

# إختبارات على سلوك الإنحناء بالكمرات الخرسانية المدعمة بألياف البوليمر

د. أبو القاسم محمد العربي د. عمران محمد كنشيل  
قسم الهندسة المدنية – كلية الهندسة  
جامعة طرابلس

## ملخص:

تتنوع تطبيقات ألياف البوليمر المركبة (FRPs composites) في الهندسة المدنية، حيث إستخدمت في التسليح الداخلي للعناصر الخرسانية وكذلك في التقوية والدعم الخارجي لهذه العناصر.

في السنوات الأخيرة إزداد استخدام البوليمر المقوى بالألياف (Fiber Reinforced Polymer) أو ماتعرف إختصاراً بـ (FRP) الخفيفة الوزن في دعم وترميم المنشآت الخرسانية بدلاً من استخدام مواد الدعم التقليدية التي تستخدم الحديد والخرسانة.

تحتاج العناصر الخرسانية إلى التقوية عندما تكون مقاومتها غير كافية نتيجة التغير في استخدام المنشأة أو نتيجة أخطاء في التصميم أو التنفيذ. أيضاً قد تحتاج العناصر الإنشائية إلى الترميم والأصلاح في حالات نقص تحمليتها نتيجة لتعرضها للتأثيرات البيئية المختلفة أو تعرضها لأعمال التخريب المتعمد أو أي أخطاء أخرى تنشأ بفعل الإنسان.

تستخدم ألياف البوليمر المركبة في التقوية الخارجية للمنشآت لغرض تحسين أدائها للانحناء والقص بالنسبة للكمرات الخرسانية وذلك عن طريق إلصاق ألياف البوليمر بالسطح الخارجي للكمرات.

هذه الدراسة جاءت لأختبار مدى كفاءة ألياف البوليمر في دعم وتقوية الكمرات الخرسانية وذلك باستخدام ألياف الكربون وألياف الزجاج. تم تنفيذ وإختبار مجموعة من الكمرات الخرسانية الغير مدعمة وأخرى مدعمة بألياف البوليمر. الدراسة شملت استخدام ألياف الكربون أحادية الإتجاه وألياف الكربون والزجاج ثنائية الإتجاه.

نتائج اختبارات مقاومة الإنحناء (Flexural strength) وكذلك الليونة (Ductility) وشكل الإنهيار (Mode of failure) تم مناقشتها، حيث لوحظ تحسن كبير في هذه النتائج.

## مقدمة (Introduction) :

ألياف البوليمر استخدمت بنجاح منذ فترة زمنية طويلة في صناعة الطائرات والمركبات الفضائية . حالياً وجدت ألياف البوليمر طريقها للإستخدام في تطبيقات الهندسة المدنية، حيث استخدمت التقوية الخارجية لتحسين أداء المنشآت مثل تقوية الأعمدة الخرسانية وذلك عن طريق عمل طوق بألياف البوليمر حول المحيط الخارجي للعمود لزيادة المقاومة والليونة، وكذلك تستخدم لزيادة مقاومة الإنحناء والقص بالأساق ألياف البوليمر على السطح الخارجي للكمرات والأسقف. [1]

في الغالب يوجد ثلاثة أنواع من ألياف البوليمر يتم استخدامها في أعمال الهندسة المدنية، وهي الزجاج والأراميد، وألياف الكربون. الخصائص الفيزيائية والميكانيكية تختلف ليس فقط بين أنواع هذه الألياف ولكن أيضا لنفس النوع من الألياف [2].

**الألياف الزجاجية (Glass fibers):** الألياف الزجاجية تصنف إلى ثلاثة أنواع: الزجاج (E-glass) E، الزجاج (S-glass) S، وألياف الزجاج المقاوم للقلويات (AR-glass) AR. الزجاج E هو زجاج مع مركب بورسيليكات ألومنيات الكالسيوم ويحتوي على نسبة القلوية القصوى 2.0% ويعتبر الأفضل في مختلف التطبيقات العامة. كما يعتبر مقاوم جيد للحرارة والكهرباء. تعتبر الألياف الزجاجية E-glass منخفضة المقاومة للقلويات. ألياف الزجاج S-glass ، ويدخل في تكوينها ألومنيات سيليكات المغنيسيوم، ويتميز بقوة شد عالية ومقاوم جيد للحرارة. لمنع الألياف الزجاجية من التآكل بفعل القلوية العالية في الاسمنت، يتم إضافة كمية كبيرة من الزركون لإنتاج الزجاج المقاوم للقلويات. الزجاج AR-glass له خصائص ميكانيكية مشابهة لزجاج E-glass. [2]

