

دراسة سلوك الجوائز البيتونية المقواة خارجياً بصفائح من الـGFRP تجريبياً

الدكتور غاندي علي ججاج*
الدكتور قصي علي نداد**
ميرفت حسن حشمة***

(تاريخ الإيداع 25 / 1 / 2007. قُبل للنشر في 29/4/2007)

□ الملخص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة السلوك الإنشائي للجوائز البيتونية المسلحة غير المتشققة والمقواة خارجياً بصفائح من الألياف الزجاجية GFRP، وذلك من خلال برنامج تجريبي يتضمن مجموعتين من الجوائز البيتونية بسيطة الاستناد، الأولى معيارية B1 مكونة من جائزين، والثانية B2 تضم جائزين مقويين بصفائح من الـGFRP ملصوقة على الوجه المشدود. تتكون الصفائح من ألياف زجاجية من النوع E محضرة باستخدام لاصق لعضوي (polyester)، وهي ذات مقاومة عالية على الشد.

اختبرت الجوائز تحت تأثير قوتين مركزتين في ثلث المجاز وصولاً إلى مرحلة الانهيار، حيث تشير النتائج التجريبية إلى فعالية هذه التقوية في رفع الجودة الإنشائية للجوائز المقواة وذلك بزيادة قدرة التحمل، وتخفيض السهم المقابل للحمولة القصوى، بالإضافة إلى تأثيرها على آلية انتشار التشققات ودورها في زيادة قوة القص اللازمة لتشكيل الشق القطري الرئيسي المسبب للانهيار وتأخير تشكله.

الكلمات المفتاح: الجوائز البيتونية المسلحة، صفائح الألياف الزجاجية (GFRP)، التقوية، قدرة التحمل على القص، السهم، التشققات.

* أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** مدرس في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
*** طالبة ماجستير في قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Structural Behavior of RC Beams with Externally Bonded GFRP Experimentally

Dr. Ghandi Ali Jahjah*
Dr. Kusai Ali Naddaf**
Mervat Hasan Heshmah***

(Received 25 / 1 / 2007. Accepted 29/4/2007)

□ ABSTRACT □

The overall objective of this paper is to establish the structural behavior of uncracked reinforced concrete beams strengthened with externally bonded glass-fiber reinforced plastic (GFRP) sheets. This is done through an experimental program that includes two groups of simple supported concrete beams: B1 is specimen unplated and B2 is with bonded GFRP plates on the tension face, which are made from E- glass fibers in an isophathalic polyester inorganic adhesive system and has a high tensile strength.

These beams were constructed and load-tested in four-point flexure with loads at one-third point up to failure. Experimental results indicate to the effectiveness of this technique in improving the structural ductility of strengthened beams through increasing the load capacity, and its contribution in reducing the midspan deflection versus the ultimate load, in addition to its effect on cracks distribution and its role in improving the shear force required to form the major diagonal crack, which causes failure, thus delaying its appearance.

Key Words: Reinforced concrete beams, Glass-fiber sheets (GFRP), Strengthening, Shear capacity, Deflection, Cracks.

*Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Assistant Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

***Postgraduate Student, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

هناك حاجة عالمية متزايدة لصيانة وإعادة تأهيل المنشآت المدنية القائمة الضعيفة أو المتضررة بسبب تغير شروط التحميل ووجود أخطاء تصميمية خطيرة، أو عيوب إنشائية ناتجة عن نقص الخبرة في مجال تنفيذ المنشآت المدنية، كما لها دور هام في إصلاح المنشآت المتضررة نتيجة حوادث مختلفة أو كوارث طبيعية.

تعتبر تقنية التقوية باستخدام صفائح من مواد عالية المقاومة على الشد ملصوقة إلى الوجه المشدود للجوائز البيتوني تقنية فعالة في مجال التقوية والتدعيم، وتشير الدراسة [1] إلى أن استخدام الصفائح الفولاذية في عملية التقوية الخارجية قد بدأ بشكل مبكر بسبب التوافق بين الفولاذ والبيتون من جهة، واعتياد المهندسين على مادة الفولاذ كمادة إنشائية قوية ذات خصائص ميكانيكية مميزة من جهة أخرى، وهي تعتبر واحدة من التقنيات المطورة منذ عام 1960.

غير انه في السنوات الأخيرة ظهر استخدام الألياف اللامعدنية كخيار بديل عن الصفائح الفولاذية [2,3,4]، وأصبح استخدام صفائح الFRP أكثر رواجاً وشيوعاً نظراً لخصائصها المميزة كخفة الوزن - مقاومة الصدأ - سهولة التثبيت - مقاومة عالية على الشد، وهي تقنية غير مكلفة إذا ما قورنت بفاعليتها فهي لا تتطلب تفكيك المنشأ بغرض تحسين عمله الإنشائي، وهذا ما يجعل زمن التنفيذ أقل كون ذلك لا يحتاج إلى تجهيزات ثقيلة، حيث يتم تنفيذ التقوية بطبقات متتالية أو بصفحة ذات سماكة صغيرة وذلك في جوائز الأبنية والجسور التي فقدت بشكل جزئي بعضاً من مساحة فولاذ التسليح نتيجة الصدأ، أو لحاجة هذه الجوائز للتقوية بسبب زيادة الحمولات المطبقة .

ومن خلال استعراض المراجع المتخصصة في مجال التقوية [1,2,3,4] يمكننا أن نجد أول نظام محاكاة يصف مساهمة صفائح الFRP الملصوقة خارجياً على الوجه المشدود للجوائز في زيادة قدرة تحملها، وذلك اعتماداً على التحاليل والنتائج التجريبية المتاحة، وأن شكل الانهيار الحاصل يحدد مدى فاعلية صفائح التقوية كما يرتبط بمجموعة من العوامل وهي: شروط الالتصاق ، شكل الاتصال ، طول التثبيتات المتاحة ، سماكة الFRP ومعامل مرونتها وكذلك المقاومة المميزة للبيتون .

هناك أنواع مختلفة لصفائح الFRP نذكر منها صفائح الألياف الكربونية CFRP، الصفائح الأراميدية AFRP، و صفائح الألياف الزجاجية GFRP، وقد قدمت الكثير من الأبحاث المنشورة [3,4,5] فهما عميقاً للسلوك الإنشائي للجوائز البيتونية المقواة خارجياً بصفائح الCFRP فساهمت في وصف آلية الانهيار وكيفية انتشار التشققات، كما وضحت التحسينات التي طرأت على الجوائز المقواة من خلال تخفيض السهوم وزيادة قدرة التحمل بشرط تأمين كاف للالتصاق التام المحكم بين الصفيحة والوجه المشدود للجوائز المقوى. ولا بد من الإشارة إلى أنه وعلى مدى سنوات عديدة تم تطوير صفائح الFRP واللاصق المستخدم للحصول على أقوى وأصلب شكل للتقوية [1,6]، وتشير تجارب التعرض للحرارة العالية والمنجزة على اللواصق اللاعضوية مع الصفائح الكربونية إلى انه يضيع فقط %37 من المقاومة الأولية على الانعطاف عند تعرض هاتين المادتين (اللاصق والصفيحة) لدرجة حرارة $800^{\circ}C$ ولمدة ساعة واحدة حسب (Foden et al.1996)، وتعرض الدراسة ذاتها مساوئ اللواصق العضوية وضعفها في مقاومة الحريق، كما أن بعض أنواعها يتلف وتتراجع خصائصه عند التعرض الطويل للأشعة فوق البنفسجية مما يسبب مشاكل طويلة الأمد.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من خلال دراسة تأثير صفائح الـ GFRP في تقوية الجوائز البيتونية المسلحة، ومساهمتها في زيادة قدرة التحمل على القص، ودورها في تخفيض السهوم وتأخير انتشار التشققات. وذلك من خلال عمل تجريبي تم تنفيذه في مخابر تجريب المواد - كلية الهندسة المدنية- جامعتي تشرين والبعث، خلال العام 2006. إضافة إلى تحديد فعالية اللواصق اللاعضوية في تشكيل صفائح الـ GFRP عالية المقاومة باعتبارها النوع الأفضل الذي يتناسب مع الخصائص الفيزيائية لصفائح الألياف الزجاجية حيث يعتبر اللاصق اللاعضوي قليل اللزوجة، لا يحترق ولا يتلف عند تعرضه للأشعة فوق البنفسجية.

