قدرة ألياف الكربون على زيادة حمولة انهيار جدار بيتوني مسلح تحت تأثير ضغط جانبي كبير

لبنى أحمد نور د. عباس الحاج عباس د. مصطفى طالب

جامعة إدلب، كلية الهندسة المدنية

https://orcid.org/0009-0005-9003-0792

الملخص:

يهدف هذا البحث إلى دراسة سلوك جدار بيتوني مسلح مدعم بألياف الكربون عند تعرضه لضغط جانبي كبير ناتج عن انفجار. يركز في البداية على إيجاد موجة الضغط الناتجة عن وزن شحنة متفجرة تقدر 250Kg معادل TNT ومن ثم تحليل مقاومة الجدار للأحمال الديناميكية، وتحديد مدى فعالية الألياف الكربونية في تحسين الأداء الهيكلي وتقليل الأضرار الناتجة عن الانفجار.

تمت الدراسة بنماذج عددية عبر طريقة العناصر المحدودة لمحاكاة تأثير موجة الانفجار على الجدار، مع مقارنة النتائج بين الجدران المسلحة التقليدية والجدران المدعمة بالألياف الكربونية.

أظهرت النتائج أن تدعيم الجدران البيتونية بألياف الكربون يحسن مقاومتها للانفجارات، إذ يساهم في تقليل التشققات وزيادة قدرة الجدار على تحمل الأحمال الديناميكية. وبناءً على هذه النتائج، يوصي البحث بالألياف الكربونية كجزء من إستراتيجية تعزيز المنشآت الحرجة المعرضة لخطر الانفجارات، ما يسهم في تحسين الأمان الإنشائي وتقليل الخسائر الناجمة عن الأحمال الشديدة.

الكلمات المفتاحية: الهياكل البيتونية المسلحة– ألياف الكربون –أحمال ديناميك

تاريخ إيداع البحث :2026/01/12
تاريخ قبوله للنشر :2026/02/15

The Ability of Carbon Fibers to Increase the Collapse Load of a Reinforced Concrete Walls under High Lateral Pressure

Lubna Ahmed Nour Dr. Abbas Al-Haj Abbas Dr. Mustafa Taleb

Abstract:

This study aims to investigate the behavior of reinforced concrete walls strengthened with carbon fibers when subjected to high lateral pressure caused by an explosion. The focus initially is on determining the pressure wave generated by a 250 kg TNT-equivalent explosive charge, followed by an analysis of the wall's resistance to dynamic loads and an assessment of the effectiveness of carbon fibers in enhancing structural performance and reducing explosion-induced damage.

The study was conducted using numerical models through the finite element method to simulate the impact of the blast wave on the wall, with results compared between conventional reinforced concrete walls and those reinforced with carbon fibers.

The results showed that reinforcing concrete walls with carbon fibers improves their resistance to explosions by reducing cracking and increasing the wall’s capacity to withstand dynamic loads. Based on these findings, the study recommends the use of carbon fibers as part of a strategy to strengthen critical structures exposed to explosion risks, thereby enhancing structural safety and minimizing losses caused by severe loading conditions.

Keywords: Reinforced concrete structures – Carbon fibers – Dynamic load

المقدمة

تُعَدّ الهياكل البيتونية المسلحة من أكثر الأنظمة الإنشائية استخداماً في المنشآت المدنية والعسكرية نظراً لقدرتها على تحمل الأحمال الرأسية والأفقية. ومع ذلك، فإن تعرض هذه الهياكل للانفجارات أو الأحمال الصدمية يشكل تحديًا هندسيًا كبيرًا، إذ يمكن أن يؤدي إلى أضرار جسيمة تؤثر على استقرارها وسلامتها الإنشائية.

في السنوات الأخيرة، برزت تقنية تعزيز الجدران البيتونية المسلحة بألياف الكربون (CFRP) كأحد الحلول الحديثة لتحسين مقاومة المنشآت للأحمال الديناميكية الشديدة، بما في ذلك الضغوط الجانبية الناتجة عن الانفجارات. تتميز ألياف الكربون بخصائص ميكانيكية متفوقة مثل مقاومة الشد العالية، وخفة الوزن، وقدرتها على تحسين متانة وسلوك العناصر الإنشائية تحت الأحمال المتغيرة.

يركز هذا البحث على دراسة تأثير إضافة ألياف الكربون على الجدران البيتونية المسلحة ذات الارتفاع المحدد، عند تعرضها لضغط جانبي ناتج عن الانفجارات. يتم ذلك من خلال تحليل استجابة هذه الجدران بنماذج عددية، بغية تقييم مدى فعالية ألياف الكربون في تقليل الأضرار وتحسين مقاومة الجدران للقوى الصدمية.

من المتوقع أن تسهم نتائج هذا البحث في تطوير حلول إنشائية أكثر كفاءة لمقاومة الانفجارات، ما يعزز سلامة الأبنية والبنى التحتية في المناطق المعرضة للمخاطر.

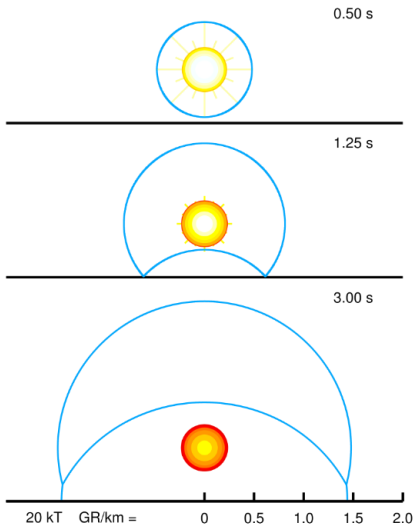
دراسة موجة الضغط:

عندما يحدث انفجار معين تتحرر طاقة كبيرة وذلك حسب قوة الانفجار ونوعه، إذ يحدث الانفجار ثم تتحرر منه قوة الضغط الهائلة الناتجة عن الطاقة المتحررة التي تقوم بتسخين

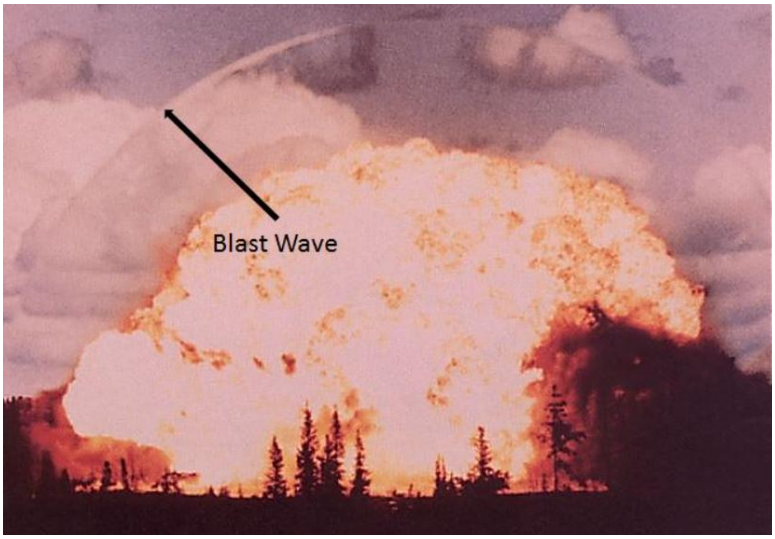
الهواء وتعطيه حرارة هائلة، ومن ثم تنتشر الطاقة الناتجة عن الهواء في الوسط المحيط حسب مكوناته.