**ألياف الأراميد (Aramid fibers):** ألياف الأراميد هي ألياف ذو تركيبة قوية تستخدم غالباً في صناعة الطائرات والمركبات الفضائية وكافة التطبيقات العسكرية وكبديل لمادة الأربستوس. أسم الأراميد هو مختصر من "البولي ميد العطرية" "aromatic polyamide" وهي عبارة عن جزئيات ذو سلسلة ذات إرتباط قوي في إتجاه محور الألياف وبالتالي قوة الرابطة الكيميائية يمكن الاستفادة منها. أول إستخدام لألياف الأراميد كان في سنة 1971. [3,4]

**ألياف الكربون (Carbon fibers):** تتميز ألياف الكربون بالديمومة (Durability) العالية والأداء الجيد تحت تأثير الفشل (Fatigue) الناتج عن التحميل في ضو الظروف البيئية الساخنة الرطبة. [4,5] ألياف الكربون تعرف بأنها ألياف تحتوي على ما لا يقل عن نسبة 90% من الكربون. أول ظهور لألياف الكربون كان في سنة 1879 عندما حصل اديسون (Edison)

على براءة اختراع تصنيع خيوط الكربون المناسبة في استخدام المصاييح الكهربائية [6]. إلا أن إنتاج ألياف الكربون ودخولها كمنتج تجاري كان في الستينات "1960s" وذلك تلبية لصناعة الطيران.

تعتبر ألياف البوليمر بمفردها محدودة الاستخدام في تطبيقات الهندسة المدنية لأنه لا يمكنها نقل الأحمال من سطح إلى آخر، ولهذا تلعب المادة الرابطة (matrix material) دوراً مهم في وظيفة ألياف البوليمر حيث إنها تعمل على ربط ألياف البوليمر مع بعضها لتمكنها من نقل الأحمال وتوفير لها الحماية ضد التأثيرات البيئية المختلفة والأضرار الناجمة عن المناولة. المواد الرابطة لها عدة أنواع مثل البوليستر (Polyester) والفينيل إيستر (Vinyl-ester) والأيبيوكسي (Epoxy). يعتبر الأيبوكسي من المواد البوليمرية الأكثر شيوعاً ويستخدم عادة مع الألياف العالية الأداء.

وفق التقارير العلمية المعدة بهذا الشأن، فإن بداية التطبيقات لأعمال التقوية كان في أواخر سنة 1960 في جنوب أفريقيا حيث تم تقوية كمرات خرسانية في مكتب بأحد المباني وذلك باستخدام ألواح الصلب [7]. منذ ذلك الحين، انتشرت العديد من الأبحاث والتطبيقات في تقوية العناصر الإنشائية باستخدام ألواح الصلب. في العقد الماضيين استخدمت أنواع مختلفة من ألياف البوليمر. مقارنة بألواح الصلب، ألياف البوليمر لها عدة مزايا، بالإضافة إلى مقاومتها للتآكل الذي يعطيها عمر خدمي أطول وصيانة أقل، ألياف البوليمر تتميز بأنها خفيفة الوزن وهذا يقلل من تكلفة العمل وسهولة المناولة ولاتحتاج إلى عدد كبير من العمال في الموقع، كما أن ألياف البوليمر تكون في أطوال ولفات كبيرة يمكن قصها وتشكيلها بالطول والشكل المطلوبين للعمل.

جاءت هذه الورقة لدراسة دور ألياف البوليمر المركبة (FRPs composites) في تحسين أداء الكمرات الخرسانية سوى المدعمة بألياف الكربون أو ألياف الزجاج. العديد

من عينات الكمرات الخرسانية تم تقويتها وأخرى غير مقواة تم تنفيذها وأختبارها ومن تم مقارنتها.

