

## مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة لاحقة الشد باستخدام شرائح البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP) على الانعطاف

رزان نادر عبده\*<sup>1</sup> منير عارف الأطرش<sup>2</sup>

<sup>1</sup> طالبة ماجستير، جامعة دمشق، كلية الهندسة المدنية، قسم الهندسة الإنشائية،  
([razan.abdo@damascusuniversity.edu.sy](mailto:razan.abdo@damascusuniversity.edu.sy))

<sup>2</sup> أستاذ مساعد، جامعة دمشق، كلية الهندسة المدنية، قسم الهندسة الإنشائية، بيتون مسلح،  
([munir58.alatrash@damascusuniversity.edu.sy](mailto:munir58.alatrash@damascusuniversity.edu.sy))

### الملخص:

تزايد استخدام المنشآت البيتونية المسلحة مسبقة الإجهاد في الصناعات الإنشائية، وتتنوع تطبيقاتها في الجسور والأبنية التجارية والسكنية العالية، إلى حيث تظهر الجوائز ميزات معقدة بأحمال ثقيلة، وتتميز المنشآت البيتونية مسبقة الإجهاد بالعديد من المزايا، مثل تقليل التشققات، توفير المواد، التقليل من السهم.

أجريت في هذا البحث دراسة تحليلية عن طريق استخدام طريقة العناصر المحدودة والتحليل اللاخطي باستخدام برنامج (Abaqus-2021) الذي يأخذ بعين الاعتبار لاختطية المادة لجوائز بيتونية مسلحة لاحقة الشد غير ملتصقة، ومقواة بشرائح البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية (CFRP) على الانعطاف، اختبرت تجريبياً من قبل (Q.T.P.TRUONG et al., 2017)، وقورنت النتائج التجريبية والتحليلية، كما أجريت دراسة بارامترية بهدف دراسة أثر استخدام أنظمة إرساء مختلفة.

تبين هذه الورقة البحثية أن فعالية تقوية الجوائز البيتونية المسلحة لاحقة الشد باستخدام شرائح البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية على الانعطاف تزداد باستخدام أنظمة إرساء بشكل حرف (U)، حيث زادت طاقة تحمل الجوائز المقواة بشرائح (CFRP) والتي تحتوي على أنظمة إرساء بشكل حرف (U) حتى 16.7% من طاقة تحمل الجوائز غير المقوى، كما انخفض السهم بحدود 6% من السهم الناتج في الجوائز المقوى دون استخدام نظام إرساء.

**الكلمات المفتاحية:** الجوائز لاحقة الشد، غير ملتصقة، البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية، عزم الانعطاف، الأوتار.

تاريخ الإيداع: 2023/5/22

تاريخ القبول: 2023/8/3



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية،  
يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب  
CC BY-NC-SA

# Strength Of Post-Tensioned RC Beams Using FRP Strips For Bending Moment

**Razan nadr Abdo<sup>1\*</sup> Muneer Aref Al-Atrash<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>. Master Student, Damascus University, Civil Engineering, Structure Department, ([razan.abdo@damascusuniversity.edu.sy](mailto:razan.abdo@damascusuniversity.edu.sy))

<sup>2</sup>. Professor, Damascus University, Civil Engineering, Structure Department, Reinforced Concrete, ([munir58.alatrash@damascusuniversity.edu.sy](mailto:munir58.alatrash@damascusuniversity.edu.sy))

## Abstract:

The increasing use of prestressed reinforced concrete structures in the construction industries, and their applications have varied in bridges, high commercial and residential buildings, to where the beams show complex features and heavy loads.

Prestressed concrete structures have many advantages, such as less cracks, material savings, and reduce deflection.

In this research, an analytical study was conducted by using the finite element method and nonlinear analysis using (Abaqus-2021) Which takes into account the material nonlinearity of un bonded post-tensioned reinforced concrete beams strength with (CFRP) strips, Empirically tested by (Q.T.P.TRUONG et al., 2017).

The experimental and analytical results were compared, and a parametric study was conducted to study the effect of using different anchorage systems for CFRP strips.

This paper shows that the effectiveness of strengthening post-tensioned reinforced concrete beams using (CFRP) strips on bending is increased by using U anchorage systems, The bearing capacity of the strengthened beam with (CFRP) strips which contain U-shape anchorage systems increased to 16.7% of the bearing capacity of the unstrengthened beam, and the deflection decreased about 6% of the resulting share in the strengthened beam without using the anchorage system.

**Keywords:** Post tensioned beam, Un bonded, (CFRP) Carbon fiber reinforced polymers, Bending moment, Strands

Received: 22/5/2023

Accepted: 3/8/2023



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

## المقدمة (Introduction):

البيتون مسبقة الإجهاد هو شكل خاص من البيتون المسلح، حيث يتضمن الإجهاد المسبق تطبيق حمل ضغط أولي على العنصر الإنشائي للتقليل من أو للقضاء على قوى الشد الداخلية، وبالتالي السيطرة أو القضاء على التشقق (Ranzi, 2017). كما يمكن تعريف الإجهاد المسبق بأنه تطبيق ضغوط داخلية في عناصر إنشائية، وتكون هذه الضغوط ذات طابع معاكس لتلك التي ستكون بسبب أحمال الخدمة أو العمل. الشكل (1). (Amer F., 2017).

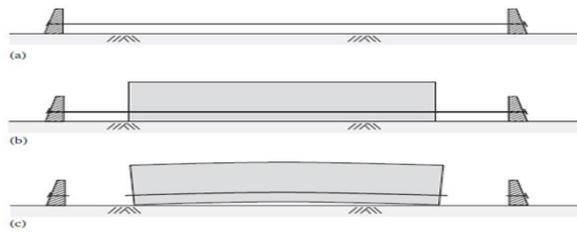
تشمل تطبيقات الهندسة المدنية لشرائح (FRP) تقوية عنصر إنشائي سليم لمقاومة الأحمال المتزايدة، ويعتبر البوليمير المقوى بألياف الكربون (CFRP) مفضلاً على الألياف الأخرى بسبب معامل المرونة العالي والمقاومة المرتفعة. (Anjali Gupta, 2017).

تعطى معادلات توزيع الإجهادات في مرحلة الاستثمار لحالة توزيع الحزم مسبقة الإجهاد بشكل لامركزي بالنسبة للمقطع العرضي حسب (Herish A.Hussein, et al., 2021):

$$f = +\frac{P}{A} \pm \frac{P e c}{I} \pm \frac{M c}{I} \quad (1)$$

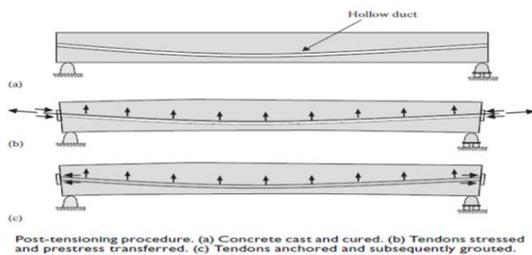
ينفذ الإجهاد المسبق بإحدى طريقتين:

1- طريقة الشد السابق حيث يشد الفولاذ بين دعامتين، ثم يصب البيتون على التسليح المشدود، وعندما يبلغ البيتون درجة تصلب كافية تقطع أسلاك التسليح فتطبق هذه الأسلاك قوى ضغط على البيتون، وغالباً ما يكون مسار التسليح مستقيماً. (الأطرش وآخرون، 1995). الشكل (3).

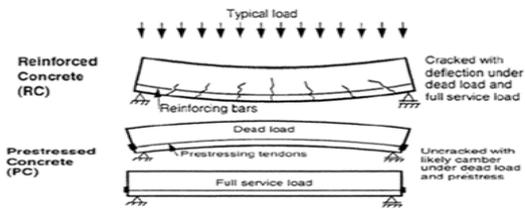


الشكل (3) مسار التسليح المستقيم في طريقة الشد السابق ومراحل تنفيذه (Gilbert, et al., 2017)

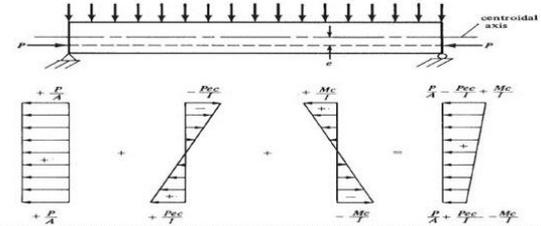
2- طريقة الشد اللاحق حيث يتم صب البيتون داخل القالب بعد أن تجهز قنوات لتمرير التسليح بداخلها، وعندما يتصلب البيتون بشكل كافٍ، نشد فولاذ التسليح بأجهزة شد هيدروليكية مستدة على البيتون المتصلب فنعرضه بذلك إلى ضغط، ثم نثبت نهايات الحزم (الكابلات) المشدودة على البيتون بوسائط تثبيت. (الأطرش وآخرون، 1995). الشكل (4).