الانفجارات تنقل طاقة حركية ميكروسكوبية بطريقة عنيفة في الفضاء المحيط بمكان الانفجار، فالانفجار الذي يحدث على سطح الأرض تنتشر طاقته على شكل موجة تسمى بموجة الصدم.

عندما يحدث الاصطدام بين موجة الانفجار والأشياء المادية الموجودة في الجو تنقل لها هذه الأخيرة جزء كبير من الطاقة الحركية والتي تقوم بتدمير كل شيء تصادفه في طريقها، يوضح الشكل (1) والشكل (2) الانعكاسات لموجة الضغط وانتشارها في الوسط المحيط.



الشكل(1) شكل موجة الضغط المنتشرة



الشكل (2) انتشار موجة الضغط ضمن الهواء

إن درجة الحرارة الهائلة المتولدة عند لحظة الانفجار للرأس المتفجر تقف عائقا أمام إمكانية استخدام نظرية الحالة للغازات لذلك سنلجأ هنا إلى مفهوم طاقة الانفجار.

إذ تقدر الطاقة المتولدة عن انفجار 1Kg من المادة المتفجرة بما يعادل 2.8 ميغاجول وقيمة الطاقة تلك تختلف حسب طبيعة المادة المتفجرة وتركيبها ، التقدير الكيميائي الفعلي يتراوح بين 2.8-2.175 ميغاجول بعض المراجع العلمية تشير إلى أن الطاقة الفعلية المتحررة من التفاعل الكيميائي لانفجار 1 كغ من TNT تبلغ حوالي 2.175 ميغاجول. هذا التقدير يعتمد على الحسابات الكيميائية الدقيقة للتفاعل ، بعض المراجع تعطي قيمة قياسية قد تصل إلى 4.184 ميغاجول، وبافتراض وزن مادة متفجرة تعادل 250kg بالتالي ستتولد نتيجة الانفجار طاقة انفجارية تساوي:

$$2.8 \times 250 = 700 \times 10^6 J$$

ونلاحظ عند دراسة العلاقة ما بين ضغط الغاز وحجمه أن التغير الذي يربط بين بداية مرحلة الانفجار وصولا الى نهايته ومع تناقص درجة الحرارة وصولا للدرجة الطبيعية هو التغير الأديباتي، يوضح الشكل(3) آلية التغير الأديباتي

الشكل(3) العلاقة بين الضغط والحجم في التغير الأديباتي

وبالتالي تكون طاقة الانفجار من علاقة بويل–ماريوت

$$P_1.V_1^{\gamma} = P_2.V_2^{\gamma} = \cdots = W$$

أما الأس γ فيمثل النسبة ما بين الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت إلى الحرارة النوعية تحت حجم ثابت .

تعتمد الحرارة النوعية للغاز على ظروفه ونفرق بين الحرارة النوعية للغاز عند ثبات ضغطه ونرمز له بالرمز C_p والحرارة النوعية للغاز عند ثبات حجمه C_v وبصورة عامة $C_p > C_v$

ويرجع سبب ذلك إلى أنه عند ثبات الحجم لا ينجز عمل أثناء رفع درجة الحرارة أي أن كمية الحرارة المكتسبة من المادة تعمل بكاملها عند رفع درجة حرارته أما عند ثبات ضغط

الغاز فإن جزءا من الحرارة التي يكتسبها الغاز تؤدي إلى زيادة حجمه ومن ثم فإن أداء شغل والجزء الباقي من الحرارة المكتسبة تعمل على رفع درجة حرارة الغاز، وهناك علاقة تقريبية تربط بين الثابتين:

$$C_p = C_v + R_s$$

إذ R_s ثابت الغازات النوعي

$$R_s = \frac{R}{M}$$

إذ R ثابت الغازات العام $R = 8.314472\ \frac{J}{K.m}$ ، M الكتلة المولية للغاز

وينطبق أيضا التقريب على الحرارة النوعية عند ثبات الحجم

$$C_v = f.\frac{R_S}{2}$$

$f \geq 3$ عدد درجات الحرية لجزيء الغاز وهي تعتمد على نوع الغاز (هل جسيمات ذلك الغاز ذرات منفردة أم غاز ثنائي الذرات أو ....)

ليكن معامل ثبات الانتروبية (كابا) K فيكون:

$$C_p = R_s.\frac{\mathrm{K}}{\mathrm{K}-1} \qquad \mathrm{K} = \frac{f+2}{f}$$

يعد الهواء الوسيط المدروس يمثل الجدول(1) الخصائص الفيزيائية للهواء:

الجدول(1): الخواص الفيزيائية للهواء

الغاز	الكتلة المولية Kg/mol	درجة الحرارة C°	الحرارة النوعية J/Kg.k	$\frac{1}{\gamma-1}$
الهواء	29×10^{-3}	0-100	710	2.48

$$R_s =.\frac{8.314172}{29\times10^{-3}} = 286.706\ \frac{J}{Kg.K}$$

إذ وحسب المصادر العلمية يمكن اعتماد القيمة $287\ \frac{J}{Kg.K}$

$$C_p = 710 + 286.706 = 996.706\frac{J}{Kg.K}$$

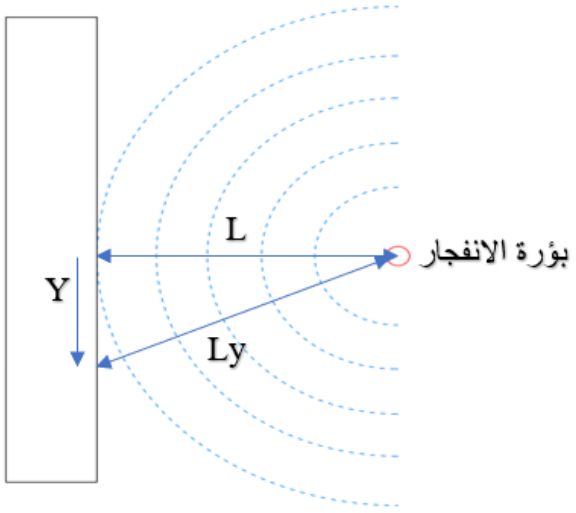
$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{996.706}{710} = 1.4038$$

بالعودة إلى علاقة بويل–ماريوت تصبح العلاقة بين الضغط والحجم كالآتي:

$$P.V^{1.4038} = 700\times10^6$$

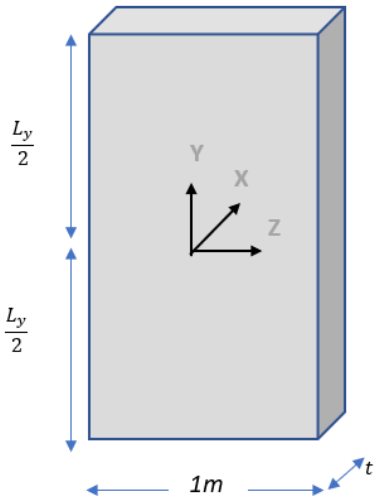
وبعدّ الموجة الإيجابية فقط للانفجار وبإهمال تأثير الارتدادات، وبافتراض الوسط الذي تنتشر فيه الموجة على شكل نصف كرة كما هو موضح بالشكل(4)

$$P.\left(\frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{2}\right)^{1.4038} = 700\times10^6\ \ N.m$$



الشكل(4)انتشار موجة الضغط

بافتراض مبدأ الإحداثيات الموضح بالشكل(5) والذي من خلاله يمكن إيجاد العلاقة التي تربط بين النقطة على الجدار وقيمة الضغط عندها.