### البرنامج العملي (Experimental Program):

#### مكونات الخلطة الخرسانية (Concrete Mix Compositions)

جميع العينات الخرسانية التي تم تنفيذها في هذه الدراسة تتكون من الأسمنت البورتلاندي (Type I Portland cement) و ركام الحجر الجيري (crushed limestone) مقاس 12.5 ملم وركام مقاس 9 ملم (P-Stone) وكذلك الرمل (2NS-Sand) كما هو موضح بالجدول (1). كانت نسب الخلطة الخرسانية ( 1 : 3.2 : 1.95 : 0.52 ) ( أسمنت: ركام خشن: ركام ناعم: ماء) على التوالي.

جدول (1) مكونات الخلطة الخرسانية

المكونات الخرسانية	الكمية (كغ/م <sup>3</sup> )
أسمنت	(353)
ركام خشن ( كسر الحجر الجيري)	(566.75)
ركام خشن	(566.75)
ركام ناعم	(687.0)
ماء	(187.0)

#### خواص ألياف البوليمر المستخدمة في هذه الدراسة (FRP Material Properties):

ألياف البوليمر المستخدمة في هذه الدراسة تم توفيرها من مصدرين مختلفين، وكانت على النحو التالي:

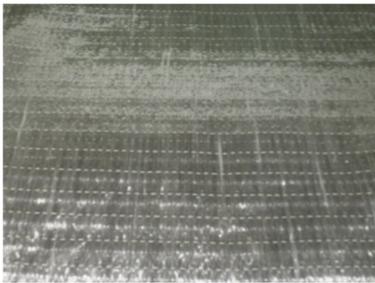
- ألياف الكربون ثنائي الإتجاه (SikaWrap Hex 113 Bi-directional (0°/90°)) الشكل (1).

- ألياف الزجاج أحادي الإتجاه (SikaWrap Hex 100G glass fiber sheets) الشكل (2).

- ألياف الكربون أحادي الإتجاه (Tyfo SCH-41 Carbon fabric) شكل (3).

- ألياف الزجاج أحادي الإتجاه (Tyfo SEH-51A glass fabric) شكل (4).

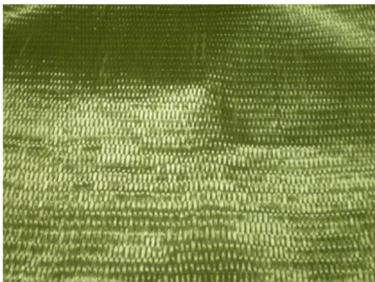
كما تم استخدام مادة سيكادور 300 عالية المقاومة ( Sikadur 300 high-modulus and high strength resin ) وكذلك مادة (Tyfo S saturant epoxy) كمواد رابطة (binder). الخواص الميكانيكية لهذه المواد موضحة في الجداول من (2 - 5).



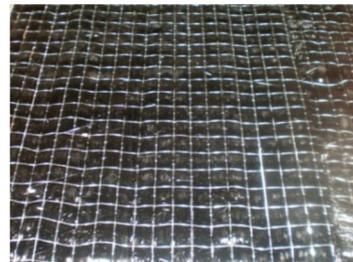
شكل (2) ألياف الزجاج أحادي الإتجاه ( SikaWrap Hex 100G glass fiber sheets)



شكل (1) ألياف الكربون ثنائي الإتجاه ( SikaWrap Hex 113 Bi-directional (0°/90°)



شكل (4) ألياف الزجاج أحادي الإتجاه (Tyfo SEH-51A glass fabric)



شكل (3) ألياف الكربون أحادي الإتجاه ( Tyfo SCH-41 Carbon fabric)

جدول (2) خواص ألياف الكربون ثنائي الإتجاه (0°/90°) (SikaWrap Hex 113 Bi-directional)

وألياف الزجاج أحادي الإتجاه (SikaWrap Hex 100G glass fiber sheets)