الشكل (4) مسار التسليح المنحني في طريقة الشد اللاحق ومراحل تنفيذه (Gilbert, et al., 2017)



الشكل (1) مقارنة بين البيتون المسلح العادي و مسبقة الإجهاد الفكرة باختصار هي تطبيق إجهاد ضغط مسبق على مناطق البيتون التي ستعرض لإجهاد شد أثناء فترة الاستثمار.



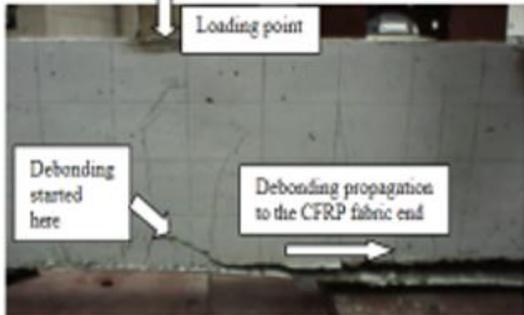
الشكل (2) تطبيق إجهاد ضغط مسبق لا مركزي على مناطق البيتون التي ستعرض لإجهاد شد

(Amer F. Izzet, et al., 2017)

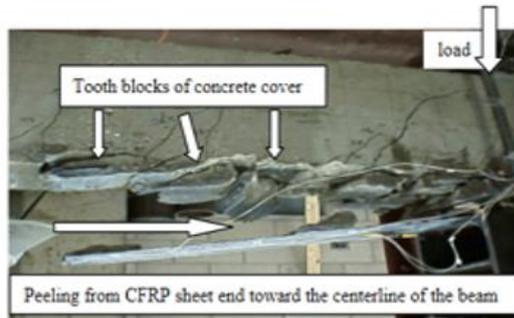
والبيتون، إلا أن الحلول النظرية تبالغ في تقدير مقاومة الجوائز، والتي غالباً ما تنهار بشكل مبكر أكثر من المتوقع. (Y.Dong,2002).

وقد وجد من الاختبارات التجريبية التي تم إجراؤها على الجوائز البيتونية المسلحة والمقواة بشرائح (FRP) حصول انهيارات عند حمولات أقل من تلك المحسوبة من المعادلات التصميمية، والسبب في ذلك يعود إلى حصول انهيار للجوائز المقواة نتيجة انفصال شريحة التقوية (Debonding Failure) أو بسبب حصول تقشر لطبقة التغطية البيتونية (Concrete Cover Separation) المجاورة لشريحة التقوية. الشكل (5)، (6).

ويمكن لتأخير الانفصال الجزئي (Partial Delamination) لشرائح التقوية أن يستخدم نظام إرساء (Anchorage System) بحيث يمكن استبعاد حدوث انفصال للشرائح وبالتالي اكتساب مقاومة حدية أعلى نتيجة الاستفادة الأكبر من شرائح التقوية. (H. Al-Ghaneam,2017)



الشكل (5) انفصال شريحة التقوية (H. Al-Ghaneam,2017)



الشكل (6) تقشر طبقة التغطية البيتونية (H. Al-Ghaneam,2017) يهدف البحث إلى دراسة العلاقة بين شرائح (FRP) والجوائز البيتونية المسلحة لاحقة الشد، عن طريق المقارنة بين عدة

وتقسم أنظمة الشد اللاحق إلى نظام ملتصق (Bonded) ونظام غير ملتصق (Unbonded)، حيث تبقى أسلاك الشد في نظام الأوتار غير الملتصقة حرة عن البيتون المحيط، بينما تكون أسلاك الشد في نظام الأوتار الملتصقة ملتصقة بواسطة حقن المونة اللاصقة (Grout) داخل أعماد بعد إجراء عملية الشد. (الكود العربي السوري - الملحق (8)، 2018).

لقي موضوع تحسين المنشآت المدنية الهندسية القائمة اهتماماً كبيراً في السنوات الأخيرة، ونتج ذلك عن تدهور وضع عناصر هذه المنشآت التي تأثرت سلامتها بفعل الزمن أو سوء التنفيذ أو بتأثير الزلازل أو نتيجة هبوطات غير متجانسة في التربة أو بسبب زيادة الأحمال بسبب تغير استثمار المنشأة. وتتجلى أهم الإنجازات الحديثة نسبياً في مجال المواد وطرائق التدعيم، في استعمال مركبات البوليميرات المسلحة بالألياف. وتعني كلمة بوليمير مادة بلاستيكية ذات جزيء كبير يشكل من اتحاد جزيئات عديدة صغيرة، بتوضع هندسي معين، من خلال عملية تصنيع مدروسة ومختبرة.

كما يكون التسليح المستعمل للبوليميرات بشكل ألياف (Fibers)، يمكن أن تكون من مادة الكربون (Carbon) فتسمى أليافاً كربونية (CFRP)، أو من مادة الزجاج (glass) فتسمى أليافاً زجاجية (GFRP) أو من مادة الأراميد (Aramid) فتسمى أليافاً أراميدية (AFRP).

ومن أهم مميزات البوليميرات المسلحة بالألياف أن سماكتها قليلة وبذلك لا تؤثر على الشكل المعماري للمبنى، وسهولة التنفيذ وسرعته، إضافة لخفة وزنها، إلا أنها تعاني من مشاكل مثل قابليتها للاحتراق، وخلافاً للفولاذ الذي يتشوه بشكل مرن - لدن، فإن سلوك هذه المركبات بشكل عام يكون خطياً مرناً حتى الانهيار، من دون حصول أي عتبة سيلان، أو تشوه لدن. (الكود العربي السوري - الملحق (4)، 2016).

تعتمد الحسابات النظرية للجوائز المقواة على فرضية توافق التشوهات (Strain Compatibility) وفرضية العمل المركب التام (Full Composite Action) ما بين شرائح (FRP)

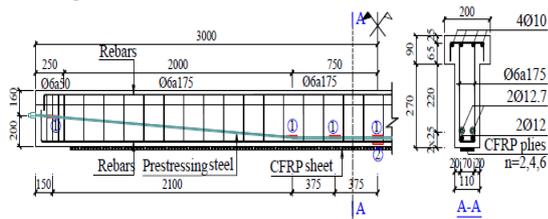
طاقة تحمل الجائز المقوى بشرائح (AFRP) هي الأكبر على الإطلاق، وتوصل (Herish A.Hussein et al.,2021,55) في دراستهم لعارضة جسر مسبق الإجهاد وجائز بشكل حرف (I) مسبق الإجهاد تمت تقويتها بواسطة ثلاث طبقات من شرائح (CFRP) مرة في منطقة الشد فقط ومرة في منطقتي الشد والضغط إلى أن مقاومة الانعطاف تزداد بنسبة أكبر عند التقوية في مناطق الشد والضغط منها عند التقوية في منطقة الشد فقط. أما الدراسة المعتمدة فقد كانت دراسة تجريبية لـ (Q.T.P.TRUONG et al.,2017,978) وذلك لمعرفة سلوك الانعطاف للجائز البيتونية المسلحة لاحقة الشد غير الملتصقة بشكل حرف T مع أو بدون تقوية باستخدام شرائح (CFRP) وذلك مع أو بدون أنظمة إرساء بشكل حرف U وذلك تحت تأثير الحمولات الستاتيكية، حيث تتضمن الدراسة اختبار تسعة جوائز بشكل حرف T طولها 6000mm، والبعد بين المساند 5600mm، أبعاد الجوائز موضحة بالشكل (7) وهي:

$b = 110\text{mm}$  عرض جسد الجائز

$h = 360\text{mm}$  ارتفاع الجائز

$b_f = 200\text{mm}$  عرض جناح الجائز

$h_f = 90\text{mm}$  سماكة جناح الجائز



الشكل (7) المقطع العرضي والطولي للجوائز

أحد هذه الجوائز غير مدعم وثمانية مدعمة خارجياً بشرائح (CFRP) وذلك بأعداد مختلفة من طبقات الشرائح (2,4,6)، ثلاثة منها لها أنظمة إرساء بشكل حرف U واثنان لها أنظمة إرساء أخرى، تم استخدام تسليح سفلي (2Ø12) وتسليح علوي (4Ø10) وأساور (Ø6/17.5) أما الأوتار (2Ø12.7) كل حزمة

نماذج تقوية باستخدام أنظمة إرساء مختلفة، وذلك للوصول إلى الحل الذي يؤدي إلى تأخير انفصال شرائح التقوية وبالتالي رفع طاقة تحمل الجوائز على الانعطاف والحد من السهوم والتشققات.