الشكل (5) الشريحة المدروسة للجدار المعرض للضغط

كما ذكرنا سابقا لو افترضنا أن L يمثل البعد الآمن (البعد العمودي من البؤرة إلى الجدار) و L_0 يمثل الطول المائل والعلاقة التي تربط بين البعدين:

$$L_0^2 = L^2 + (Y^2 + Z^2) \rightarrow L_0 = \sqrt{L^2 + (Y^2 + Z^2)}$$

$$P.\left(\frac{4}{6}.\pi.(L^2 + (Y^2 + Z^2))^{\frac{3}{2}}\right)^{1.4038} = 700 \times 10^6$$

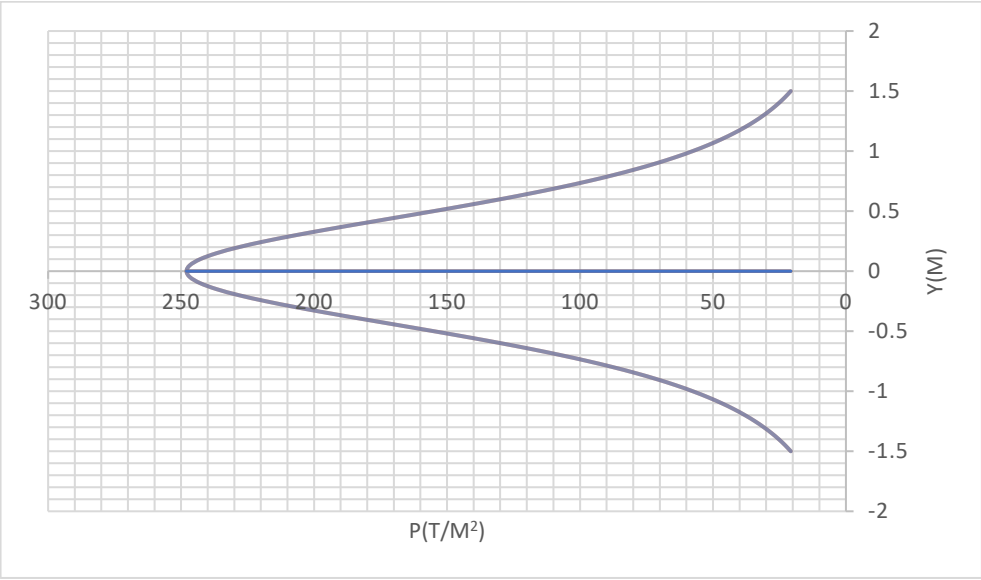
$$P = \frac{247968182.125}{(L^2 + Y^2 + Z^2)^{2.1057}}$$

سنفترض وجود جدار حامي بارتفاع 3m

والجدول(2) يوضح توزع الضغط عل الشريحة المترية من الجدار.

الجدول (2): قيم الضغط في منتصف وأطراف الجدار

P(N/m)	Z	Y	P(N/m)	Z	Y	L
105584604	0.5	1.5	247968182	0	0	1m
10445431			13385612			2m
2165725			2426876			3m
677236			722571			4m
270797			282328			5m
127255			131006			6m
66999			68446			7m
38371			39005			8m



المنحني(1) تغير الضغط على طول الجدار من أجل بعد لبؤرة الانفجار 1m

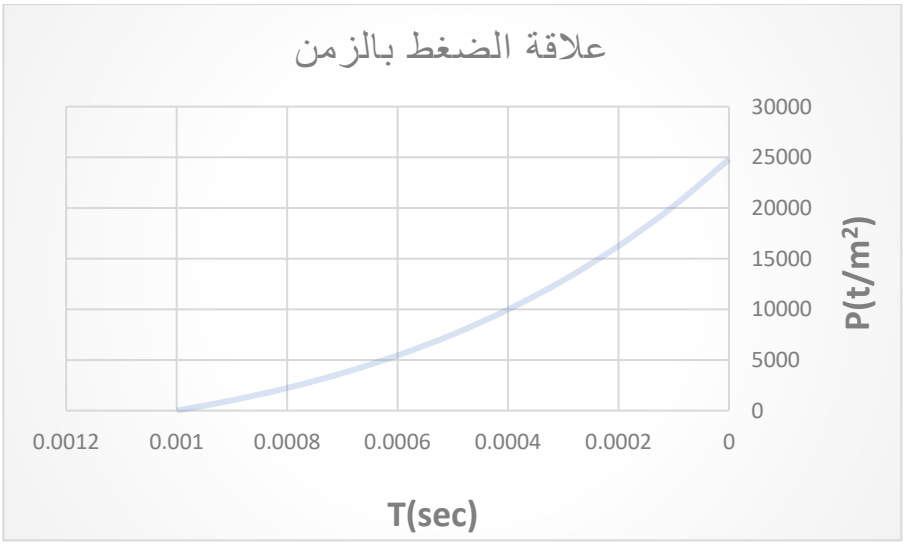
يوضح المنحني(1) تغير الضغط على ارتفاع الجدار بافتراض أن الانفجار حدث في منتصف الجدار وذلك من أجل بعد لبؤرة الانفجار وحسب الدراسات السابقة فإن معادلة فلانلاندر التي تربط تغير الضغط مع الزمن تعطى بالشكل:

$$P(t) = P_s . e^{-\frac{t}{t^*}} . (1 - \frac{t}{t^*})$$

P_s. تمثل الضغط الأعظمي للطور الموجب

t* الزمن الذي يقطع فيه المخطط محور الزمن بنهاية الطور الموجب للضغط باعتماد 10-3sec

لو رسمنا العلاقة بين الزمن والضغط عند البعد السابق نفسه:



المنحني(2) تغير الضغط مع الزمن من أجل بعد لبؤرة الانفجار 1m

دراسة المسافة الآمنة :

باعتماد برنامج ANSYS تم تطبيق الضغط على بعد من البؤرة (5-10m) على جدران بسماكات تبدأ من السماكة الدنيا الحسابية 0.3m بتدرج 10cm حتى 1m، وبفرض أن ارتفاع الجدار 3m وموثوق من الطرفين .