ألياف الزجاج أحادي الإتجاه SikaWrap Hex 100G ) glass fiber sheets	ألياف الكربون ثنائي الإتجاه SikaWrap Hex 113 Bi- (directional (0°/90°)	بيان الخاصية (Typical Data)
أبيض	أسود	اللون
0° (أحادي الإتجاه)	90°/0° (ثنائية الإتجاه)	إتجاه الألياف الأساسي
27 oz. (913 g/m <sup>2</sup> )	5.7 oz. (196 g/m <sup>2</sup> )	الوزن لكل يار مربع
Fiber Properties خواص الألياف		
3.3x10 <sup>5</sup> psi (22,76 MPa)	5x10 <sup>5</sup> psi (3450 MPa)	مقاومة الشد
10.5x10 <sup>6</sup> psi (72,413 MPa)	33.4x10 <sup>6</sup> psi (230000MPa)	معامل الشد
4%	1.5%	الإستطالة
0.092 Ibs/in <sup>3</sup> (2.54 g/cc)	0.065 Ibs./in <sup>3</sup> (1.8 g/cc)	الكثافة
0.014 in (0.359 mm)	-	السلك الطبيعي
Cured Laminate Properties Design Values* القيم التصميمية وخواص الصفائح المعالجة*		
77,100 psi (531MPa)	66000 psi (456MPa)	مقاومة الشد
3.4x10 <sup>6</sup> psi (23,607 MPa)	6.0x10 <sup>6</sup> psi (41,400MPa)	معامل الشد
2.12%	1.2%	الإستطالة عند القطع
0.04 in (1.016 mm)	0.01 in (0.25 mm)	السلك

\* خواص الصفائح المعالجة بالأيبوكسي سيكادور 300 (Sikadur Hex 300). الخواص ما بعد

المعالجة في

[70°-75°F (21°-24°C)-5 days, 48 hours at 140°F(60°C)

جدول (3) خواص ألياف الكربون أحادي الإتجاه (Tyfo SCH-41 Carbon fabric) وألياف الزجاج أحادي

الإتجاه (Tyfo SEH-51A glass fabric)

ألياف الزجاج أحادي الإتجاه Tyfo SEH-51A glass ) fabric	ألياف الكربون أحادي الإتجاه Tyfo SCH-41 Carbon ) (fabric	بيان الخاصية (Typical Data)
أبيض	أسود	اللون
( أحادية الإتجاه ) 0°	( أحادية الإتجاه ) 0°	إتجاه الألياف الأساسي
27 oz. (915 g/m <sup>2</sup> )	19 oz. (644 g/m <sup>2</sup> )	الوزن لكل يار مربع
Fiber Properties خواص الألياف		
470,000psi (3.24GPa)	550,000 psi (3.45GPa)	مقاومة الشد
10.5x10 <sup>6</sup> psi (72.4GPa)	33.4x10 <sup>6</sup> psi (230GPa)	معامل الشد
4.5%	1.7%	الإستطالة
0.092 lbs./in <sup>3</sup> . (2.55 g/cc)	0.063 lbs./in <sup>3</sup> (1.74 g/cm <sup>3</sup> )	الكثافة
Cured Laminate Properties Design Values القيم التصميمية وخواص الصفائح المعالجة*		
66,720 psi (460 MPa)	121,000 psi (834 MPa)	مقاومة الشد
3.03x10 <sup>6</sup> psi (20.9 GPa)	11.9x10 <sup>6</sup> psi (82 GPa)	معامل الشد
1.76%	0.85%	الإستطالة عند القطع
0.046 in. (1.18 mm)	0.04 in (1.0 mm)	السماك

جدول (4) الخواص الميكانيكية للأيبوكسي سيكادور 300 (Sikadur300) (دليل المصنع)

الخواص الميكانيكية بعد 14 يوم معالجة عند درجة حرارة 23°C (73°F) ورطوبة نسبية 50%		
القيم النموذجية للاختبار (Typical Test Value)	ASTM Method	الخاصية (Property)
8,000 psi (55 MPa)	D-638	مقاومة الشد
2.5x10 <sup>6</sup> psi (1,724 MPa)	D-638	معامل الشد
3.0%	D-638	نسبة الإستطالة
11,500 psi (79 MPa)	D-790	مقاومة الأنحاء
5x10 <sup>5</sup> psi (3,450 MPa)	D-790	معامل الأنحاء

جدول (5) الخواص الميكانيكية للأبيوكسي (Tyfo S Saturant) (دليل المصنع)

الخواص الميكانيكية بعد 72 ساعة معالجة عند درجة حرارة 60°C (140°F)		
القيم النموذجية للاختبار (Typical Test Value)	ASTM Method	الخاصية (Property)
180°F (82°C)	D-4065	درجة حرارة التحول الزجاجي
10,500 psi (72.4 MPa)	D-638	مقاومة الشد <sup>1</sup>
461,000 psi (3.18 GPa)	D-638	معامل الشد
5.0%	D-638	نسبة الإستطالة
17,900 psi (123.4 MPa)	D-790	مقاومة الأحناء
452,000 psi (3.12 GPa)	D-790	معامل الأحناء

1 درجة الأختبار 21oC (70 oF).