آلية العمل المشترك بين الجوائز المقواة و صفائح التقوية الملصوقة:

من المعروف أن عملية التقوية بلصق الصفائح على الوجه المشدود للجوائز البيتونية المسلحة يعطي الجوائز المقواة فعالية أعظمية على الانعطاف، وذلك لبعد السطح المقوى عن منطقة الضغط (حيث يكون الارتفاع الفعال أعظمية)، إضافة إلى مساهمتها في تحسين قدرة التحمل على القص. ولكن لا بد من الإشارة إلى أن الوصول إلى الفعالية الاعظمية يتم بتحقيق الالتصاق التام والمحكم بين الصفيحة والوجه المشدود [1,6,7]، بحيث يشكّلان سطحاً واحداً متلاحماً يؤمن العمل المشترك المتبادل والانتقال التام للاجهادات بين البيتون والصفيحة الخارجية، وذلك تحت تأثير مختلف مراحل التحميل وصولاً إلى الانهيار.

1- أشكال الانهيار الممكنة للجوائز المقواة على الوجه المشدود :

يمكن تلخيص أشكال الانهيار الممكنة للجوائز المقواة على الوجه المشدود حسب (Balakrishnan et al1988) كمايلي:

- الانهيار الناتجة عن الانعطاف: يمكن أن تكون وفق أحد الاحتمالات التالية:

1- تطاول حديد التسليح 2- انضغاط البيتون دون تطاول فولاذ التسليح الداخلي 3- انقطاع صفيحة التقوية الملصوقة على الوجه السفلي نتيجة الإجهادات الشادة 4- تحطم البيتون في المنطقة المضغوطة في حال كانت مقاومة البيتون ضعيفة.

- الانهيار الناتج عن القص: ويكون على شكل تشققات قطرية وهو متعلق بنسبة طول مجال القص إلى عمق الجائز.

- الانهيار المشترك: يبدأ الانهيار المشترك بانسلاخ أفقي لطبقة البيتون الواقعة تحت مستوى قضبان التسليح السفلية، حيث تتسلخ صفيحة التقوية عن السطح البيتوني نتيجة القص، وتصادف هذه الحالة إذا كانت مقاومة اللاصق ضعيفة أو لم تكن السطوح السفلية معدة جيداً، أي أن هناك خللاً في تنفيذ التقوية أدى إلى فقدان التلاحم الكامل بين البيتون والصفيحة.

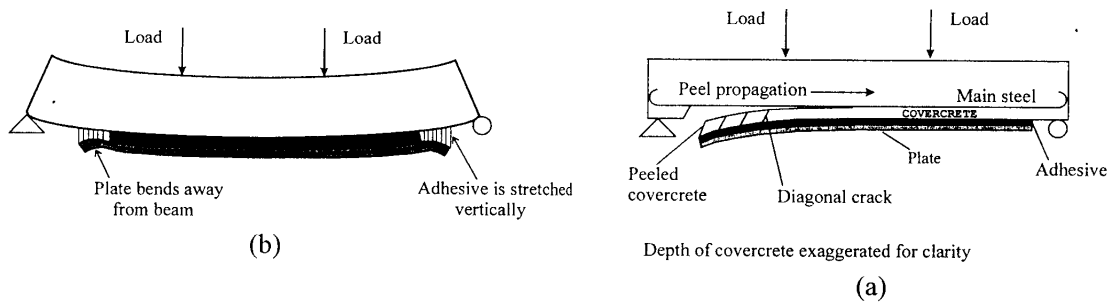
2- الأشكال المتوقعة لانسلاخ الصفيحة: إن تضرر الجوائز المقواة بصفائح على الوجه المشدود والمتمثل بانسلاخ الصفيحة يمكن أن يكون وفق أحد الشكلين التاليين:

2-1- الانسلاخ الحاصل في نهايات الصفائح End Peel:

يظهر الشكل (1-a) شكل الانسلاخ الحاصل في نهاية الصفيحة والذي ينتشر نحو وسط الجائز متمثلاً بتشققات مائلة وأفقية في طبقة التغطية (covercrete)، مما يسبب انكسارها وانفصالها عن الجائز في حين تبقى ملتصقة بقوة إلى الصفيحة [6]. بُحث هذا الشكل من الانهيار من قبل باحثين أمثال: (Saadatmanesh ; Malek 1997) وغيرهم .

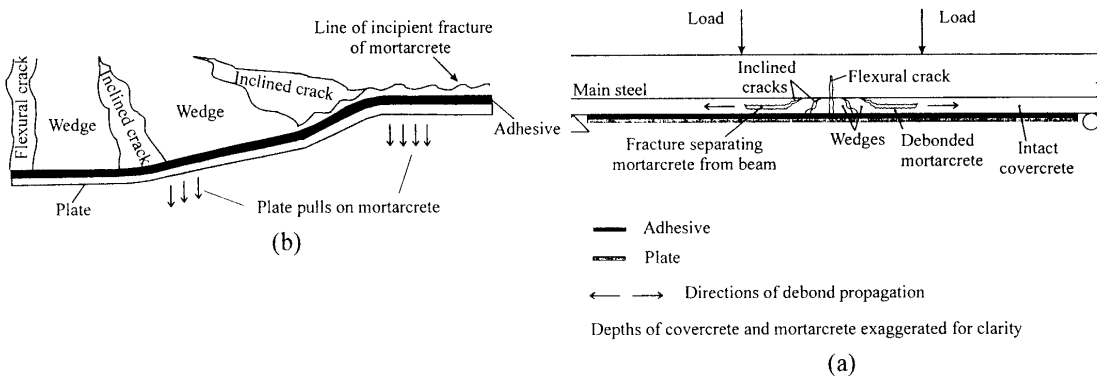
2-2-2- انسلاخ الصفيحة وسط الجائز Midspan Debond :

تسبب التشققات الشاقولية الناتجة عن الانعطاف والحاصلة وسط الجائز تشققات في طبقة التغطية في المنطقة نفسها وتنتشر باتجاه نهائي الصفيحة ويسمى هذا النوع من الانفصال (Midspan Debonded) وهو موضح على الشكل (2).



الشكل (1) الانسلاخ الحاصل في نهاية الصفيحة

(a) شكل الانهيار، (b) آلية تطور الإجهادات الشاقولية بالقرب من نهائي الصفيحة



الشكل (2) الانسلاخ الحاصل وسط الصفيحة

(a) شكل الانهيار، (b) الانسلاخ الموضعي الحاصل في صفيحة التقوية

حيث نلاحظ من خلال الشكل (2-a) بقاء أجزاء من البيتون المتشقق مع اللاصق والصفحة لتشكيل كتلة واحدة بعد الانفصال في حين أن الأجزاء المتبقية من طبقة التغطية تشكل مع الجائر كتلة واحدة متكاملة.