التقوية بالألياف الكربونية

تعدّ الجوائز البيتونية المسلحة المستمرة من العناصر الانشائية الهامة في الأبنية، والتي يمكن أن تحتاج إلى تقوية لأغراض عدة نتيجة التشققات أو الحاجة إلى زيادة الأحمال الإستثمارية.

كما تعدّ تقوية العناصر الإنشائية المختلفة باستعمال البوليمرات المسلحة بالألياف (FRP) من وسائل التقوية الحديثة والتي لاقت انتشاراً واسعاً في الآونة الأخيرة.

تتألف البوليمرات المسلحة بالألياف من ألياف (Fiber) التي تؤمن المقاومة العالية، ومن مادة رابطة (Matrix) تربط الألياف مع بعضها، وتؤمن نقل الحمولة بين الألياف إضافة إلى حمايتها من المؤثرات البيئية .

تختلف خصائص مادة الـ FRP باختلاف نوع الألياف المستعملة، وتعد الألياف الكربونية والزجاجية والأراميدية الأكثر شيوعاً.

والجدول(3) يوضح بعض الخواص الميكانيكية للأنواع الشائعة من الألياف المستخدمة في عمليات تقوية المنشآت.

الجدول(3):خصائص الأنواع المختلفة للألياف المستخدمة في أعمال التقوية

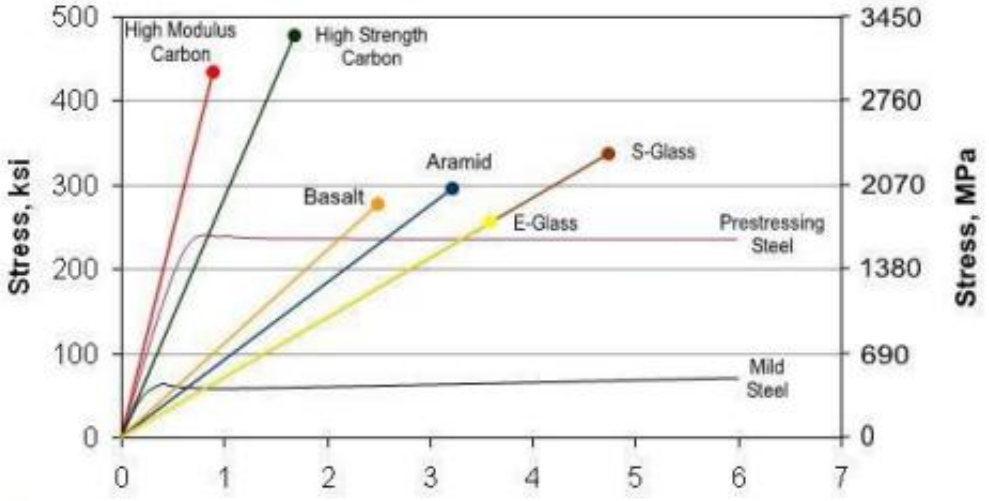
Fibre	اجهاد الشد الحدي (MPa)	معامل المرونة (GPa)	التشوه النسبي الحدي عند الانقطاع (%)	الكثافة (t/m3)	معامل التمدد الحراري ($10^{-6}/C$)
Carbon: High strength	4300-4900	230-240	1.9-2.1	1.8	-0.38
Carbon: High modulus	2740-5490	294-329	0.7-1.9	1.78-1.81	-0.83
Carbon: Ultra high modulus	2600-4020	540-640	0.4-0.8	1.91-2.12	-1.1
Aramid: High strength and high modulus	3200-3600	124-130	2.4	1.44	2.1
Glass	2400-3500	70-85	3.5-4.7	2.6	4.9

و المنحنيات (3) توضح العلاقة بين الإجهاد و التشوه للأنواع الشائعة من الـ FRP مع مقارنتها بالفولاذ.

إذ يمكن ملاحظة المقاومة العالية لمادة الـ FRP والسلوك الخطي المرن حتى الانهيار مع عدم وجود حد الخضوع الذي يتميز به فولاذ التسليح.

يعتبر الإيبوكسي(Epoxy) من المواد الراتنجية(Resins) الأكثر استعمالاً كمادة رابطة بين الألياف بسبب القيم العالية التي يتصف بها إجهاد الشد والتشوه الحدي، كما يتميز بالقدرة العالية على الالتصاق ومقاومة العوامل البيئية والمؤثرات الكيميائية المختلفة.

ويمكن اعتبار ضعف مقاومة الحريق من مساوئ استخدام مركبات FRP في عمليات التقوية، وذلك بسبب فقدان المادة الرابطة أو (Matrix)القدرة على التماسك عند تعرضها لدرجات حرارة معينة.



منحني(3) الإجهاد–التشوه للأنواع الشائعة من الـFRP

كما يبين الجدول(4) خصائص بعض المواد الرابطة المستعملة في مركبات الـFRP

الجدول (4): الخصائص الميكانيكية لبعض أنواع المواد الرابطة

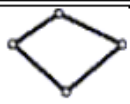
Resin	اجهاد الشد الحدي (MPa)	معامل المرونة (GPa)	التشوه النسبي الحدي عند الانقطاع (%)	الكثافة (t/m3)	معامل التمدد الحراري (10^{-6}/C)
Epoxy	60-85	2.6-3.8	1.5-8	1.11-1.2	30-70
Polyester	50-75	3.1-4.6	1-2.5	1.11-1.25	30-70
Phenolic	60-80	3-4	1-1.8	1-1.25	80
Polyurethane	15-25	0.5	10	1.15-1.2	40

النمذجة العددية:

توصيف العناصر المستعملة في البرنامج

العناصر المستخدمة في عملية البرمجة باستخدام برنامج ANSYS هي البيتون وحديد التسليح الطولي والعرضي وشرائح الـCFRP و الجدول(5) يوضح العناصر المختارة في البرنامج.

الجدول (5) :العناصر المستخدمة في البرنامج

نمذجة البيتون		8 عقد Reinforced Concrete Structural Solid DOF: UX, UY, UZ	**SOLID65**	
نمذجة حديد التسليح		2 عقدة Structural Beam DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	**BEAM188**	
نمذجة شرائح الـCFRP		4 عقد Structural Shell DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	**SHELL181**	

أما شرائح التقوية الـ CFRP فقد تم إدخال الخصائص الميكانيكية لها والمبينة في الجدول(6):

الجدول (6): الخواص الميكانيكية للبولميرات المسلحة بالألياف

الخواص الميكانيكية للبولميرات المسلحة بالألياف الكربونية المستخدمة في التقوية			
معامل المرونة MPa	معامل المرونة باتجاه الألياف		Ex=230000
	معامل المرونة بالاتجاه العمودي على الألياف		Ey=17807
			Ez=17807
معامل القص MPa	Gxy=12052	نسبة بواسون	0.2
	Gxz=12052		0.2
	Gyz=6850		0.3

تحليل المنشأ:

يتم باستعمال التحليل الانتقالي الديناميكي Transient Analysis لتحديد استجابة المنشأ تجاه الحمولة المتغيرة والتي يتم إدخالها من خلال تابع function كحمولة متغيرة مع الموقع والزمن.