#### إعداد وتجهيز سطح الخرسانة لإستقبال البوليمر (Surface Preparation):

لضمان الحصول على ترابط قوي بين سطح الخرسانة المراد تدعيمه وبين ألياف البوليمر- يجب أن يكون سطح الخرسانة خالياً تماماً من أي مواد عالقة به كالزيوت والغبار وغيرها، وان يكون مستوياً وغير خشن، ولا يوجد به أي نتوءات أو فراغات، وفي حالة وجود أي فراغات يجب حشوها بمادة الأبيوكسي.

في هذه الدراسة، للحصول على ترابط قوي بين سطح الخرسانة وأوراق ألياف البوليمر تم تجهيز السطح السفلي لعينات الكمرات الخرسانية وفق الخطوات التالية:

1. بعد أن تم إزالة العينات الخرسانية من المياه تم رش السطح المراد تدعيمه بمادة رغوية منظفة لأزالة أي زيوت قد تكون عالقة على السطح بسبب دهان القوالب قبل عملية صب الخرسانة.

2. تم تنظيف السطح بإستخدام فرشاة حديدية.

3. تنظيف السطح بالفرشاة والماء لضمان خلوه من أية أوساخ أو أي مواد أخرى.
4. تركت جميع العينات مدة 48 ساعة لتجف قبل وضع مادة الأيبوكسي.

### خطوات إصاق أوراق ألياف البوليمر (Bonding of FRP Sheet Procedures)

بعد التأكد من جفاف سطح العينة الخرسانية تماماً، يتم خلط مركبي مادة الأيبوكسي (أ و ب) بنسبة 100:34.5 بالوزن. تم استخدام خلاط كهربائي (A mechanical drill equipped) بسرعة منخفضة تتراوح بين 400-600 دورة/ الدقيقة لخلط مركبي مادة الإيبوكسي الرابطة حتى يصبح الخليط متجانس. يكون زمن الخلط عادة في حوالي 5 دقائق. تم وضع مادة الأيبوكسي على السطح المستهدف من العينة الخرسانية باستخدام فرشاة كما هو موضح بالشكل (5) وكذلك تم دهان ورقة ألياف البوليمر بعد أن تم قصها وتجهيزها بالطول والعرض المطلوبين، بعد ذلك تم مناولة ورقة البوليمر التي تم تشييعها بمادة الأيبوكسي ووضعها بعناية على السطح الخرساني المستهدف، يتم الضغط على ورقة البوليمر للتخلص من أي فراغات وضمان إلتصاقها مع سطح الخرسانة. تترك العينات مدة 14 يوم في درجة حرارة المعمل للمعالجة.



شكل (5) وضع الأيبوكسي على سطح الكمرة الخرسانية

### إختبار مقاومة الإنحناء (Flexural Strength Test Procedure):

تم إخضاع جميع عينات الكمرات الخرسانية التي تم تجهيزها بإبعاد (50 سم x 10 سم x 10 سم) إلى إختبار الإنحناء بحيث كان التحميل عند منتصف العينة وفقاً للمواصفة الأمريكية (ASTM C293)، شكل (6). تم التحميل تدريجياً بحيث كانت الزيادة بالازاحة ثابتة بمعدل 0.003 ملم/الثانية و تسجيل قراءات الحمل والازاحة كل 0.8 ثانية حتى الإنهيار. جميع الاختبارات أجريت في درجة حرارة المختبر .