لاحظ العلماء أن هناك طورين لعملية الانفصال وسط الجائر [6] وهما:

- **الطور الأولي:** حيث تتشكل خلاله التشققات الأولية في طبقة التغطية بالقرب من التشققات الناتجة عن الانعطاف كما هو موضح في الشكل (2-a)، وبين الشكل (2-b) اتساع التشققات المائلة الذي يؤدي إلى حصول انفصال موضعي لصفحة التقوية، مما يجعل الصفحة تسحب اللاصق وأجزاء من طبقة التغطية على أحد جوانب الشق المائل فينتج انفصال لطبقة رقيقة من التغطية ويتشكل شق أفقي طولي، ويبقى جزء من طبقة التغطية ملتصقا مع الجائر وتتفصل طبقة الإسمنت والكتل الأخرى بسماكة 6mm وتسمى هذه الطبقة (mortarcrete) حيث يكون انتشار التشققات ضمن طبقة الإسمنت هذه محدداً.

- **طور الانتشار:** تحصل خلال هذا الطور عملية انتشار ذاتي للانفصال بين الصفحة والجائر على طول منطقة التشققات الحاصلة في طبقة الإسمنت، وتزداد على طول الجائر بشكل مستمر مع تزايد الحمولات المطبقة عليه إلى أن تشمل أخيراً كامل منطقة الاتصال بين الجائر والصفحة، وتقتلع الجذور البيتونية (wedges) من بيتون الجائر المحصور بين التشققات المائلة والتشققات الشاقولية (2-a).

تم شرح آلية انفصال صفحة الـ FRP بدءاً من وسط الجائر من قبل عدد من الباحثين كما ورد في [6] نذكر على سبيل المثال (Arduini And Nanni 1997) حيث بينا أن الانفصال يبدأ عند أحد التشققات الشاقولية في منطقة الانعطاف الصافي، وينتشر نحو أطراف الصفحة إلى أن يحصل الانفصال التام عن الجائر، وبين (Rahimi 2001) أن انفصال صفائح الـ FRP من أطرافها لا يعتبر الآلية المميزة للتضرر الأولي، وإنما يبدأ التضرر في منطقة العزم الصافي وسط الجائر.

تعطى قيمة الإجهادات القاصة المنقولة إلى طبقة التغطية (covercrete) عبر اللاصق والمسببة للانفصال بتطبيق علاقات التوازن المحوري على عنصر في جسم الصفحة [6] وهي:

$$\tau = t_p \frac{d\sigma_{mp}}{dx} = t_p E_p \frac{d\varepsilon_{mp}}{dx} \quad (1)$$

حيث: τ : إجهاد القص، t_p : سماكة الصفحة، E_p : معامل مرونة الـ FRP، σ_{mp} : الإجهاد المحوري الأساسي على طول الصفحة، ε_{mp} : التشوه المحوري الأساسي، x : جزء من طول الصفحة (متغير)، حيث يحدد تشوه الصفحة تجريبياً ويعتبر التشوه خطياً خلال سماكة الصفحة .

تظهر العلاقة (1) أن الإجهادات القاصة المسببة للانفصال تتطلب وجود إجهادات محورية لتحقيق التوازن على طول الصفحة، أما مصدر هذه الإجهادات الشادة المحورية فهو الصفحة ذات المقاومة العالية على الشد، وكذلك الإجهادات المحورية الناشئة في البيتون المحصور بين التشققات، كما يشكل صدأ فولاذ التسليح والذي يؤكد وجود التشققات الشاقولية الانعطافية المتجاورة مصدراً آخر للإجهادات المحورية.

الدراسة التجريبية:

1- **عينات الاختبار:** تضمن البرنامج التجريبي أربعة جوائز بسيطة الاستناد بأبعاد (2000×300×160) mm وبمجاز فعال (1800) mm وجميعها مسلحة تسليحاً طويلاً (2Φ14) mm وتسليحاً إنشائياً (2Φ10) mm مع أساور

عرضية قطرها $1\Phi 6\text{mm} / 160\text{ mm}$. صممت الجوائز بالطريقة الحديدية تحت تأثير قوتين مركزيين يتباعد عرضياً 600mm أي ثلث المجاز الفعال، وذلك عن طريق ناقل حمولة وهو عبارة عن جائز صلب مصمت بمقطع $(700 \times 150 \times 150)\text{mm}$ لتحويل الحمل المركز الذي يؤثر به جهاز الانعطاف (Technotest) إلى حمولتين مركزيين، وجميع التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة موضحة في الشكل (3). تم توزيع الجوائز المختبرة إلى مجموعتين:

المجموعة الأولى: B1 تتضمن جائزين معياريين.

المجموعة الثانية: B2 تتضمن جائزين كل منهما مقوى بصفحة إلى الوجه المشدود بسماكة 5 mm وطول 1700 mm حيث تم اقتطاع الصفحة على مسافة 50 mm من المسند.

2- خواص المواد المستخدمة:

حضرت العينات من مواد متوفرة محليا:

- الحصى المستخدمة مكونة من (بحص خشن + بحص ناعم) نظيف خالي من المواد العالقة مصدره منطقة حسيا بالإضافة إلى (رمل خشن + رمل ناعم) نبكي المصدر، وقد حدد الوزن الحجمي لكل من البحص والرمل في مخبر تجريب المواد وكان وفقا للنتائج التجريبية 1550 Kg/m^3 للبحص و 1450 Kg/m^3 للرمل.

- الإسمنت المستخدم في تحضير العينات إسمنت بورتلاندي عادي، وقد صممت الخلطة البيتونية للحصول على مقاومة مميزة 30Mpa ، ويبين الجدول (1) النسب الوزنية لمواد الخلطة البيتونية في المتر المكعب الواحد، حيث اعتمدت هذه النسب في تحضير عينات الاختبار وعينات المراقبة .

