Remennikov, A, Uy, B. (9-12 December 2014). *Response and failure mechanism of tubular steel columns subjected to close-range explosions*. 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), vol. II, pp. 1045-1050.Byron Bay, NSW, , Southern Cross University, Lismore, NSW: Australia.

4. Chiang Wu ,K . Li ,B . Chyuan Tsai .K. (2011). The effects of explosive mass ratio on residual compressive capacity of contact blast damaged composite columns, Journal of constructional steel research, 67, PP. 602-612.

5. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). (May 2007). LS-DYNA keyword user's manual Version 971. vol. I & II. pp. 2206.

6. Fujikura, S. Bruneau, M. Lopez, D. (2008). Experimental Investigation of Multihazard Resistant Bridge Piers Having Concrete-Filled Steel Tube under Blast Loading, JOURNAL OF BRIDGE ENGINEERING, 13:6(586), PP. 586-594.

7. Remennikov, Alex, Uy, Brian, Mentus, Igor, (2014). EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF RESPONSE OF STEEL TUBULAR COLUMNS TO CLOSE RANGE EXPLOSIONS, PP. 9. Faculty of Engineering, University of Wollongong. Wollongong: Australia.

8. الخميص، عبادة. (2019)، تقييم انهيار الأعمدة *المُختَلطة المُعَرَّضة لحمل انفجاري وأثر هذه الأحمال على المُقاومة المُتبقية*. ماجستير. الهندسة الإنشائية الزلزالية. المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية. جامعة دمشق. دمشق: سورية. ص:95.

9. جاويش، معتز. (2007). تصميم الآلات /1/. دمشق: سورية. منشورات جامعة دمشق، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية. ص:597.

10. بركات، خالد رشدي. (1998). عناصر الآلات أطلس في التصميم الميكانيكي. دمشق: سورية. ص:506.