### النتائج (Results)

#### عينات الكمرات الخرسانية الغير مدعمة بألياف البوليمر (Unstrengthened Concrete Beams)

ثلاثة كمرات خرسانية B2, B21, B67 تم أختيارها من دفعات مختلفة ( أعدت في فترات زمنية مختلفة) لتكون عينات مرجعية (control specimens)، حيث تم أختبارها لمقاومة الإنحناء بتحميلها في منتصف الكمرة وفقاً للمواصفة الأمريكية ASTM C293-08، بعد أن تمت معالجتها لفترة 28 يوم في الماء. لتطبيق مبداء الجودة للخلطة الخرسانية، أعمال الصب والمعالجة لجميع العينات تمت في نفس الظروف. كما موضح بالجدول (6) ، متوسط أعلى حمل إنحناء لهذه العينات الثلاث كان 13.28 كيلونيوتن (KN) (13.28 باوند) ومتوسط أعلى مقاومة إنحناء كانت 5.79 MPa (840psi) . شكل الإنهيار (Failure mode) لجميع هذه العينات كان إنهيار إنحناء (flexural failure)، حيث بدأ التشقق عند أسفل منتصف الكمرة ثم أنتشر عمودياً إلى أعلى. الشكل (7).



شكل (7) إنهيار الإنحناء للكمرة B2 (عينة مرجعية)  
Flexural failure of B2 "control specimen"



شكل (6) اختبار مقاومة الأنحناء للكمرة B21 (عينة مرجعية)  
Flexural strength test, B5 "Control Specimen"

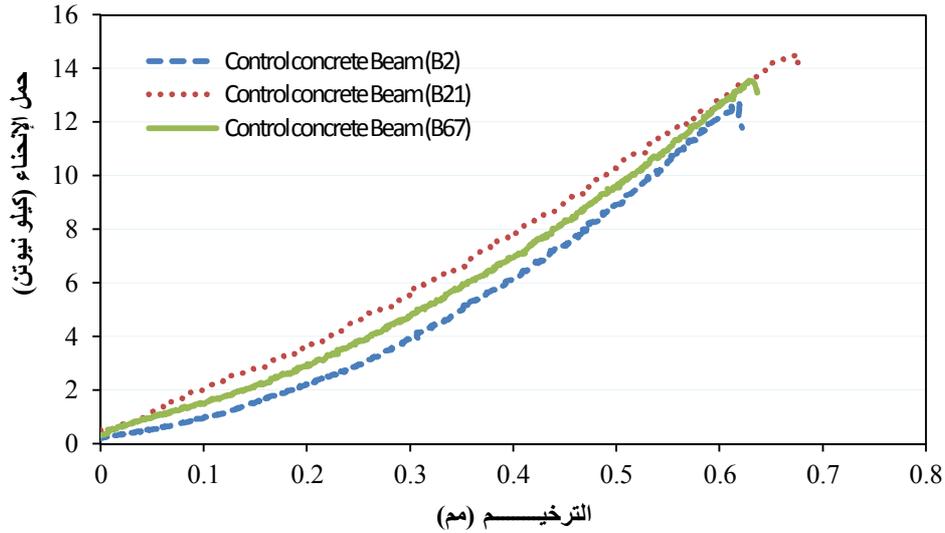
جدول (6) نتائج اختبار مقاومة الإنحناء لعينات الكمرات المرجعية (Control Beam Specimens) - 28 يوم

شكل الإنهيار Mode of failure	الصلابة stiffness (KN/mm)	أقصى مقاومة إنحناء Max. flexural strength (MPa)	المتوسط *Mean (KN)	أقصى حمل Max. load (KN)	أقصى ترخيم <sup>+</sup> Max. deflection (mm)	رمز العينة specimen no.
إنحناء	17.27	5.57	13.28	12.79	0.617	B2
إنحناء	18.90	5.89		13.52	0.673	B21
إنحناء	17.74	5.90		13.54	0.706	B67

\*متوسط أقصى حمل إنحناء (kN).

<sup>+</sup> الترخيم في منتصف الكمرة عند أقصى حمل.

الشكل (8) يمثل العلاقة بين حمل الإنحناء و الترخيم للعينات المرجعية. المنحنيات تبين ان الترخيم عند أقصى حمل متقارب جداً للعينات الثلاث.