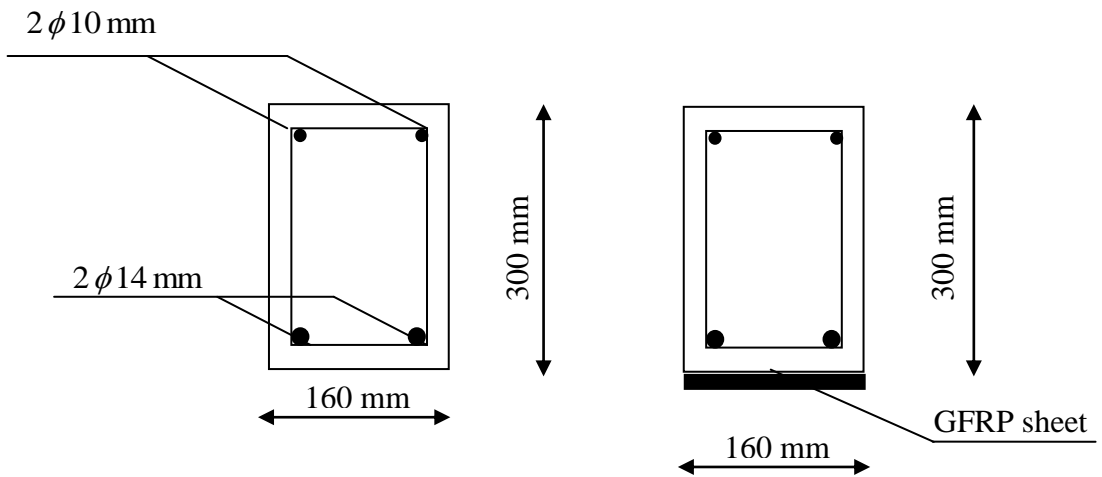
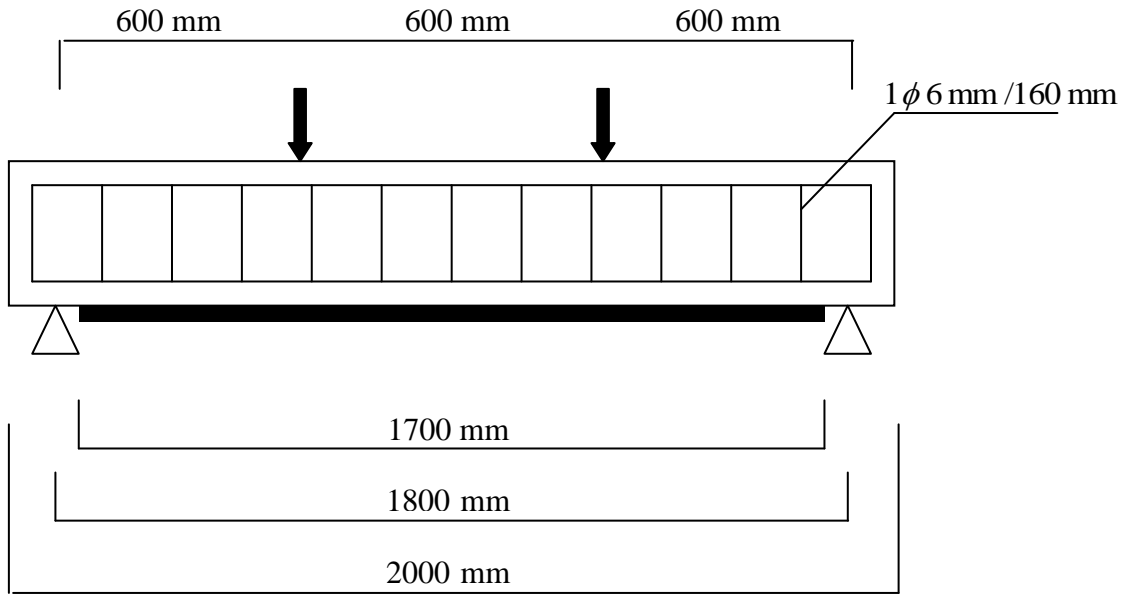
الجدول (1) النسب الوزنية لمواد الخلطة البيتونية في المتر المكعب

المادة	الإسمنت	البحص	الرمل	الماء
الوزن (Kg)	350	1241	580	186
النسبة	1	3.55	1.66	0.53

- فولاذ التسليح المستخدم من النوع المحلزن والأملس روسي المنشأ، ويبين الجدول (2) المواصفات المتعلقة به.

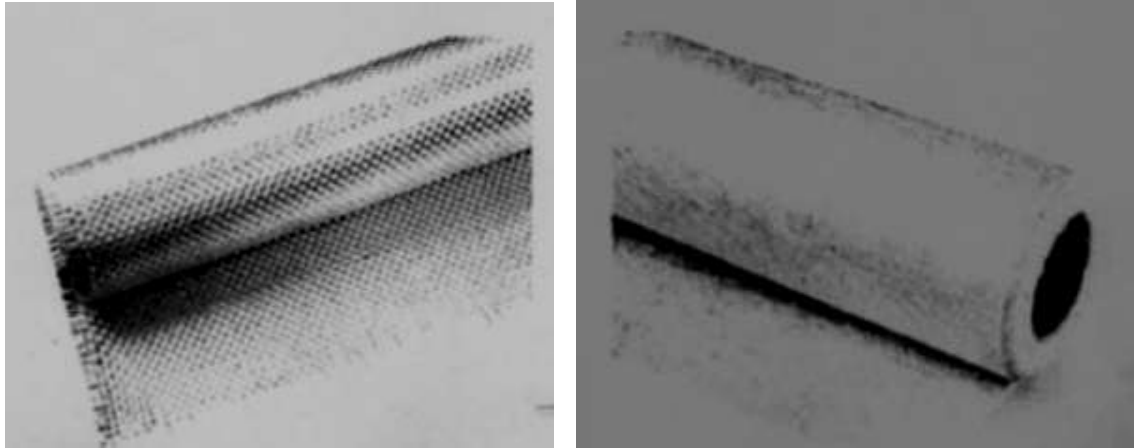
الجدول (2) مواصفات التسليح المستخدم

إجهاد الشد الأقصى F_{cu} (Mpa)	إجهاد الخضوع F_y (Mpa)	نوع الفولاذ	القطر (mm)
305.65	198	أملس	6
617.1	514.65	محلزن	10
651.6	598	محلزن	14



الشكل (3) التفاصيل المتعلقة بالجوائز المختبرة

- أعدت صفائح الـ **GFRP** في المخبر حيث تم تشكيل حصيرة مكونة من طبقات متتالية متناوبة بين ألياف زجاجية منتظمة التوزع متصلبة (**Woven Roving**)، وألياف زجاجية عشوائية (**Chopped Strand Mat**) كما هو موضح في الشكل (4)، وذلك حتى الوصول إلى السماكة المطلوبة ومن ثم تم قص الحصيرة المتشكلة بما يتناسب مع أبعاد الجائز وفق الخطة المحددة لعملية التقوية.



(b)

(a)

الشكل (4) أنواع صفائح الألياف الزجاجية المستخدمة في عملية التقوية
a- ألياف عشوائية b- ألياف منتظمة

أما الألياف المستخدمة في تشكيل الحصيرة فهي ألياف زجاجية من النوع E ويوضح كل من الجدولين (3) و(4) المعطيات التقنية لكل من الـ (**Woven Roving**) والـ (**Chopped Strand Mat**) كما قدمتها الشركة الصانعة.

الجدول (3) خصائص صفائح الألياف المتصلبة والتركييب الليفي لها

Product No	Type of Glass	Filament Diameter (μm)	Density ends/cm) (\times ends	Moisture Content (%)	Size Content (%)
EWR400	E	11	4.0 \times 3.5	<0.3	0.55 \pm 0.25

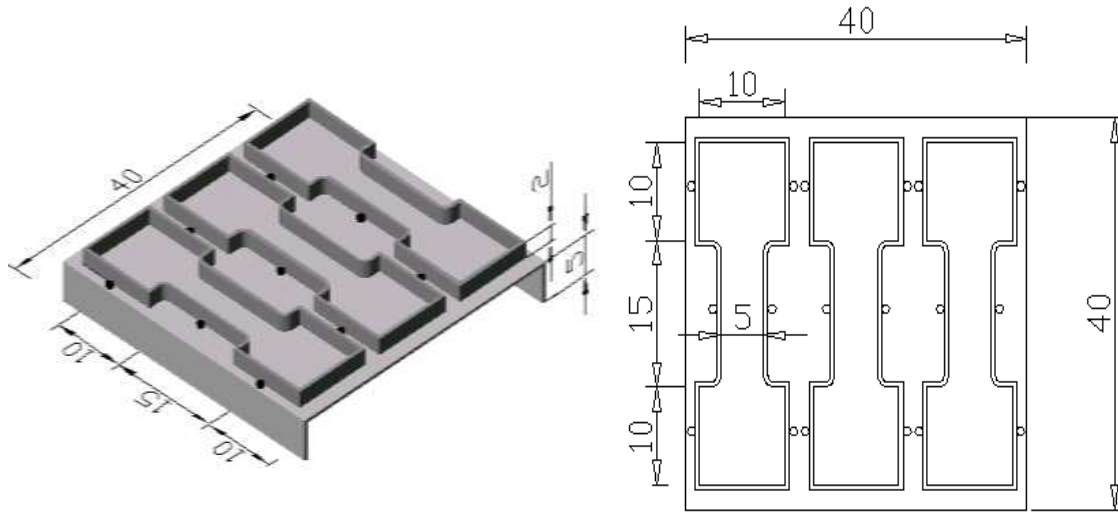
الجدول (4) خصائص صفائح الألياف العشوائية والتركييب الليفي لها