سندرس حالات عدّة:

1. تغير السماكة مع ثبات نسبة التسليح والتوزع المتشابه للتسليح (عدد القضبان والتباعد):

إن المسافة الآمنة هي المسافة التي تفصل الجدار عن بؤرة الانفجار بحيث لا يحدث الانهيار للجدار.

باعتماد التوزع المنتظم ومع نسب تسليح طولية أعظمية بنسبة تسليح تقريبا 0.02 لكل سماكة للجدار وتسليح عرضي ثلث الطولي (الرئيسي) سنحصل على شبكتين لكل جدار بحسب الجدول

الجدول (7): التسليح المعتمد للجدران لحالة شبكتين

سماكة الجدار (cm)	الطولي الأعظمي	العرضي الأعظمي
30	11T20	9T14
40	11T22	9T16
50	11T24	9T16
60	11T26	9T18
70	11T30	9T20
80	11T32	9T20
90	11T34	9T22
100	11T36	9T24

وباعتبار ارتفاع الجدار 3m وشريحة مترية بالاتجاه Z بوثق الجدار من الأعلى والأسفل واعتماد نموذج تسليح متشابه للحالات كافة

سندرس حالتا تأثير الحمولة الفعلية للانفجار والحمولة الأعظمية له كحمولة موزعة على كامل الجدار.

2. ثبات السماكة مع ثبات نسبة التسليح وتغير التوزع من ناحية كثافة القضبان والأقطار:

على افتراض اعتماد السماكة 50cm وبعدّ التسليح المعتمد $50cm^2$ نُمذجة شبكتان تسليح مع توزع 11T24 9T28 و 7T30 مع ملاحظة عدم زيادة المسافة بين القضبان عن 20cm

على افتراض اعتماد سماكة 60cm وبعدّ التسليح المعتمد $60cm^2$ نُمذجة شبكتان تسليح مع توزع 11T26 9T30 و 7T34 مع ملاحظة عدم زيادة المسافة بين القضبان عن 20cm موضح في الجدول(8)

الجدول (8): التسليح المعتمد للجدران لحالة ثلاث شبكات

سماكة الجدار t(cm)	الطولي الأعظمي	العرضي الأعظمي
40		
50		
60	11T18	9T12
70	11T24	9T16
80	11T25	9T16
90	11T28	9T18
100	11T28	9T18

3. ثبات السماكة مع توزع ثابت ونسبة تسليح ثابتة وتغير في تموضع ألياف الكربون:

وباعتماد نفس نسب التسليح وتوزعه للحالات السابقة تم إعادة نمذجة الجدار نفسه لحالتين لتوزع الألياف:

3-1. وجود الألياف على طرفي الجدار الخارجيين.

3-2. وجود الألياف وسط الجدار

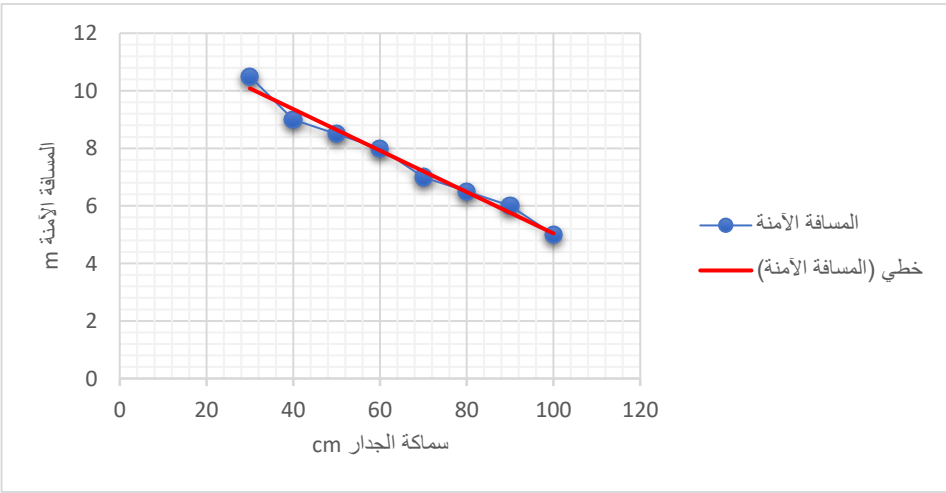
تحليل وتفسير النتائج:

1. يوضح الجدول(9) البعد الأصغري عن بؤرة الانفجار الذي لا ينهار الجدار عنده، وهنا لابد من توضيح نقطة أساسية وهي أن هذه المسافات تجريبية غُيرت الحمولة المطبقة الموافقة للمسافة وتغييرها كل 0.5m، وهذا ما يفسر حصولنا على توزيع شبه خطي للمسافة الآمنة مع السماكة وهو مصمم من أجل حمولة فعلية على شكل منحني الشدة العظمى له عند الوسط كونها تعطي أخطر حالة انهيار على الانعطاف.

الجدول (9): المسافة الآمنة لكل سماكة

السماكة(cm)	30	40	50	60	70	80	90	100
المسافة الآمنة(m)	10.5	9	8.5	8	7	6.5	6	5

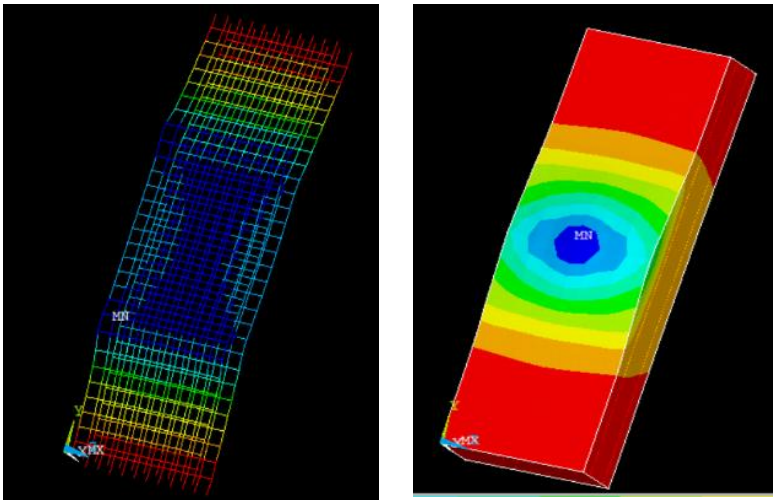
و المنحني(3) يوضح ذلك:



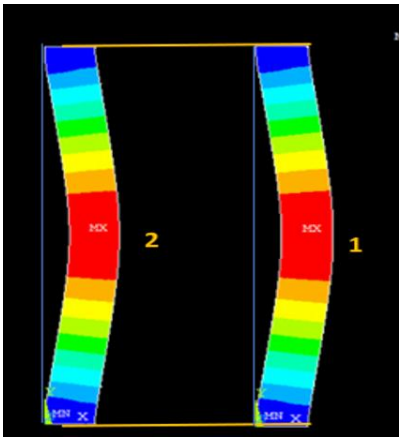
المنحني(4) العلاقة بين سماكة الجدار بـ سم مع البعد الآمن عن بؤرة الانفجار

وهنا لا بد من توضيح فكرة أساسية وهي أنه كما ذكرنا سابقا بأنه لا يمكن التنبؤ بمكان حدوث الانفجار لذلك نُمذجت حالة الحمولة الأعظمية على كامل الجدار بنفس الشدة ومن ثم الحالة الأخطر، وهي حدوث القيمة القصوى في المنتصف ومقارنة النتائج إذ وجد أنه هناك فرق في طريقة الانهيار حيث يحصل الانهيار في الحمولة الفعلية بشكل موضعي أكثر، في الشكل(6) توضيح لشكل التشوه عند حدوث الانفجار على مستوى خط الوسط للجدار حيث يتضح من خلال الخطوط الكونتورية التشوه الموضعي.

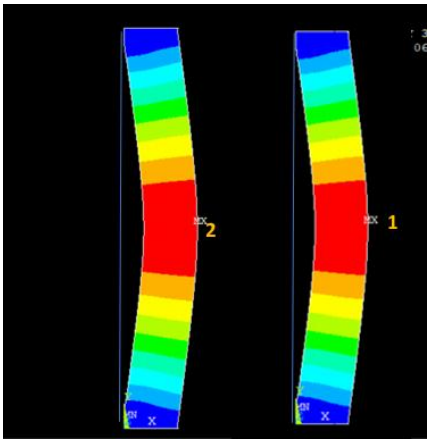
:



الشكل(6) توزع فعلي للحمولة الناتجة عن الانفجار



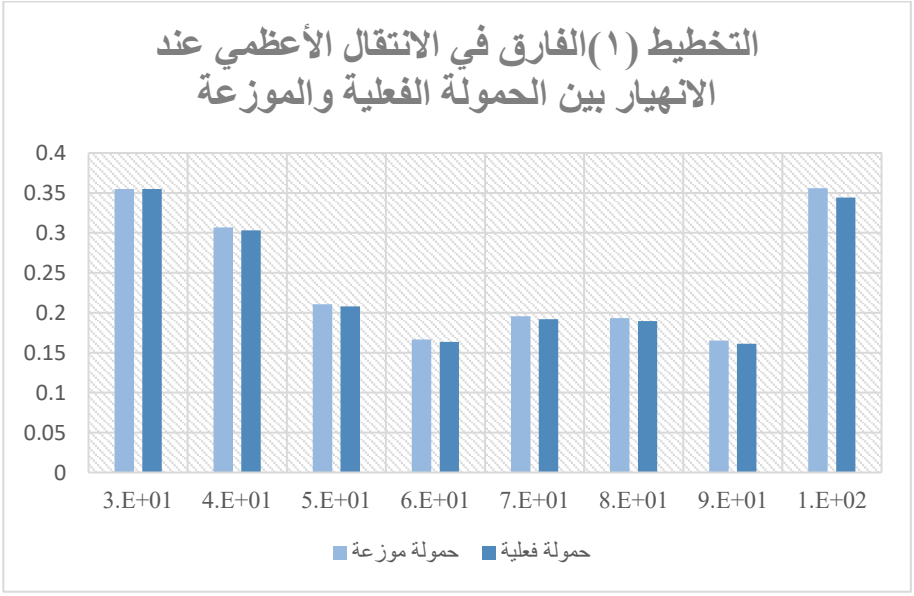
الشكل(7)جدارين معرضين لنمطي التحميل للسماكات تحت 50cm



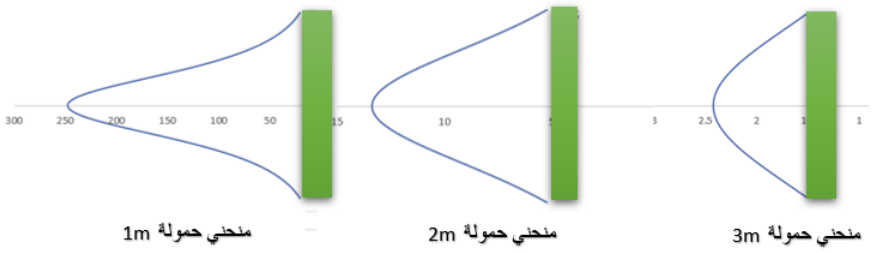
الشكل (8) جدارين معرضين لنمطي التحميل للسماكات أعلى 50cm

في الشكل 1 (للحمولة الموزعة) يكون توزع التشوه أكثر انتظاما أما في الشكل 2 (الحمولة الفعلية) التشوه في الوسط يكون أكثر حدة في منحني التشوه وذلك منطقي كون القيمة العظمى للضغط في المنتصف

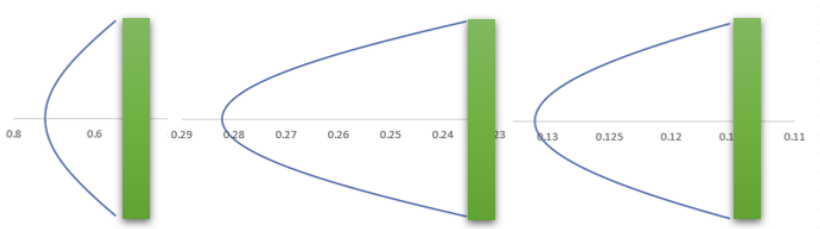
وهنا نلاحظ أنه من أجل السماكات تحت 50cm يحدث انهيار موضعي وتعطي الحمولة الفعلية انتقالات في الوسط أكبر بقليل من الموزعة أما بالنسبة للسماكات الأكبر وبنتيجة الآلية المختلفة في نقل الأحمال نتيجة السماكة ستعطي الحمولة الموزعة قيما أكبر من الفعلية وينخفض تأثير الانهيار الموضعي للحمولة الفعلية وهو موضح في التخطيط(1)



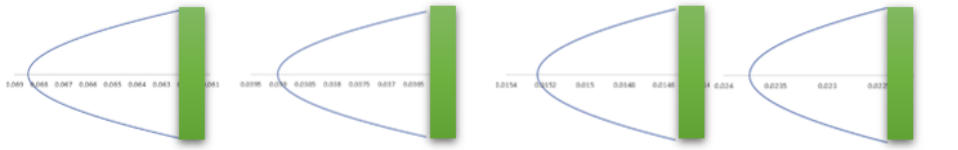
وهنا أيضا لا بد من لحظ تغير منحني الحمولة على ارتفاع الجدار الذي أيضا يؤثر على النتائج