شكل (8) منحنى حمل الإنحناء والترخيم للكمرات المرجعية

عينات الكمرات الخرسانية المدعمة بألياف البوليمر:

### (Strengthened Concrete Beam Specimens)

الكمرتين B6, B7 تم تقويتهم بطبقة واحدة من ألياف الكربون ثنائية الإتجاه (SikaWrap Hex 113 Bi-directional (0°/90°) وإيبوكسي سيكادور 300 (Sikadur 300) كمادة رابطة، ومن تم عرضت لإختبار تحميل الإنحناء بعد أن تمت معالجتهم في الهواء الجاف لمدة 14 يوم. شكل الإنهيار كان تهشم الخرسانة أولاً ثم اتبعها تمزق في الياف البوليمر (FRP rupture) (الشكل 9، 10).



شكل (9) تشقق الخرسانة في الكمرة 7- نتيجة حمل الإحناء شكل (10) تمزق ألياف البوليمر بالكمرة (7)

**( FRP rupture of B7) (Concrete flexural crack of B7)**

الكمره الخرسانية B1 دعمت باستخدام طبقتين من ألياف الكربون ثنائية الإتجاه ( SikaWrap Hex 113 Bi-directional (0°/90°) وإيبوكسي سيكادور 300 (Sikadur 300) كمادة رابطة وأخضعت إلى إختبار التحميل بنفس الكيفية السابقة حتى الأنهيار. شكل الإنهيار كان بتحطم الخرسانة تم أتبعه إنفصال ألياف البوليمر عن الخرسانة (FRP delamination) كما هو موضح بالشكل (11). ألياف الكربون أنفصلت عن سطح الكمره الخرسانية بداية من منتصف الكمره وأمتد حتى النهاية، لم يلاحظ أي قطع في ألياف الكربون.



أ) أنهيار الإحناء بالكمره الخرسانية B1 ب) إنفصال طبقة ألياف الكربون عن سطح الخرسانة بالكمره B1  
Concrete flexural crack, (beam B1)  
FRP delamination on concrete surface, beam B1

شكل (11) أنهيار الخرسانة وإنفصال ألياف البوليمر عن سطح الخرسانة بالكمره B1

**(Concrete flexural crack and FRP delamination, B1)**

العينتان B8، B11 تم تقويتها باستخدام ألياف الزجاج أحادي الاتجاه ( SikaWrap Hex ) و 100G glass fiber sheets) و الأيبوكسي (sikadur 300) أستخدم كمادة رابطة. هاتان العينتان عرضتا أيضاً إلى إختبار مقاومة الإنحناء حتى الإنهيار. وقد لوحظ ان شكل الإنهيار كان بتشقق الخرسانة عند نقطة التحميل، ثم إنفصال ألياف الزجاج عن العينة. الأنفصال بدأ قريب جداً من منتصف العينة ثم أمتد من جهة واحدة إلى نهاية العينة حتى نقطة الإرتكاز. أيضاً لوحظ في كلتا العينتين تمزق طبقة ألياف الزجاج إلى شرائح في الاتجاه الطولي كما هو واضح في الشكلين (12، 13)، وهذا في الغالب راجع إلى ان ألياف الزجاج التي تم استخدامها أحادية الاتجاه حيث إن التمزق إلى شرائح لم يلاحظ عند إستخدام ألياف الكربون الثنائية الإتجاه، بالإضافة إلى ذلك صغر سمك ورقة البوليمر. من جهة أخرى ومن خلال النتائج المتحصل عليها للعينتين B8، B11 لوحظ مطولية أكثر بعد حصول أول تشقق في الخرسانة وقبل حدوث الإنهيار الكلي. كما هو واضح بالشكل (14). التشقق الأول (First crack) في العينات المدعمة بطبقة واحدة من ألياف الكربون ثنائية الإتجاه أو في العينات المدعمة بطبقة واحدة من ألياف الزجاج أحادية الإتجاه، حصل تقريباً عند نفس قيمة الحمل. الحمل الأقصى للعينات المدعمة بطبقة واحدة من ألياف الكربون ثنائية الإتجاه ازدادت بمقدار 40 % على قيمة حمل الإنحناء للعينات المرجعية ( الغير مدعمة)، بينما كانت نسبة الزيادة في قيمة أقصى حمل إنهيار تساوي 67 % للعينات المدعمة بطبقتين من نفس نوع الألياف، أما الكمرات التي دعت باستخدام طبقة واحدة من ألياف الزجاج فإن قيمة حمل الإنهيار ازدادت بنسبة 80 % عن نتيجة العينات المرجعية. الجدول (7) يبين اقصى حمل إنحناء ومقاومة إنحناء للعينات و الترخيم.