2. الدراسات المرجعية (Literature Review): تناولت العديد من الدراسات مفهوم تقوية الجوائز البيتونية المسلحة لاحقة الشد، فقد وجد (Vathsala et al.,2014, 1828) من خلال دراستهم التجريبية والتحليلية باستخدام برنامج ANSYS أن تقوية الجوائز البيتونية المسلحة لاحقة الشد بشرائح (GFRP) على كامل طول الجائز من الأسفل أكثر فعالية من عدم تقويته أو من تقويته على طول منطقة الانعطاف الأعظمي، كما حصل توزع للشقوق خارج منطقة الانعطاف في الجوائز المقواة على كامل الطول، في حين كانت هذه الشقوق مركزة في منطقة الانعطاف الأعظمي في الجوائز غير المقواة والجوائز المقواة في منطقة الانعطاف الأعظمي، ومن خلال المقارنة بين الكودين الأمريكيين (ACI)، (AASHTO) وباستخدام برنامج ANSYS، لاحظ (Gupta et al.,2017,3277) أن مقاومة الانعطاف في الجوائز الملتصقة أكبر حسب الكود (AASHTO)، أما عدد طبقات (CFRP) المطلوبة لمقاومة الأحمال المتزايدة في النظام غير الملتصق ثلاث طبقات حسب AASHTO، بينما حسب ACI فهي طبقة واحدة فقط، كما يمكن التقوية على القص للجوائز عند المساند بعدة طرق، منها تمديد شرائح (CFRP) إلى المساند، كما أعطى الكود (AASHTO) تشوه أقل نسبياً في (CFRP) من الكود (ACI)، وبالنسبة للتقوية بشرائح (AFRP) فقد استخدمها (Ravik et al.,2018,800) في دراستهم التجريبية والتحليلية باستخدام برنامج ANSYS، وتوصلوا إلى أن السهم الحاصل في الجوائز المقوى بشرائح (AFRP) أقل من الجوائز غير المقوى، والسهم في الجوائز المعاد تأهيله باستخدام شرائح (AFRP) أقل من الجوائز غير المقوى، كما أن طاقة تحميل الجوائز لاحق الشد غير المقوى هي الأقل، في حين كانت



الشكل (9) أشكال التقوية والتشققات الحاصلة في الجوائز المختبرة

تعزز شرائح (CFRP) بشكل كبير مقاومة الانعطاف للجوائز المختبرة (تصل إلى 31% للجوائز المقواة غير المرسة و 37% للجوائز المقواة على شكل (U)).

كما أظهرت شرائح (CFRP) كفاءتها في تقليل السهم (حتى 30% للجوائز المقواة غير المرسة و 29% للجوائز المقواة على شكل (U)، وحسنت بشكل كبير مطاوعة الجوائز وقابليتها للتشوه (تصل إلى 54% للجوائز المقواة غير المرسة و 65% للجوائز المقواة على شكل حرف (U))، إضافة لتقليل عرض الشق بنسبة 48%.

كما كانت هناك اختلافات طفيفة في مقاومة الانعطاف بين الجوائز التي تم تعديلها مع هذين النوعين من أنظمة الإرساء على شكل حرف (U).

بسبعة أسلاك.

درجة جودة الببتون PC40

المقاومة المميزة للببتون  $f_{c,cube} = 47.2 Mpa$

إجهاد الخضوع لفلواذ التسليح الطولي  $f_y = 430 Mpa$

إجهاد الخضوع للأساور  $f_y = 240 Mpa$

إجهاد الخضوع الاسمي للأوتار  $f_{py} = 1675 Mpa$

مقاومة الشد الحدية لشرائح CFRP هي:

$f_{fu} = 4900 Mpa$

سماكة كل شريحة من شرائح (CFRP) هي:

الجدول (1) مواصفات العينات التجريبية

Sign of beams	n	an	af (mm)	wf (mm)	sf
اسم الجائز	عدد الشرائح السفلية	عدد الشرائح U	عرض الشرائح السفلية	عرض الشرائح U	المسافة بين شرائح U
M0	-	-	-	-	-
M2CB	2	-	70	-	-
M4CB	4	-	70	-	-
M6CB	6	-	70	-	-
M2CB-AN1	2	12	70	300-100	250
M4CB-AN1	4	12	70	300-100	250
M6CB-AN1	6	12	70	300-100	250
M2CB-AN2	2	12	70	100	150
M4CB-AN2	4	12	70	100	150

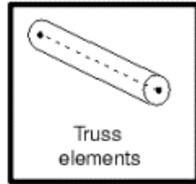
تم تحميل الجوائز بحمولتين مركزتين متزايدتين باستخدام المكبس الهيدروليكي حتى الوصول إلى الحمولة الحدية. الشكل (8).

كما تم التصميم حسب الكود الأمريكي ACI318-14



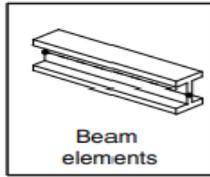
الشكل (8) تطبيق القوى على الجوائز

العنصر (T3D2): هو عنصر خطي فراغي (Truss Element) بعقدتين، لكل عقدة ثلاث درجات حرية، ملائم لنمذجة العناصر ثلاثية الأبعاد التي تعمل على الضغط والشد فقط، استخدم في محاكاة فولاذ تسليح الجائز في النموذج. الشكل(12).



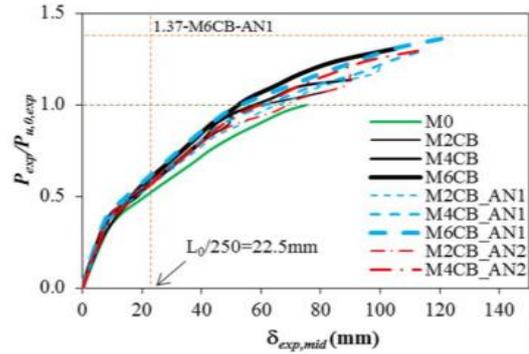
الشكل (12) شكل العنصر Wire (T3D2)

العنصر (B31): هو عنصر خطي فراغي (Beam Element) بعقدتين، لكل عقدة ست درجات حرية، ملائم لنمذجة العناصر ثلاثية الأبعاد التي تعمل كعناصر جائزية، استخدم في محاكاة الأوتار. الشكل(13).



الشكل (13): شكل العنصر Beam (B31)

العنصر (S4R): لنمذجة شرائح الـ (CFRP) حيث (S4R) عنصر مساحي (Shell Element) مؤلف من أربع عقد وكل عقدة تحتوي ست درجات حرية (ثلاثة انتقالات و ثلاثة دورانات)، والرمز R للدلالة على أنه قد تم تخفيض عدد نقاط غاوس إلى نقطة واحدة. الشكل(14).



الشكل(10) العلاقة بين نسبة الحمولة المطبقة إلى الحمولة الحدية في الجائز غير المقوى والسهم الأعظمي في الجوائز المختبرة

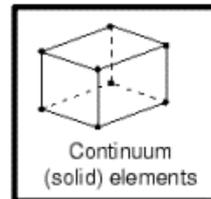
في هذا البحث تم إجراء دراسة تحليلية باستخدام برنامج (Abaqus-2021) لعدة جوائز بيتونية مسلحة لاحقة الشد مقواة باستخدام شرائح البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية (CFRP)، حيث تم إجراء مقارنة بين نتائج الدراسة التحليلية ونتائج الدراسة التجريبية التي قام بها:

(Q.T.P.TRUONG et al.,2017,978)

مما تقدم في الدراسة التجريبية السابقة نجد أن شرائح (CFRP) لها تأثير كبير في زيادة قدرة التحمل وتقليل السهوم، لذلك سوف ندرس بالتحليل باستخدام برنامج (Abaqus-2021) جوائز بيتونية مسلحة لاحقة الشد مقواة باستخدام شرائح البوليميرات المسلحة بالألياف الكربونية (CFRP) والتي تحوي على أنظمة إرساء مختلفة بشكل حرف (U).