Product No	Type of Glass	Type of Binder	Loss on Ignition (%)	Moisture Content (%)	Available Density (g / m^2)
CSM-4	E	Emulsion	3-5	<0.2	225-900

- اللاصق المستخدم في لصق الصفيحة المحضرة مكون من جزأين (لاصق + مصلب) وبين الجدول (5) المعطيات التقنية لهذا اللاصق مقدمة من قبل الشركة الصانعة وهو من نوع (isophathalic polyester)، وقد أجريت في مخبر تجريب المواد مجموعة من التجارب المتعلقة بتحديد مقاومته على الشد والضغط. حيث تم صب مكعبات بأبعاد $(50 \times 50 \times 50)$ mm لتحديد مقاومته على الضغط وكانت 116 Mpa ، كما تم تفصيل قوالب خاصة لتحديد مقاومة كل من الصفيحة واللاصق على الشد الشكل (5)، وقد أعطت شرائح من اللاصق المستخدم والمصبوبة باستخدام القالب السابق وبسماكة 5 mm مقاومة على الشد وصلت إلى 22 Mpa وسطياً، أما عينات الصفائح المحضرة باستخدام القوالب السابقة مع اللاصق المختار فقد أعطت مقاومة على الشد وصلت إلى 200 Mpa .

الجدول (5) خصائص اللاصق المستخدم

Specific Gravity	Pot-life (min)	Flexural Modulus (Gpa)	Tensile Strength (Mpa)	Compressive Strength (Mpa)	Compressive Strength Development at 20°C (Mpa)
1.5	20	6.5	24	75-120	70



الشكل (5) القالب المستخدم في تحضير العينات المختبرة على الشد

(a) - مسقط أفقي (b) - منظور

(b)

(a)

3- آلية لصق الصفائح:

هناك مجموعة من الإجراءات المتبعة قبل تنفيذ عملية لصق الصفائح، تتمثل في التحضير الأولي للجوائز البيتونية التي مر على عملية صبها 28day كما ورد في [1,3,4,5]، حيث يمرر تيار هوائي مضغوط لكشط الغبار وتنظيف السطوح من بقايا عملية الصب، ومن ثم تتم عملية تخشين السطح البيتوني السفلي المشدود باستخدام تقنية (Sand-blasting) أي تخشين السطح باستخدام الرمل الجاف المعصوف بوساطة جهاز تفريغ صناعي الشكل (6)، بغرض زيادة مساحة سطح اللاصق [3]، لتجري بعدها عملية إزالة الأجزاء الناعمة والغبار وبقية الأجزاء العالقة باستخدام جهاز شفط قوي، ولينحول السطح البيتوني إلي سطح خشن تتكشف فيه الأجزاء البحصية الخشنة حيث يساوي متوسط العمق حول هذه الكتل (1)mm تقريباً، وتغسل الجوائز بتيار مائي لتنظيفها من الغبار وتترك لتجف يوماً واحداً على الأقل.

يمزج اللاصق اللاعضوي من النوع (isophathalic polyester) وردي اللون مع المصلب (مادة الكاتاليت) بنسبة 2%، وذلك باستخدام خلاط كهربائي بطيء الدوران لمدة (1-2)min حتى يصبح المزيج متجانساً يميل إلى اللون الذهبي.

يدهن السطح المخشن باللاصق باستخدام فرشاة الشكل (7)، وتوضع طبقة من الألياف الزجاجية الناعمة (نثرات) كأساس لعملية لصق الصفيحة ثم تتوالى عملية لصق الطبقات المشكلة للصفحة. حيث بدأنا بوضع طبقة من النسيج العشوائي ثم دهن باللاصق مع الضغط باستخدام الفرشاة حتى الوصول لدرجة الإشباع، لتوضع فوقها طبقة من نسيج الألياف المنتظمة وتشبع باللاصق مع الضغط المستمر بحيث يتوزع اللاصق بشكل منتظم ويراعى بقاء سماكته ثابتة على كامل طول السطح البيتوني المراد تقويته. وتتوالى عملية الدهن ومن ثم لصق الطبقات بالتناوب مع استمرار عملية الضغط لإزالة الفراغات المملوءة بالهواء أو بمادة اللاصق الزائدة، وذلك حتى الوصول إلى السماكة المطلوبة (5)mm والتي حصلنا عليها من خلال (أربع طبقات من النسيج المنتظم + ثلاث طبقات من النسيج العشوائي) منضمنة سماكة اللاصق، توضع الفرشاة المستخدمة في وعاء يحوي أحد أنواع المذيبات (نتر - نפט - أسيتون).

يعرض الجائز المقوى إلى تيار هوائي ساخن باستخدام مسخن كهربائي الشكل (8) وذلك لمدة ساعة تقريباً حتى نضمن الجفاف الأولي لللاصق وبالتالي عدم تعرض الألياف للتضرر أو تغير منحائها الأصلي، باعتبار أن المحافظة على وضعية الألياف شرط أساسي للوصول إلى المقاومة المطلوبة على الشد.

يترك بعد ذلك الجائز المقوى لمدة (7)days وهو الزمن اللازم لحصول الجفاف الكامل لمادة اللاصق وبالتالي إمكانية اختبار الجائز، حيث تطلّى الجوائز المراد اختبارها بمادة الكلس البيضاء لسهولة رصد التشققات وآلية انتشارها خلال سير التجارب.



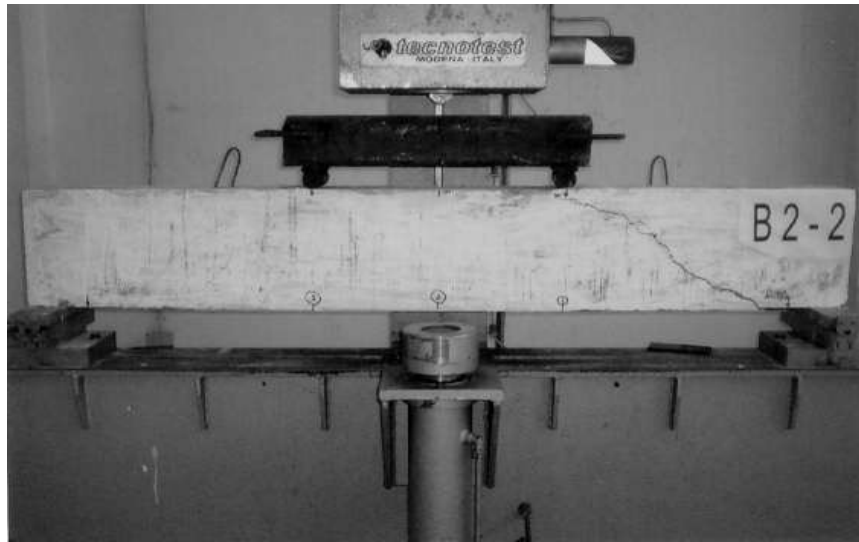


الشكل (7) عملية لصق الصفيحة على الوجه البيتوني المشدود



طريقة الاختبار:

اختبرت الجوائز البيتونية المسلحة المعيارية والمقواة في مخبر البيتون المسلح - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث وذلك باستخدام جهاز الانعطاف (Technotest) الشكل (9)، الذي تبلغ طاقته (100)ton وهو متصل بكمبيوتر يتم من خلاله إدخال سرعة التحميل المقررة والواحدات بالإضافة إلى المواصفات الهندسية للجائز المختبر، وفي كل مرحلة من مراحل التحميل تظهر على الشاشة قيمة القوة المطبقة والإجهاد الأعظمي محسوبة اعتماداً على المعطيات المتعلقة بالجائز.