منحني حمولة 1m منحني حمولة 2m منحني حمولة 3m



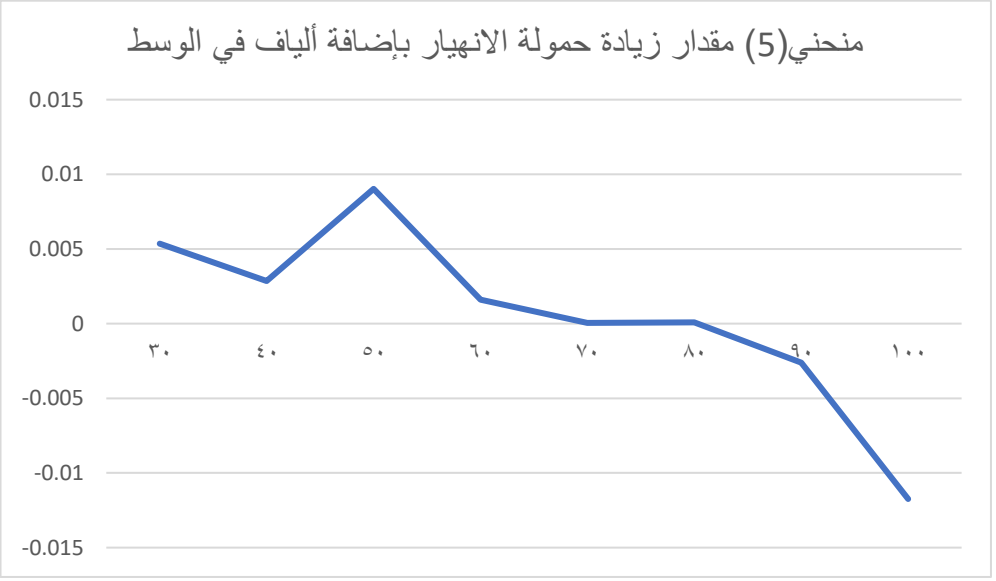
منحني حمولة 4m منحني حمولة 5m منحني حمولة 6m



منحني حمولة 7 منحني حمولة 8 منحني حمولة 9 منحني حمولة 10

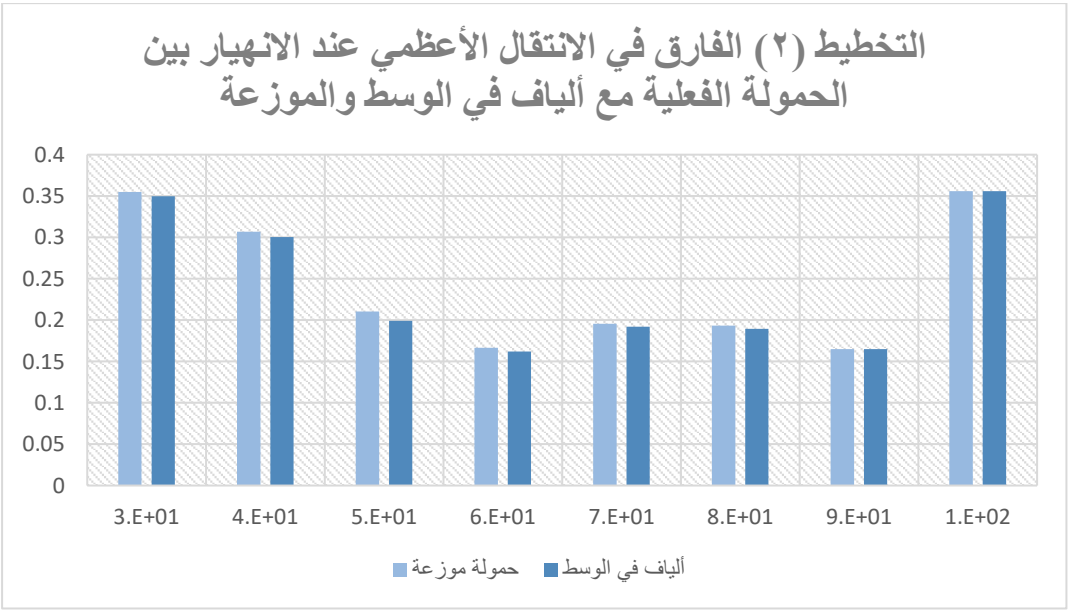
2. بالعودة للمنحني(5) إن إضافة ألياف الكربون في وسط الجدار تزيد من حمولة الانهيار بمقدار لا يتجاوز 5% وذلك بالنسبة للسماكات الصغيرة نسبيا أما عندما تزيد السماكة عن 60cm نلاحظ انخفاض كبير في تلك الزيادة حتى يتلاشى ولدى الرجوع إلى التشوه تبين أنه عند السماكات الكبيرة للبيتون تبين حدوث إعادة توزيع القوى وبدأت القيم تقترب من التوزع المنتظم وهذا منطقي لأنه من المتعارف عليه أن مكان الذروة ومع السماكة الكبيرة للبيتون تتوزع الحمولات بزاوية 45 ومن ثمّ

ومع الوصول إلى موقع الألياف يقترب التوزيع من المنتظم لتعيد الألياف هذا التوزيع من جديد فتقترب القيم بشكل أكبر من الحمولة الموزعة بانتظام والمنحني الآتي يوضح تغير مقدار الزيادة الذي تسببه وضع ألياف الكربون في الوسط وذلك بالنسبة للحمولة الفعلية للانفجار والتي لوحظ أنها في السماكات القليلة تحدث انهيارا موضعيا في الجدار تمنعه وضع ألياف الكربون في منتصف الجدار

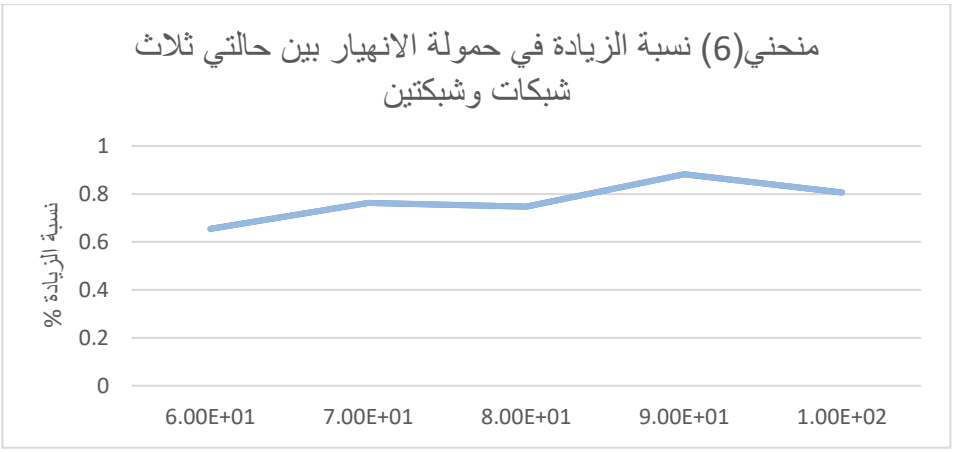


وهنا نلاحظ عند السماكة 50cm يرتفع الفارق بين القيمتين بإضافة ألياف وبدونها وذلك لأن السماكة تلك تعدّ الحد الفاصل بين الكبير و المتوسط كما أن منحني شدة الحمولة أكثر حدة إذ في السماكات المتوسطة سيغلب الانهيار الجزئي لأن السماكة قليلة مقارنة مع شدة موجة الضغط لينتظم التخفيض عند السماكة 50cm وينخفض مع السماكات العليا لأن الألياف تقوم هنا بتوجيه الحمولات نحو الأطراف وهي من خصائص الألياف ليتلاشى التخفيض ويصبح إضافة الألياف يعيد توزيع الأحمال ويعطينا حالة مشابهة للحمولة الموزعة بانتظام