### 3- مواصفات النموذج (Model Description) :

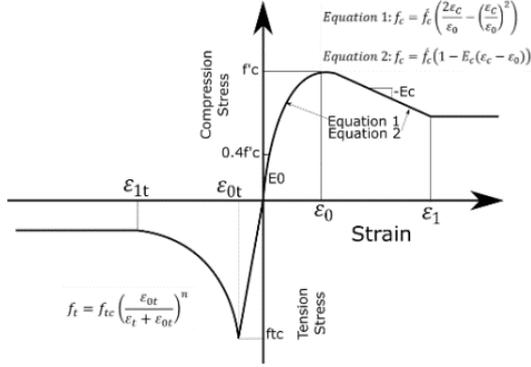
العنصر (C3D8R): هو عنصر حجمي مكعبي فراغي (Solid Element) بثمان عقد، لكل عقدة ثلاث درجات حرية، ملائم لنمذجة العناصر ثلاثية الأبعاد التي لها شكل منتظم، استخدم في محاكاة بيتون الجائز في النموذج. الشكل(11).



الشكل (11) شكل العنصر Solid (C3D8R)

وفي مرحلة الشد:

$$f_t = f_{tc} \left( \frac{\epsilon_{0t}}{\epsilon_t + \epsilon_{0t}} \right)^n \quad (4)$$



الشكل (15) مخطط (σ, ε) لمادة البيتون حسب (Park & Pauly, 1975)

وبالاعتماد على ما ورد في المرجع المعتمد فإن قيمة المقاومة المميزة الأسطوانية ( $f_c'$ ) حسب الكود العربي السوري- الملحق (8) (2018):

$$f_c' = 0.8 f_{c, cube} \quad (5)$$

$$f_c' = 0.8 * 47.2 = 37.8 \text{ Mpa}$$

وتم حساب معامل مرونة البيتون حسب علاقة الكود الأمريكي (ACI 363-92):

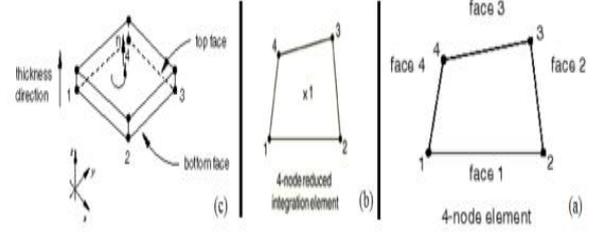
$$E_0 = 3320 \sqrt{f_c'} + 6900 \quad (6)$$

$$E_0 = 27312 \text{ Mpa}$$

كما تم اعتبار معامل بواسون للبيتون:

$$\nu = 0.2$$

تم حساب معامل ضرر البيتون على الضغط من العلاقة:



الشكل (14) شكل العنصر Shell (S4R)

#### 4-توصيف المواد المستخدمة في النمذجة :Materials Used In Modeling

تم نمذجة سلوك مادة البيتون عن طريق تعريف CDP (Concrete Damaged Plasticity) وهو من أدق النماذج الخاصة بالبيتون المسلح ضمن البرنامج لأنه يعبر عن السلوك اللاخطي للبيتون في مرحلتي الضغط والشد، ويأخذ بعين الاعتبار تشقق البيتون على الشد وتحطمه على الضغط، كما أنه تعديل لفرضية (Drucker-Prager) وهي واحدة من أكثر فرضيات المقاومة تطبيقاً للبيتون.

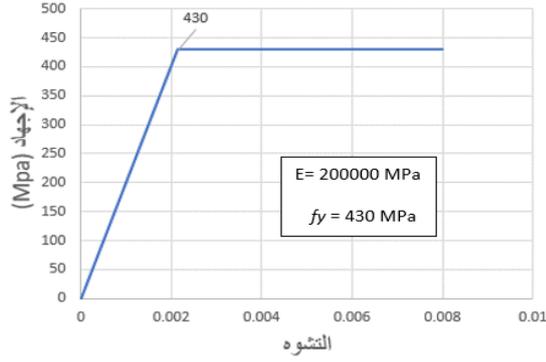
الجدول (2) تعريف (CDP) ضمن برنامج Abaqus

Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K
زاوية التمدد	اللامركزية	الإجهاد ثنائي المحور	مستوى الإزاحة
36	0.1	1.16	0.667

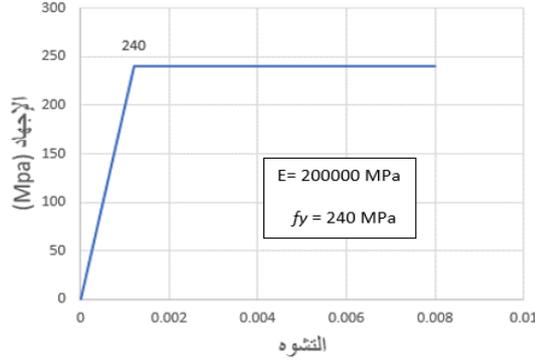
تم اعتماد مخطط (σ, ε) لمادة البيتون على الضغط (ربع أول) وعلى الشد (ربع ثالث) حسب (Park & Pauly, 1975)، حيث تم استخدام العلاقات التالية في رسم مخطط الإجهاد - التشوه النسبي للبيتون في مرحلة الضغط:

$$f_c = f_c' \left( \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right) \quad (2)$$

$$f_c = f_c' (1 - E_c(\epsilon_c - \epsilon_0)) \quad (3)$$



الشكل (18) سلوك فولاذ التسليح الطولي



الشكل (19) سلوك فولاذ التسليح العرضي (الأساور)

تم تطبيق إجهاد بدائي على الأوتار حسب ملحق الكود العربي السوري باعتبار أن:

$$\sigma_p = (0.8 - 0.9)f_{py} \quad (10)$$

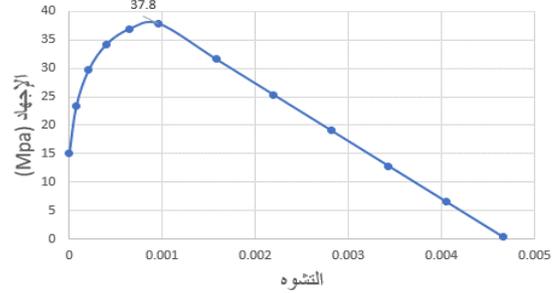
$$\sigma_p = (0.8 - 0.9) 1675$$

$$\sigma_p = 1500 \text{ Mpa}$$

لتحقيق التأثير المتبادل بين البيتون والأوتار، مع الأخذ بعين الاعتبار أن طبيعة الربط (Unbonded)، تم استخدام روابط (Connector element)، على فرض أن كل عقدة من عقد الأوتار مرتبطة مع أقرب عقدة من عقد البيتون تمثل العلاقة المتبادلة في ال (Unbonded PT) على طول العنصر المرتبط بهذه العقدة.

تم أخذ شرط التناظر بعين الاعتبار، ولتطبيق الأحمال والاستناد تم وضع نقاط مرجعية (RP) على صفائح من نوع (Discrete Rigid) أي غير قابلة للتشوه، وتم اعتبار الربط بين الجائز والصفحة من نوع (Tie)، كما تم إضافة حمولة

$$d_c = 1 - \frac{f_{ct}}{f_c} \quad (7)$$



الشكل (16) سلوك البيتون على الضغط

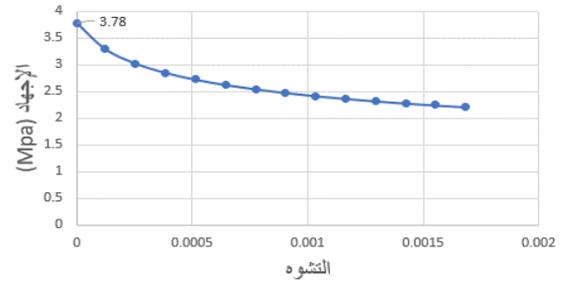
وبالاعتماد على قيمة لمقاومة الشد الأعظمية ( $f_{ct}$ ) تساوي إلى عشر قيمة المقاومة المميزة الأسطوانية ( $f_c'$ )

$$f_{tc} = 0.1 f_c' \quad (8)$$

$$f_{tc} = 0.1 * 37.8 = 3.78 \text{ Mpa}$$

تم حساب معامل ضرر البيتون على الشد من العلاقة:

$$d_t = 1 - \frac{f_{ti}}{f_{tc}} \quad (9)$$



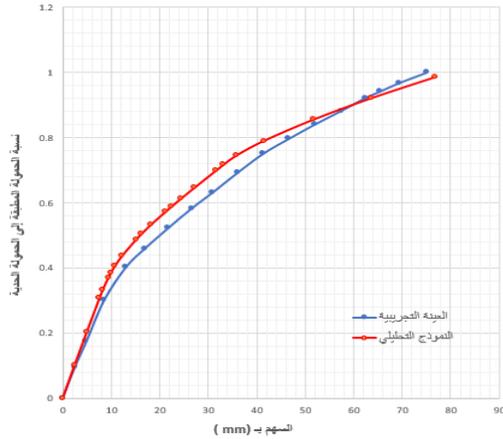
الشكل (17) سلوك البيتون على الشد

تم نمذجة سلوك مادة الفولاذ باعتباره (مرن - تام اللدونة) لجميع الأقطار المستخدمة، في حين تم اعتبار سلوك الأوتار مرن تام، وقد تم التحقق من ذلك في النموذج التحليلي. كما تم اعتبار معامل بواسون لفولاذ التسليح والأوتار:

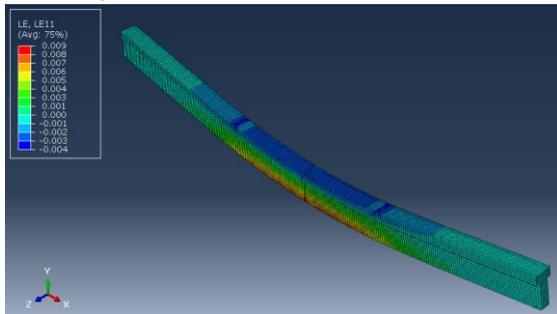
$$\nu = 0.3$$

## 5- النتائج والمناقشة (Results and Discussion)

5-1-النموذج الأول: للتأكد من صحة النمذجة الحاسوبية سيتم المقارنة بين نتائج الدراسة التجريبية التي حصل عليها (Q.T.P.TRUONG et al.,2017,978) للجائز (MO) غير المقوى وبين نتائج الدراسة التحليلية.



الشكل (22) المقارنة بين منحنى التجربة (MO) ومنحنى الدراسة التحليلية من الشكل (22) نلاحظ في نهاية التحميل (أي عند الوصول إلى الحمولة الحديدية  $P_u = 145\text{KN}$ )، فإن السهم الناتج عن الدراسة التجريبية هو  $75.12\text{mm}$ ، في حين كان السهم الناتج عن الدراسة التحليلية هو  $77.01\text{mm}$  عند حمولة  $143\text{KN}$ ، أي أن النتائج متقاربة ولا يتعدى الاختلاف نسبة  $2.5\%$ . نلاحظ من الشكل (23) تجاوز التشوهات قيمتها المسموحة في منطقة الضغط  $\epsilon = 0.003$ ، حسب الكود العربي السوري.



الشكل (23) التشوهات في البيتون

في حين لم تتجاوز الإجهادات في الأساور قيمة إجهاد الخضوع:

الوزن الذاتي للجائز.

تم إجراء تحليل لاخطي (Nlgeom) لنموذج الجائز المدروس، وتم اختيار نوع التحليل (Static General)، ولتعريف سلوك شرائح (CFRP) تم استخدام النموذج المرن من نوع (Lamina) مع نموذج الضرر المعروف باسم (Hashin).

الجدول (3) مواصفات النموذج المرن Lamina

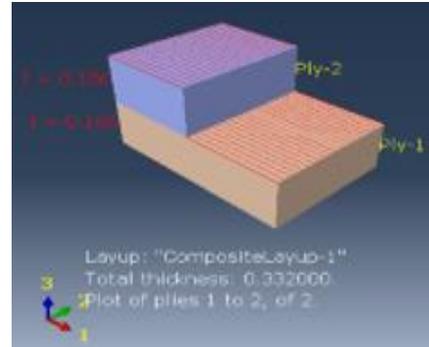
$E_1$	$E_2$	$N_{U12}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
240000	42000	0.33	23000	23000	12000

$E_{1,2}$ : معاملي المرونة الطولي والعرضي

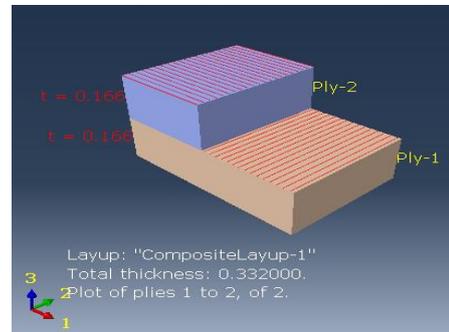
$N_{U12}$ : نسبة بواسون

$G_{12,13,23}$ : معاملات القص

وقد تم وضع طبقتين من شرائح (CFRP) أسفل الجائز بحيث كان اتجاه الألياف بشكل طولي مع اتجاه محور الجائز، في حين تم وضع طبقتين من شرائح (CFRP) بشكل حرف U على جسد الجائز بحيث كانت الألياف متصالبة. الشكل (20)، (21).

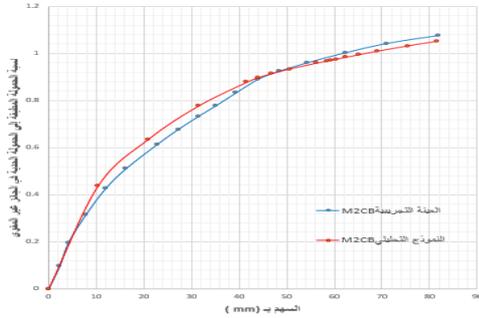


الشكل (20) اتجاه ألياف شرائح (CFRP) على طول الجائز

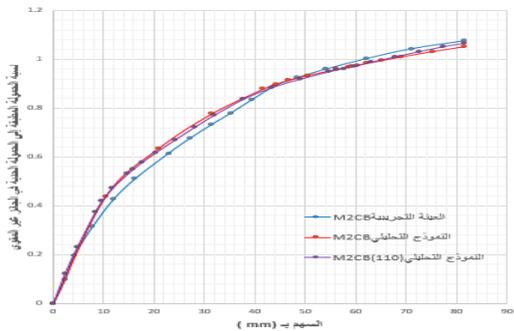


الشكل (21) اتجاه الألياف شرائح (CFRP) بشكل حرف U

مع ملاحظة أنه تم تعريف مادة الايبوكسي كرابط من نوع (Contact) للربط بين الجائز وشرائح (CFRP).



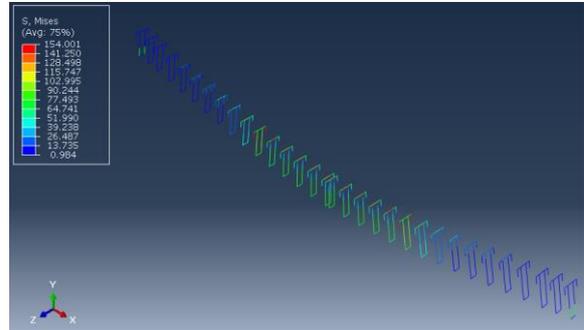
الشكل (26) المقارنة بين منحنى التجربة (M2CB) ومنحنى الدراسة التحليلية من الشكل (26) نلاحظ في نهاية التحميل (أي عند الوصول إلى الحمولة الحدية  $P_u = 156\text{KN}$ ) فإن السهم الناتج عن الدراسة التجريبية هو  $81.68\text{mm}$ ، في حين كان السهم الناتج عن الدراسة التحليلية هو  $81.43\text{mm}$  عند حمولة  $152.6\text{KN}$ ، أي أن النتائج متقاربة ولا يتعدى الاختلاف نسبة  $2.1\%$ . سنقوم بتطبيق الشرائح أسفل الجائز على كامل عرض الجسد أي على عرض  $110\text{mm}$ .