الشكل (9) جهاز الاختبار

تم قياس السهوم بوساطة عدادات ذات أقراص مدرجة (Dial gauge) بدقة (1division = 0.01mm) وضعت عند منتصف المجاز وعند نقطتي تطبيق القوتين المركزتين، وقد نزعنا عند وصول القوة المطبقة إلى 90%

من الحمولة التصميمية القصوى للجائز المختبر حتى لا تتحطم عند التقدم في عملية التحميل، كما استخدم مجهر يدوي (hand-microscope) ذي دقة ($\pm 0.02\text{mm}$) لقياس اتساع الشقوق.

طبقت الحمولة بشكل متزايد وبعد كل تزايد كان يحافظ على القوة المطبقة لمدة محددة حتى يسمح للجائز بالاستقرار وبعد ذلك تسجل قراءات أجهزة قياس السهم ويحدد اتجاه تطور التشققات وطولها ويقاس اتساع الشق القطري المسيطر.

كان نظام التحميل المقرر والذي تم تنفيذه في هذا البحث (Loading System) على الشكل التالي:

المرحلة الأولى: يحمل الجائز تدريجياً بتزايد قدره (5%) من الحمولة التصميمية ضمن المجال $P_{\max}(0-20)\%$.

المرحلة الثانية: يحمل الجائز بتزايد قدره (10%) من الحمولة التصميمية ضمن المجال $P_{\max}(20-80)\%$.

المرحلة الثالثة: عند الاقتراب من الحمولة التصميمية القصوى للجائز تم التزايد وفقاً للتضرر الذي يحصل للجائز، وقدمت إجراء حوالي (15) تزييداً في الحمولة للجوائز المعيارية و(18) تزييداً للجوائز المقواة وذلك حتى الوصول إلى مرحلة الانهيار.

النتائج والمناقشة:

من خلال الاختبارات التي أجريناها بإمكاننا تحليل نتائج العمل التجريبي تبعاً لمايلي:

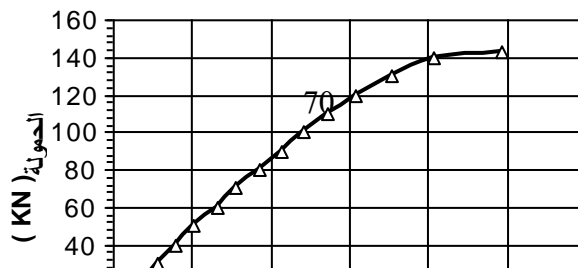
1- قدرة التحمل: يبين الجدول (5) كلا من حمولة التشقق - حمولة التشغيل - الحمولة القصوى وذلك لجميع الجوائز المختبرة، حيث تؤخذ حمولة التشغيل مساوية الحمولة عند سهم لحظي أعظمي مقداره $(\frac{l}{360})$.

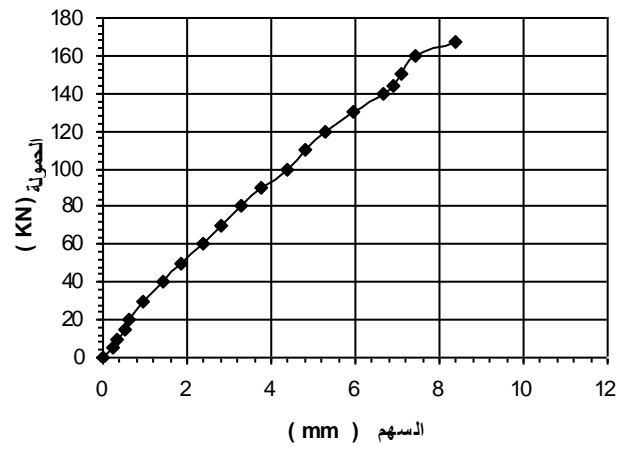
الجدول (5) حمولات (التشقق - التشغيل - القصوى) للجوائز المختبرة

المجموعة	الجائز	الحمولة الموافقة لتشكيل الشق الشاقولي الأول KN	حمولة التشغيل KN P_w	الحمولة القصوى KN P_u
B1	B1-1	30	110	144
	B1-2	30	105	143
B2	B2-1	50	115	167
	B2-2	50	110	166

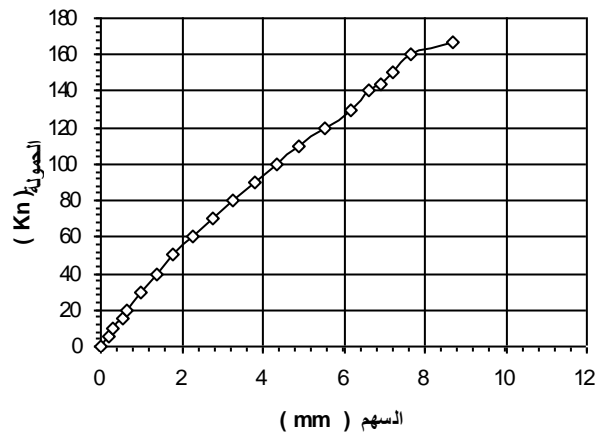
نلاحظ من خلال الجدول (5) فعالية صفيحة GFRP في زيادة الحمولة الموافقة لتشكيل الشق الشاقولي الأول في الجوائز المقواة بنسبة 67% عما هي عليه في الجوائز المعيارية، أما حمولة التشغيل فقد ازدادت بنسبة 4.6% وسطياً. كما ساهمت عملية التقوية في زيادة قدرة التحمل القصوى للجوائز المقواة بنسبة 16% عما هي عليه في الجوائز المعيارية.

2- السهوم: يبين الشكل (10) منحنى (حمولة - سهم) للجائزين المعياريين وسط المجاز كقيمة وسطية، ويظهر الشكلان (11, 12) منحنيات (حمولة - سهم) للجوائز المقواة، حيث نلاحظ تزايد ميل المنحنيات مع تزايد الحمولة المطبقة.