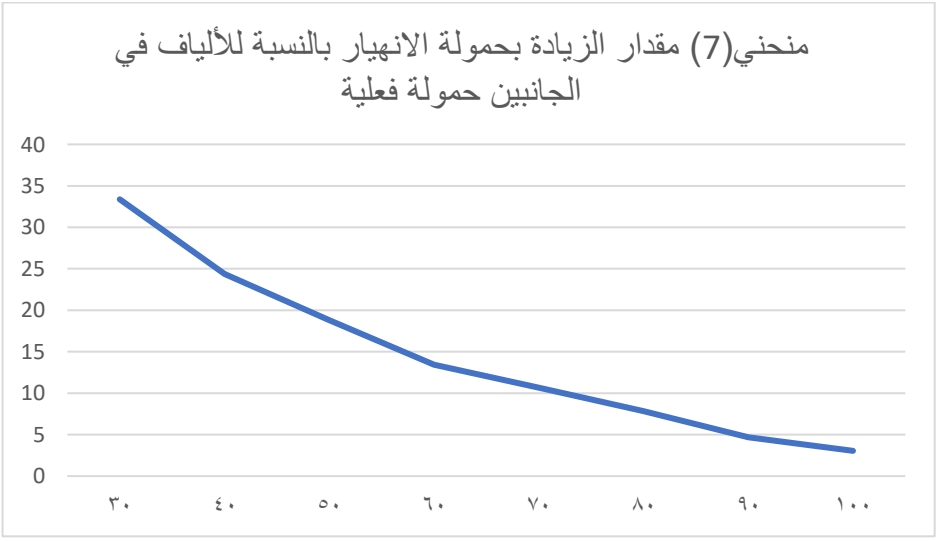
و التخطيط(2) يوضح اقتراب النتائج بين الحمولة الموزعة والحمولة الفعلية عند إضافة ألياف الكربون في وسط الجدار وذلك للسماكات الكبيرة



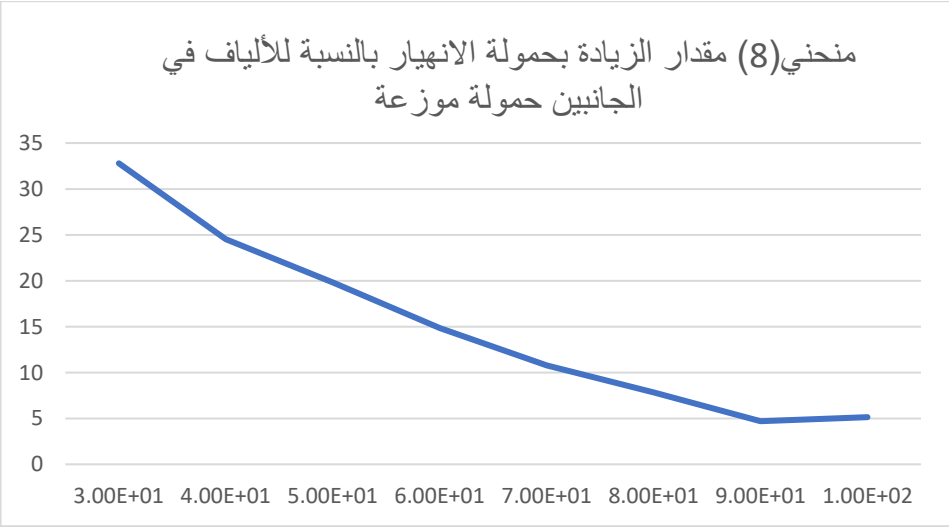
3. بالعودة إلى المنحني(6) دراسة تأثير وجود ثلاث شبكات تسليح: إن توزيع نسبة التسليح على ثلاث شبكات كان له تأثير سلبي على النتائج وبدأ الانتقال بالزيادة ويحدث الانهيار بحمولة أقل من حالة شبكتين تسليح من الطرفين وهذا منطقي كون التسليح الثنائي يوزع نسبة التسليح المفروضة على طرفي الجدار ويزداد معه البعد بين التسليحين أما في حالة ثلاث طبقات ونتيجة كون الانعطاف حاكم ستكون نسبة التسليح موزعة على ثلاثة طبقات و بالتالي تنخفض قيمة ذراع الرافعة و المنحني التالي يوضح نسبة النقصان في حمولة الانهيار للسماكات المختلفة



4. أن إضافة ألياف الكربون على جانبي الجدار يزيد من قيمة حمولة الانهيار بنسب تتفاوت حسب سماكة الجدار والمنحني(7) يوضح ذلك، حيث نلاحظ أن فاعلية الألياف تزداد بنقصان سماكة الجدار لأن الألياف شديدة المرونة وينخفض عملها مع زيادة السماكة وبالتالي الصلابة، كما أن القيمة الأعظمية للزيادة تكون في حالة الحمولة المنتظمة أكثر منها في أنواع الحمولات الأخرى (على سبيل المثال الحمولة الفعلية لموجة الضغط)، و المنحنيات التالية توضح ذلك:



إذ وصلت القيمة الأعظمية إلى 33.37% للسماكة 30cm للجدار والقيمة الأصغرية إلى 3.05% بالنسبة للجدار ذو السماكة 100cm ، أما في حال كون الحمولة منتظمة ستعطي نسب زيادة أعلى بقليل موضح بالمنحني(8).



المراجع:

1. Seidl, H., 2014, *Explosive Effects and Shock Wave Phenomena*, Springer, Berlin, 320.
2. Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J., Strehlow, R.A., 1983, *Explosion Hazards and Evaluation*, Elsevier, New York, 550.
3. Zukas, J.A., 2004, *High Explosive Interaction and Effects*, Wiley, New York, 480.
4. Jones, N., 2006, *Structural Impact and Blast Effects on Buildings*, McGraw-Hill, London, 410.
5. ANSYS Inc., 2022, *ANSYS Mechanical User Guide: Theory Reference*, Canonsburg, PA, 780.
6. Mallick, P.K., 2007, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3rd Ed., CRC Press, Boca Raton, 600.
7. Hollaway, L.C., 2010, *Polymers for Reinforced Concrete Strengthening*, Woodhead Publishing, Cambridge, 520.
8. TNT Handbook, 2002, *Properties and Energy of TNT Explosives*, Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, 215.
9. Pugh, E., 2011, *Blast-Resistant Buildings: Design and Analysis*, ASCE Press, Reston, 450