الشكل (27) المقارنة بين منحنى التجربة (M2CB) ومنحنى الدراسة التحليلية (M2CB) والمنحنى (M2CB110) وحسب الشكل (27) فإن السهم الناتج بوضع الشرائح على كامل عرض الجسد قد بلغ  $81.4\text{mm}$  عند حمولة  $154.4\text{KN}$ ، وهي نتيجة مقارنة لتوضع الشرائح بعرض  $70\text{mm}$  أسفل الجائز، حيث لم يزد الفرق عن نسبة  $1\%$ . وبمقارنة منحنى الدراسة التحليلية للجائز غير المقوى (MO) والجائز المقوى بشريحتين (M2CB110) كما في الشكل (25) نجد أن طاقة التحمل زادت بنسبة  $7.9\%$ ، وقل السهم بنسبة  $10\%$ . الشكل (28).

$$f_y = 240\text{Mpa}$$

كما هو واضح في الشكل (24):

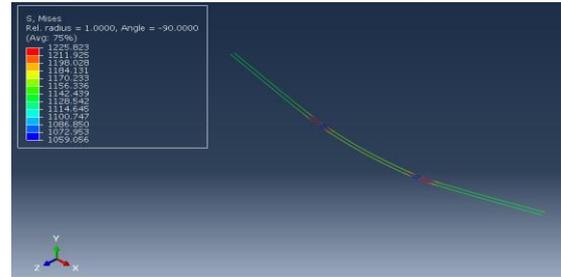


الشكل (24) الإجهادات في الأساور

أي أن انهيار الجائز لم يحدث على القص. كما أنه لم يحدث انهيار للجائز على الانعطاف في منطقة الشد بدليل عدم تجاوز الإجهادات في الأوتار قيمة إجهاد

$$f_{py} = 1675\text{Mpa}$$

كما هو واضح في الشكل (25).



الشكل (25) الإجهادات في الأوتار

مما سبق نستنتج أن انهيار الجائز حصل في منطقة الضغط.

## 5-2- النموذج الثاني:

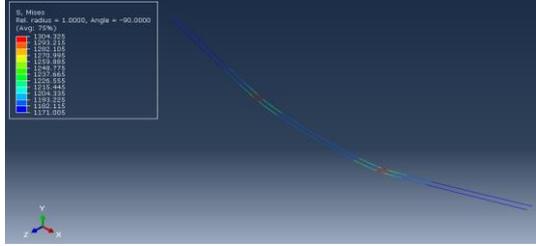
للتأكد من صحة النمذجة الحاسوبية سيتم المقارنة بين نتائج الدراسة التجريبية التي حصل عليها: (Q.T.P.TRUONG et al.,2017,978) للجائز (M2CB) المقوى بشرائح (CFRP) بعرض  $70\text{mm}$  وبين نتائج الدراسة التحليلية.

تم وضع طبقتين من شرائح (CFRP) أسفل الجائز بحيث كان اتجاه الألياف بشكل طولي مع اتجاه محور الجائز، في حين تم وضع طبقتين من شرائح (CFRP) بشكل حرف (U) على جسد الجائز بحيث كانت الألياف متصالبة.

كما نلاحظ من الشكل (31) أن الإجهادات في الأوتار لم تتجاوز قيمة إجهاد الخضوع للأوتار:

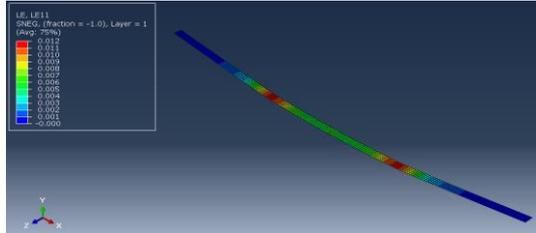
$$f_{py} = 1675 \text{ Mpa}$$

أي أن انهيار الجائز لم يحدث بسبب نقص التسليح المشدود. الشكل (31).



الشكل (31) الإجهادات في الأوتار

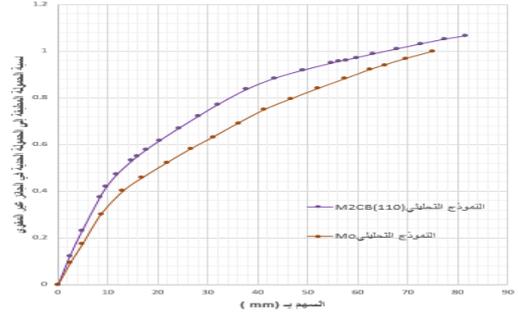
ويوضح الشكل (32) أن التشوهات حسب الدراسة التحليلية في شرائح (CFRP) بلغت 0.006 في منتصف الجائز بينما كانت 0.0059 حسب الدراسة التجريبية، أي أن نسبة الاختلاف لا تتجاوز 0.17%، كما بلغت 0.012 عند نقطة تطبيق الحمل حسب الدراسة التحليلية و 0.0123 حسب الدراسة التجريبية، أي أن نسبة الاختلاف لا تتجاوز 0.2%، وهي النقطة التي حصل عندها انفصال شرائح (CFRP) عن البيتون كما هو واضح في الشكل (33) - (34)



الشكل (32) التشوهات في شرائح (CFRP) في الجائز (M2CB110)

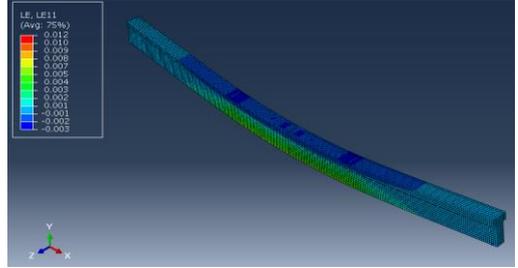


الشكل (33) انهيار الجائز (M2CB) نتيجة انفصال شرائح (CFRP) في الدراسة التجريبية



الشكل (28) المقارنة بين منحنى الدراسة التحليلية (MO) والمنحني (M2CB110)

سنناقش نتائج الدراسة التحليلية للجائز المقوى من الأسفل بكامل عرض الجسد (M2CB110) حيث نلاحظ في الشكل (29) أن التشوهات في منطقة الضغط في الجائز لم تصل لقيمة تشوهات البيتون المسموحة  $\epsilon = 0.003$

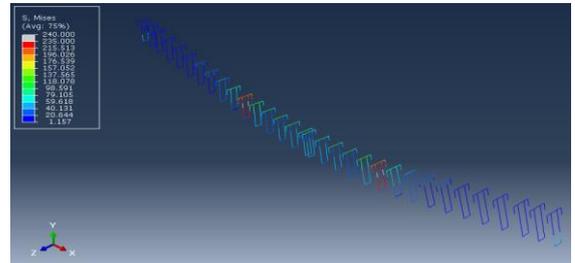


الشكل (29) التشوهات في الجائز (M2CB110)

أي أن انهيار البيتون لم يحدث في منطقة الضغط، ونلاحظ في الشكل (30) عدم تجاوز الإجهادات في الأساور لقيمة إجهاد الخضوع:

$$f_y = 240 \text{ Mpa}$$

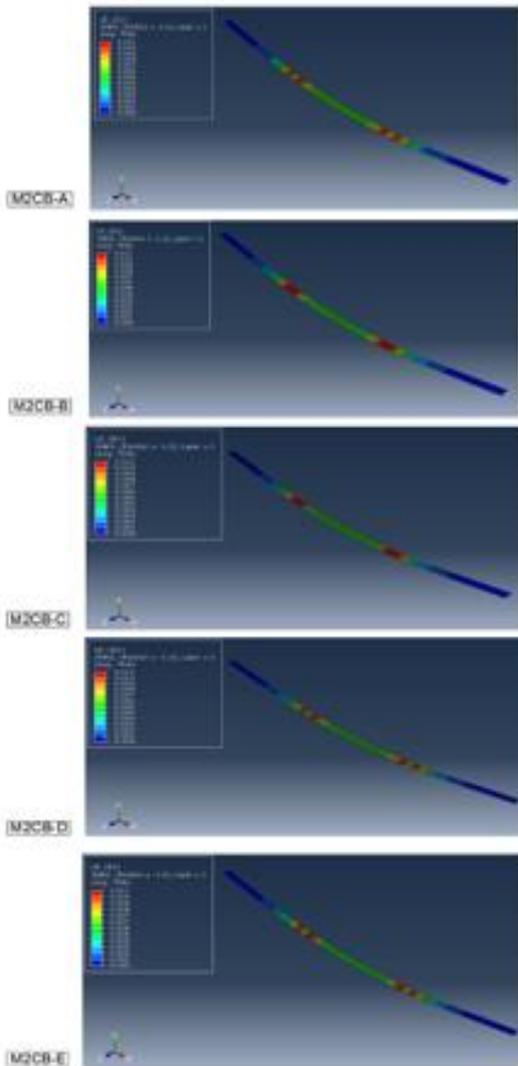
أي أن انهيار الجائز لم يحدث على القص.