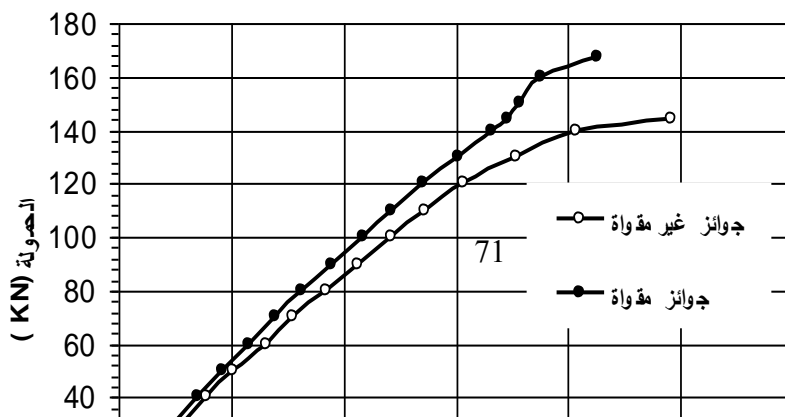




الشكل (11) منحنى (حمولة - سهم) للجائز المقوى B2-1



الشكل (12) منحنى (حمولة - سهم) للجائز المقوى B2-2



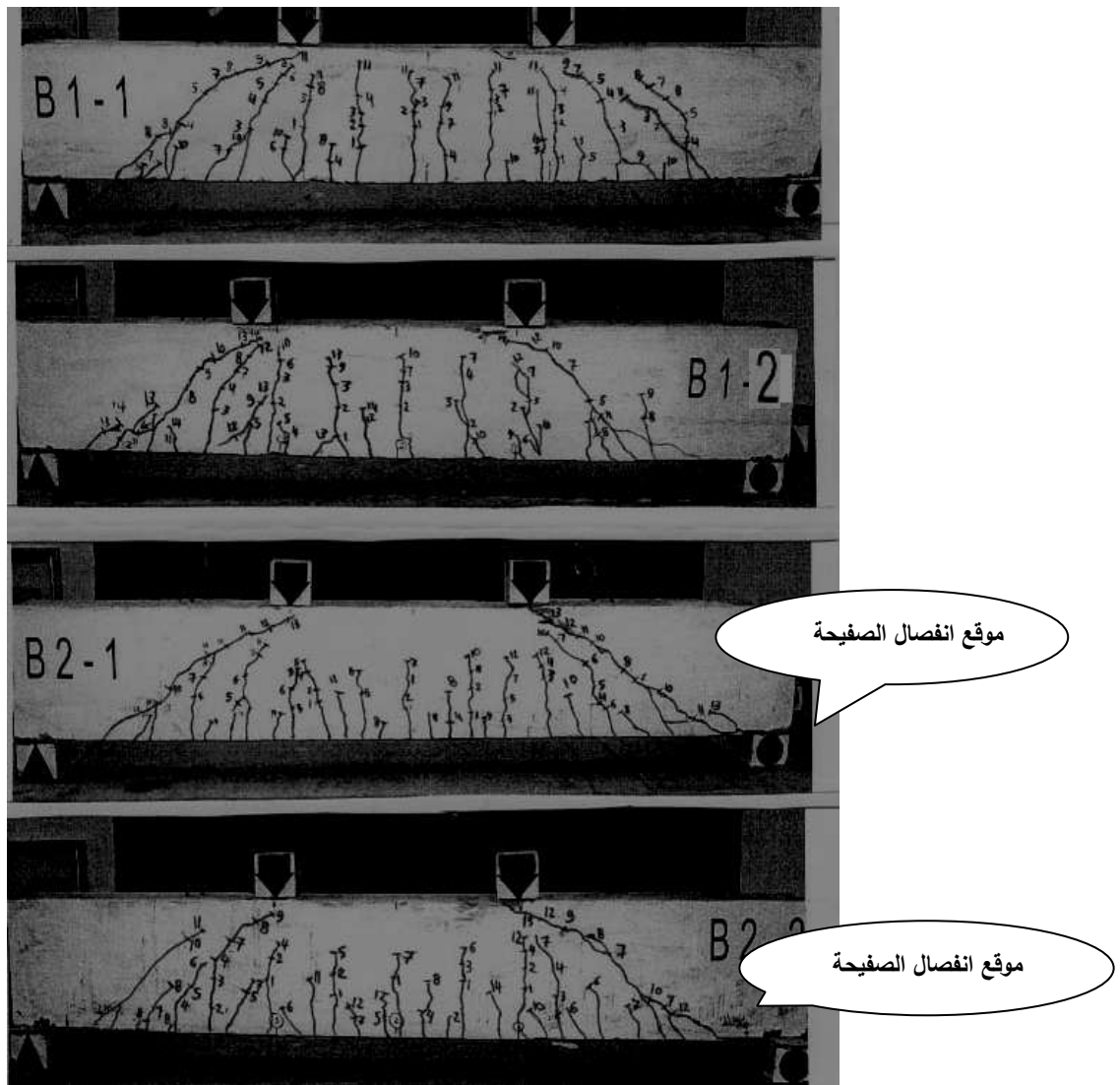
يشير استقرار المنحنيات المبينة في الشكل (13) إلى أنه وخلال مرحلة التحميل الأولية من KN(0-10) انخفضت قيمة السهم في الجوائز المقواة بنسبة %44 وسطياً، أما في مراحل التحميل اللاحقة KN(140-15) فقد انخفضت قيمة السهم بنسبة تراوحت بين % (10-17) عما هي عليه في الجوائز المعيارية. إن قيمة السهم الموافق للحمولة الأعظمية في الجوائز المعيارية بلغت mm(9.85)، في حين كانت قيمته المقابلة للحمولة الأعظمية في الجوائز المقواة mm(8.53)، وبالتالي ساهمت عملية التقوية في تخفيض قيمة السهم الموافق للحمولة الأعظمية بنسبة وصلت إلى % (15.5).

3- أشكال التشققات وآلية الانهيار:

يظهر الشكل (14) كيفية تطور التشققات في الجوائز المدروسة حيث بدأت التشققات الأولية في كلتا المجموعتين بمنطقة الانعطاف الصافي، فكان الشق الشاقولي الأول وسط المجاز في الجوائز المعيارية موافقا للحمولة KN(30)، في حين تأخر تشكله حتى الحمولة KN(50) في الجوائز المقواة، وهذا يعني أن عملية التقوية أدت إلى زيادة في الحمولة المسببة للتشققات الناتجة عن الانحناء بنسبة وصلت إلى % (67). في المرحلة اللاحقة وبعد تطاول فولاذ التسليح بدأت تتشكل التشققات القطرية، حيث ظهر الشق القطري الرئيسي الذي تسبب بالانهيار في المجموعة B1 عند الحمولة KN(80)، في حين تأخر ظهور هذا الشق في جوائز المجموعة B2 حتى الحمولة KN(110)، وبالتالي ساهمت عملية التقوية في زيادة القوة المسببة لتشكّل الشق القطري الرئيسي المسبب للانهيار والمتمثل بانسلاخ الصفيحة في الجوائز المقواة بنسبة % (37.5).

يتضح من الشكل (14) أن عدد التشققات في الجوائز المقواة قد ازداد بنسبة % (18) عما هو عليه في الجوائز المعيارية، وهذا يعود إلى دور صفيحة التقوية في زيادة صلابة الجوائز المقواة وبالتالي تخفيض تطاول فولاذ التسليح. ولكن مع استمرار التحميل يبدأ انتشار انفصال الصفيحة عن الوجه المشدود وذلك على طول الجوائز، فهناك مناطق تتفصل فيها الصفيحة ومناطق أخرى تبقى ملتحمة إلى الجوائز وهذا ما يتسبب في تطاول فولاذ التسليح على طول المجاز بنسب مختلفة، حيث يزداد في مناطق الانفصال فتحصل زيادة في عدد التشققات، إضافة إلى تشكل إجهادات محورية كبيرة متدرجة بين المناطق المفصولة والمناطق الملتحمة، مما يؤدي إلى انهيار الجوائز حيث يحصل

انسلاخ للصفحة قبل استثمار كامل مقاومتها على الشد. يمكننا ملاحظة أن عملية التقوية قد ساهمت في تغير آلية انتشار التشققات، فعمق التشققات الشاقولية في الجوائز المقواة استمر إلى ارتفاع وصل إلى % (59) من الارتفاع الكلي للجوائز، في حين وصل هذا العمق إلى % (81) من الارتفاع الكلي في الجوائز المعيارية، وبالتالي يمكننا القول إن التقوية بصفائح الألياف الزجاجية على الوجه المشدود قد حذت من امتداد التشققات الناتجة عن الانحناء بنسبة % (22).