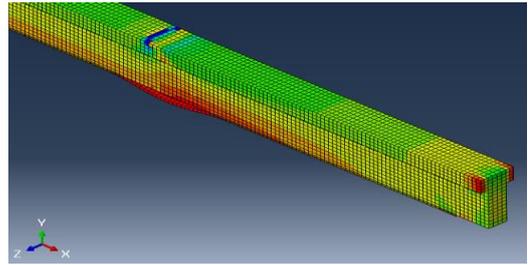
الشكل (30) الإجهادات في الأساور

#### 4-5- نتائج استخدام أنظمة إرساء (Anchorage System) مختلفة لشرائح (CFRP):

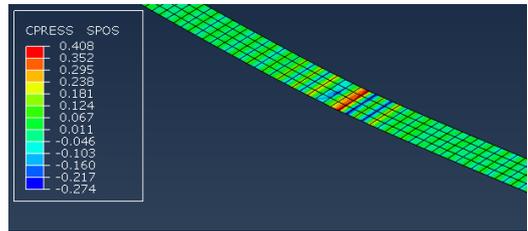
نلاحظ من الشكل (37) أن قيمة التشوهات في الشرائح السفلية في جميع الجوائز لم تصل إلى 0.012 وهي القيمة التي وصلت إليها الشرائح السفلية في الجوائز المرجعي المقوى M2CB وذلك عند تطبيق نفس الحمولة، حيث بلغت القيمة الأعظمية لها 0.011، أي أن قيمة التشوهات انخفضت بنسبة 8.3%، ولم يحدث انفصال للشرائح عن الجوائز وبالتالي لم يحدث انهيار للجوائز.



الشكل (37) التشوهات الحاصلة في الشرائح المستخدمة في أنظمة إرساء مختلفة



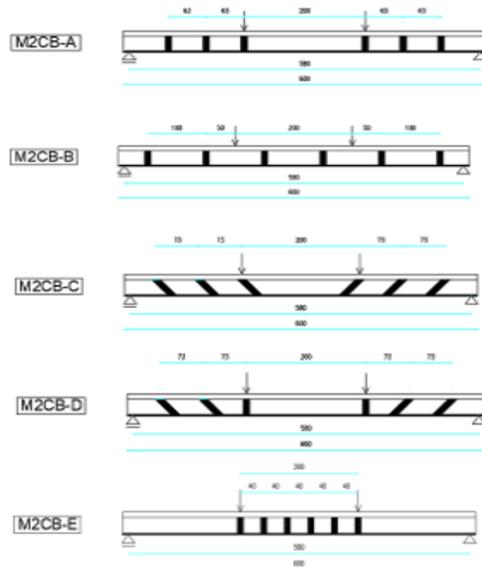
الشكل (34) انفصال شرائح (CFRP) في الجوائز (M2CB110) أسفل الحمولة المطبقة في الدراسة التحليلية وقد بلغت قيمة الـ Contact Pressure الأعظمية على شرائح (CFRP) قيمة 0.408Mpa حسب الشكل (35).



الشكل (35) أثر الـ Contact Pressure على شرائح (CFRP) أسفل الجوائز (M2CB110)

#### 3-5- استخدام أنظمة إرساء (Anchorage System) مختلفة لشرائح (CFRP):

تم وضع شريحتين أسفل الجوائز، كما تم استخدام ست شرائح مرساة بشكل حرف U، كل شريحة بعرض 10cm، وذلك على طول جسد الجوائز، وذلك بتباعدات مختلفة. الشكل (36).



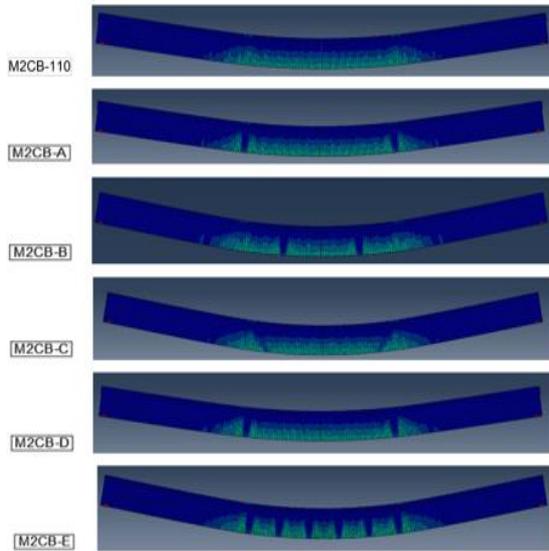
الشكل (36) أنظمة إرساء مختلفة لشرائح (CFRP)

الجدول (4) نتائج النماذج التحليلية من حيث الحمولة الحدية والسهم وطاقة التحمل

الجائز	الحمولة الحدية	السهم	نسبة زيادة طاقة التحمل
	KN	mm	
MO	143	77	
M2CB110	154.4	81.4	7.90%
M2CB-A	163.74	101.4	14.50%
M2CB-B	163.85	100.73	14.60%
M2CB-C	166.24	101.27	16.30%
M2CB-D	166.24	101.5	16.30%
M2CB-E	166.9	100.95	16.70%

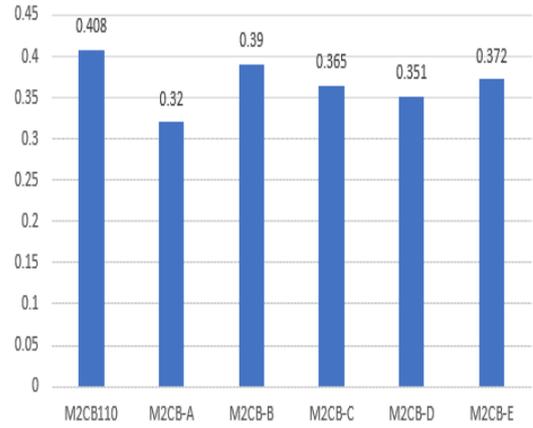
يتضح مما سبق أن السهم في الجائز (M2CB-E) هو السهم الأقل، كما أن طاقة تحمله هي الأعلى.

وحسب الشكل (40) الذي يوضح شكل توزيع الشقوق في الجوائز المقواة بشرائح (CFRP) فإن وجود شرائح بشكل طولي على جسد الجائز شكل حماية تامة من الشقوق في منطقة توضع هذه الشرائح، في حين شكلت الشرائح المتوضعة بشكل مائل بزواوية  $45^\circ$  حماية جزئية من الشقوق في الجائزين (M2CB-C)، (M2CB-D).



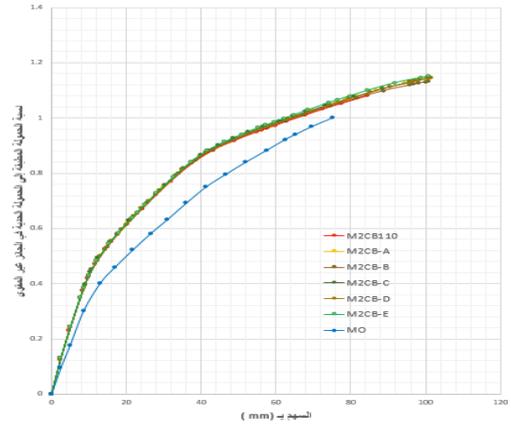
الشكل (40) شكل توزيع الشقوق في الجوائز المقواة بشرائح (CFRP) وباعتبار أن السهم في الجائز (M2CB-E) هو السهم الأقل، تم عمل نموذج لجائز مقوى في منتصف المجاز ولكن ارتفاع

ونلاحظ من الشكل (38) أن قيمة الـ (Contact Pressure) في شرائح جميع الجوائز المقواة بشرائح بشكل حرف U لم تصل إلى قيمة  $0.408\text{Mpa}$  وهي القيمة الحاصلة في الجائز المقوى من الأسفل فقط M2CB والتي أدت إلى انفصال شرائح الـ (CFRP) أسفل الجائز.



الشكل (38) أثر الـ (Contact Pressure) على شرائح (CFRP) أسفل الجوائز

إن وضع شرائح بشكل حرف (U) قد زاد من طاقة تحمل الجوائز حسب الشكل (39)، وكما يوضح الجدول (4):



الشكل (39) طاقة تحمل الجوائز المقواة ومقارنتها مع الجائز غير المقوى

## 5-5- النتائج (Conclusions):

1- تم التوصل إلى تقارب بين نتائج الدراسة التجريبية التي قام بها (Q.T.P.TRUONG et al.,2017,978) مع نتائج الدراسة التحليلية باستخدام برنامج Abaqus ، حيث بلغ الفرق بين حمولة الانهيار لكلا الجائزين نسبة 2.5%.

2- بلغت الحمولة الحدية الناتجة عن الدراسة التحليلية للجائز غير المقوى (MO) قيمة 143KN، كما بلغ السهم قيمة 77mm.