الشكل (14) آلية انتشار التشققات في الجوائز المدروسة

تشير المشاهدات التجريبية إلى أن ظهور الشق القطري المتسبب في انهيار الجوائز المعيارية قد بدأ على بعد 13cm من المسند، في حين بدأ بالتشكل في الجوائز المقواة على بعد 5cm من المسند أي من طرف الصفحة، وهذا ما يشير إلى أهمية المسافة الفاصلة بين المسند وطرف الصفحة. فعلى الرغم من أن هذا الحيز صغير، غير أنه ضروري ففي الوقت الذي تكون فيه التشوهات المحورية في نهايات الصفحة معدومة تتولد تشوهات محورية في البيتون

وفي المناطق المجاورة لنهاية الصفيحة، ونتيجة الصلابة المقاومة للقص في مادة اللاصق فإن الصفيحة تحاول التمسك بالبيتون، وتتغير قيمة التشوه المحوري من القيمة (0) عند نهايتي الصفيحة إلى قيمة محددة مقارنة لقيمة التشوه الحاصل في البيتون وممتد إلى مسافة قريبة من نهايتي الصفيحة وهذا ما تؤكدته المراجع [6,7]، وبالتالي تحصل تغيرات مهمة في الإجهادات المحورية وعلى مسافات قصيرة من نهايات الصفيحة، وهذا يتطلب إجهادات قص كبيرة لتحقيق التوازن في نهايات الصفيحة وهذه الإجهادات تنتقل من الصفيحة إلى طبقة التغطية (covercrete) عبر مادة اللاصق.

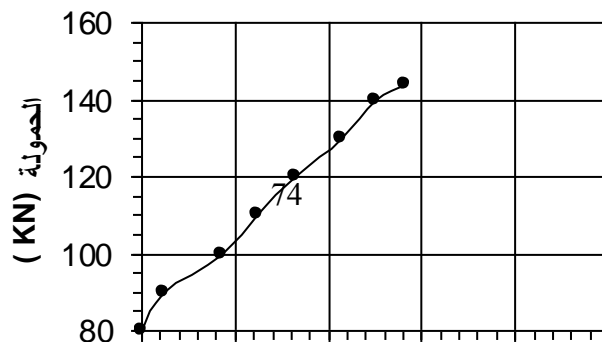
يسبب التواجد المشترك لكل من إجهادات القص والإجهادات الشاقولية في طبقة التغطية بالقرب من نهايتي الصفيحة حدوث تشققات مائلة، وسحب لأجزاء من طبقة التغطية الملتصقة مع نهايتي الصفيحة وهذا يؤدي لحصول الانسلاخ.

يبين الجدول (6) قيم اتساع الشق القطري الرئيسي المسيطر المسبب للانتهيار عند مستوى حديد التسليح العامل وذلك لكل مجموعة كقيمة وسطية.

الجدول (6) القيم الوسطية لعرض الشق القطري الرئيسي في الجوائز المدروسة

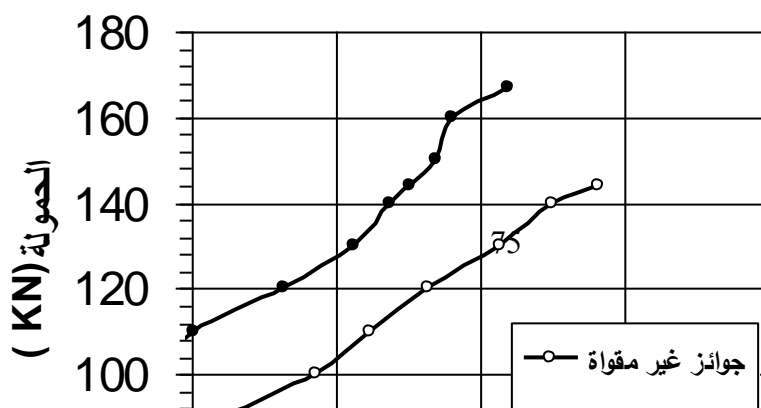
الحمولة (KN)	80	90	100	110	120	130	140	144	150	160	167
اتساع الشق القطري في الجوائز المعيارية (mm)	0.08	0.22	0.53	0.72	0.92	1.17	1.45	1.5	-	-	-
اتساع الشق القطري في الجوائز المقواة (mm)	-	-	-	0.11	0.42	0.66	0.79	-	0.95	1	1.2

يمثل الشكلان (15 و 16) منحنيي (حمولة - اتساع الشق القطري) وذلك كقيمة وسطية لكل مجموعة، حيث كان هناك تقارب في قيم اتساع الشق القطري المسيطر ضمن المجموعة الواحدة لذلك تم أخذ القيمة الوسطية. تظهر المنحنيات المبينة في الشكل (17) أن عرض الشق القطري الرئيسي الموافق للحمولة الأعظمية في الجوائز المقواة أقل بنسبة % (25) عما هو عليه في الجوائز المعيارية، ومن ناحية أخرى أدت عملية التقوية إلى زيادة في الحمولة الموافقة لتشكل الشق القطري الرئيسي بنسبة % (37.5).





الشكل (16) منحنى (حمولة - اتساع الشق القطري) للجائزين المقويين كقيمة وسطية



الاستنتاجات والتوصيات:

- استناداً إلى الدراسة التجريبية التي تم عرضها في هذا البحث، والمتضمنة تأثير عملية التقوية بصفائح الـ GFRP المملوكة خارجياً على العمل الإنشائي للجوائز البيتونية المسلحة، فقد تم التوصل إلى النتائج والتوصيات التالية:
1. ازدادت قدرة التحمل القصوى للجوائز المقواة بنسبة % 16.
 2. ساهمت عملية التقوية في تخفيض قيمة السهم الموافق للحمولة الأعظمية بنسبة % 15.5.
 3. ازدادت الحمولة المسببة للتشققات الناتجة عن الانحناء في الجوائز المقواة بنسبة % 67.
 4. ازدادت القوة المسببة لتشكيل الشق القطري المسيطر، والمسبب لانتهيار في الجوائز المقواة بنسبة % 37.5.
 5. انخفضت قيمة عرض الشق القطري الرئيسي بنسبة % 25 عما هي عليه في الجوائز المعيارية.
 6. أظهرت الاختبارات ضرورة تثبيت الصفيحة من نهاياتها، لضمان عدم انسلاخها قبل الاستفادة من كامل مقاومتها.

إن الدراسة قيد الاستكمال، حيث أجريت مجموعة من الاختبارات الإضافية بهدف تحديد تأثير عوامل أخرى على العمل الإنشائي للجوائز المقواة بصفائح الـ GFRP، وسوف تعرض نتائجها في دراسة لاحقة.

المراجع:

- [1]- KURTZ , S. and BALAGURU, P. *Comparison Of Inorganic And Organic Matrices For Strengthening Of RC Beams With Carbon Sheets*. Journal of Structural Engineering U.S.A. Vol. 127, NO. 1, 2001, 35-42 .
- [2]- TRIANTAFILLOU ,T. and ANTONOPOULOS ,C. *Design Of Concrete Flexural Members Strengthened In Shear With FRP*. Journal Of Composites For Construction U.S.A. Vol.4, No.4, 2000 ,198-205.
- [3]- ARDUINI ,M. and NANNI, A. *Behavior Of Precracked RC Beams Strengthened With Carbon FRP Sheets*. Journal Of Composites For Construction U.S.A. Vol.1, No.2, 1997, 63-70.
- [4]- SPADEA ,G., BENCARDINO, F.and SWAMY, N. *Structural Behavior Of Composite RC Beams With Externally Bonded CFRP*. Journal Of Composites For Construction U.S.A. Vol.2, No.3, 1998,132-137.
- [5]- ALEX, L., ASSIH, J. and DELMAS,Y. *Shear Strengthening Of RC Beams With Externally Bonded CFRP Sheets*. Journal Of Structural Engineering U.S.A. Vol.127, No.4, 2001, 374-380.
- [6]- SEBASTIAN, W. *Significance Of Midspan Debonding Failure In FRP-Plated Concrete Beams*. Journal of Structural Engineering U.S.A. Vol.127, No.7, 2001, 792-798.
- [7]- HOLLAWAY,L. C. and LEEMING, M. B. *Strengthening of reinforced concrete structures*, CRC, London ,1999, 327.