3- إن وضع شريحتي (CFRP) أسفل الجائز (M2CB110) على كامل عرض جسده أدى لزيادة طاقة تحمل الجائز بنسبة 7.9%، حيث كانت الحمولة الحدية 154KN، كما وصل السهم إلى قيمة 81.4mm.

4- أدى استخدام نظام إرساء في الجائز (M2CB-A) لزيادة طاقة تحمل الجائز بنسبة 14.5%، وكانت الحمولة الحدية 163.74KN، كما وصل السهم إلى قيمة 101.4mm.

5- كما أدى استخدام نظام إرساء في الجائز (M2CB-B) لزيادة طاقة تحمل الجائز بنسبة 14.6%، وكانت الحمولة الحدية 163.85KN، كما وصل السهم إلى قيمة 100.73mm.

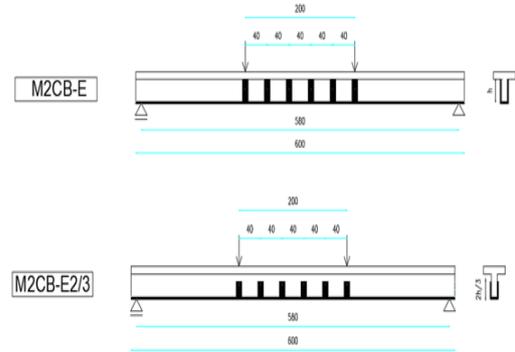
6- أما استخدام نظام إرساء في الجائز (M2CB-C) فقد أدى لزيادة طاقة تحمل الجائز بنسبة 16.3%، وكانت الحمولة الحدية 166.24KN، كما وصل السهم إلى قيمة 101.27mm.

7- كما أن استخدام نظام إرساء في الجائز (M2CB-D) قد زاد من طاقة تحمل الجائز بنسبة 16.3%، حيث كانت الحمولة الحدية 166.24KN، كما وصل السهم إلى قيمة 101.5mm.

8- أما استخدام نظام إرساء في الجائز (M2CB-E) فقد أدى لزيادة طاقة تحمل الجائز بنسبة 16.7%، وكانت الحمولة الحدية 166.9KN، كما وصل السهم إلى قيمة 100.95mm.

9- وباعتبار أن السهم في الجائز (M2CB-E) هو السهم الأقل

الشرائح فيه يساوي ثلثي ارتفاعها في الجائز (M2CB-E) كما في الشكل (41).

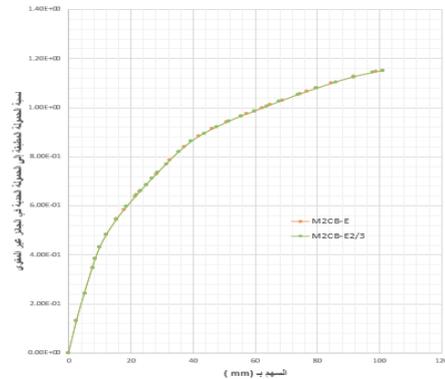


الشكل (41) ارتفاع الشرائح ثلثي ارتفاع جسد الجائز

نلاحظ في الشكل (42) تقريباً انطباق منحنيني الجائزين (M2CB-E) و (M2CB-E2/3) حيث بلغ السهم في الجائز (M2CB-E) قيمة 100.95mm، في حين كان السهم في الجائز (M2CB-E2/3) حوالي 100.97mm، أي أن الفرق بين السهمين بلغ نسبة 0.02% وهي نسبة صغيرة جداً.

أما طاقة تحمل الجائز (M2CB-E) فهي 166.9KN في حين كانت طاقة تحمل الجائز (M2CB-E2/3) بحدود 166.7KN، أي أن الفرق بين طاقتي تحمل الجائزين بلغ نسبة 0.2% وهي أيضاً نسبة صغيرة جداً.

وبناءً عليه يمكن استخدام شرائح بشكل حرف (U) بارتفاع ثلثي جسد الجائز بدلاً من كامل ارتفاع الجسد.



الشكل (42) المقارنة بين الجائز (M2CB-E) والجائز (M2CB-E2/3)

نسبياً، تم عمل نموذج لجائز مقوى في منتصف المجاز ولكن ارتفاع الشرائح فيه يساوي ثلثي ارتفاعها في هذا الجائز (M2CB-E2/3)، وقد بلغ السهم في الجائز (M2CB-E2/3) حوالي 100.97mm ، وبلغ الفرق بينه وبين السهم في الجائز (M2CB-E) نسبة 0.02% وهي نسبة صغيرة جداً، أما طاقة تحمل الجائز (M2CB-E2/3) فقد بلغت 166.7KN أي أن الفرق بينها وبين طاقة تحمل الجائز (M2CB-E) حوالي 0.2% وهي أيضاً نسبة صغيرة جداً.

أي لاداعي لاستخدام الإرساء على كامل ارتفاع الجائز، ويمكن الاكتفاء بثلثي ارتفاع الجائز.

10- أما بالنسبة لتوزيع الشقوق في الجوائز المقواة بشرائح (CFRP) فإن وجود شرائح بشكل طولي على جسد الجائز شكل حماية تامة من الشقوق في منطقة توضع هذه الشرائح، في حين شكلت الشرائح المتوضعة بشكل مائل بزاوية 45° حماية جزئية من الشقوق في الجائز (M2CB-C) والجائز (M2CB-D).

**التمويل:** هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

(CFRP) Composites. Modern Applied Science, 12, 110-122.

[12]- Herish A.Hussein, and Zia Razzaq. (2021). Strengthening Prestressed Concrete Bridge Girders and Building Beams with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets. EJERS, European Journal of Engineering and Technology Research, 3, 55-57

[13]- Park, R, and Paulay, T. (1975). Reinforced Concrete Structures. New York: 783.

[14]- Q.P.T.Truong, P. Phan-Vu, D.Tran-Thanh, T.D.Dang, and L.Nguyen-Minh. (2017). Flexural Behaviour Of Unbonded Post-Tensioned Concrete T-Beams Externally Bonded

Sheets with (CFRP) Under Static Loading. Research Gate, 13.

Gilbert, and Mickleborough. (2017). Design [15]- Ranzi,

of Prestressed Concrete to Eurocode 2. Taylor & Francis Group.

[16]- Ravik, Dr.S.Vijaya, and Dr.B.Shivakumaraswamy. (2018). A study on Post Tensioned Beams strengthened with AFRP fabric. International Journal of Engineering Research & Technology, 4, 800-803.

[17]- Vathsala and H N Jagannath Reddy. (2014). An Experimental and Analytical Investigation of Post-Tensioned Concrete Beam Strengthened Using GFRP Sheet. International Journal of Engineering Research & Technology, 7, 1828-1834.

[18]- Y.Dong, M.Zhao, and F. Ansari. (2002). Failure Characteristics of reinforced Concrete Beams Repaired with (CFRP) Composites. Strain, 8, 304-311.

## 6 – (References):

[1]- الأطرش، منير، ومنصور، نزيه. (1995). منشآت البيتون المسلح (3). جامعة تشرين. 344.

[2]- الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة. (2012). ط: 4. 348.

[3]- الكود العربي السوري – الملحق (4). (2016). الدليل الإرشادي لتدعيم المباني والمنشآت القائمة وتأهيلها لمقاومة الزلازل. ط: 1.

[4]- الكود العربي السوري – الملحق (8). (2018). تصميم المباني مسبقة الإجهاد. ط: 1.

[5]- Abaqus Document: Getting Started with Abaqus: Interactive Edition, Version 6.1, 2014, 3.1 finite elements.

[6]- Abaqus Document: Abaqus Analysis User's Guide, Version 6.1, 2014, 23.6.3 Concrete damaged plasticity.

[7]- American Concrete Institute. Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-14, ACI, Detroit, MI, 2014.

[8]- ACI Committee 363, 363R-92 (1997) Report on High Strength Concrete, 55.

[9]- Amer, F.Izzet, and Ali, A. Abdulhameed. (2017). Prestressed Concrete: A Fundamental Approach, ACI

318-11 Code Philosophy & Stresses Limitations. ResearchGate, 13.

[10]- Anjali Gupta, and Dr.M.S.kulkarni. (2017). Finite Element Analysis of (CFRP) Wrapped Bonded and Unbonded Post Tension Beams. International Journal of Engineering Research & Technology, 7, 3277-3284.

[11] - H.Al-Ghanem, A.Al-Asi, M.Alqam, and others. (2017). Shear and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Deep Beam Strengthened with