شكل (12) تمزق ألياف البوليمر إلى شرائح عند الإنهيار، B8  
FRP Strips rip at the time of failure, B8



شكل (13) إنهيار الخرسانة وإنفصال ألياف البوليمر ، B11  
Concrete flexural crack and FRP delamination, B11

الجدول (7) نتائج الإختبار لعينات كمرات خرسانية مدعمة بأنواع مختلفة من ألياف البوليمر

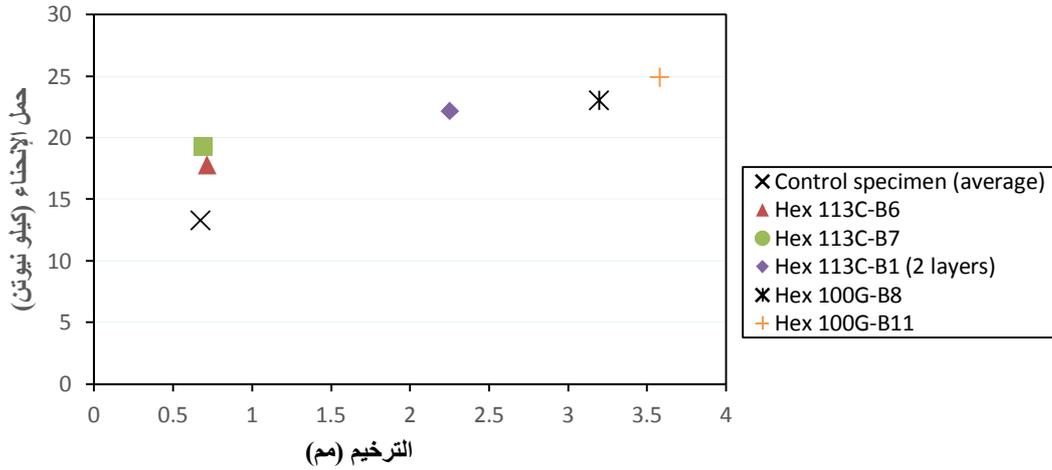
رمز العينة	نوع ألياف البوليمر	عدد طبقات ألياف البوليمر	الترخيم عند أقصى حمل (mm)	الحمل الأقصى (kN)	المقاومة القصوى (MPa)	*متوسط نسبة التحسن في المقاومة (%)	شكل الإنهيار
B6	CFRP <sup>1</sup>	1	0.72	17.83	7.76	40	تمزق ألياف البوليمر
B7	CFRP <sup>1</sup>	1	0.69	19.28	8.40		تمزق ألياف البوليمر
B1	CFRP <sup>1</sup>	2	2.25	22.18	9.66	67	إنفصال ألياف البوليمر
B8	GFRP <sup>2</sup>	1	3.20	23.04	10.03	80	إنفصال ألياف البوليمر
B11	GFRP <sup>2</sup>	1	3.58	24.94	10.86		إنفصال ألياف البوليمر

<sup>1</sup>ألياف الكربون ثنائي الإتجاه ((SikaWrap Hex 113 Bi-directional (0°/90°))

<sup>2</sup>ألياف الزجاج أحادي الإتجاه (SikaWrap Hex 100G glass fiber sheets)

• مقارنة بمتوسط مقاومة الكمرات المرجعية ( جدول (6))

ملاحظة: المادة الرابطة أيبوكسي (sikadur 300)



شكل (14) العلاقة بين حمل الإحناء والتزخيم لكمرات مدعمة بأنواع مختلفة من ألياف البوليمر وفق الجدول (7)

العينتين B4 ، B5 تم تقويتها بإستخدام ألياف الكربون أحادي الإتجاه ( Tyfo SCH-41 Carbon fabric) و إستعمل الأيبوكسي (Tyfo S Saturant) كمادة رابطة، حيث تمت عملية إختبار التحميل بنفس الطريقة السالفة الذكر، لوحظ ان شكل الإنهيار كان إنهيار قص متبوع بإنفصال ألياف الكربون، شكل (15) حيث حدث إنفصال ألياف الكربون عن سطح العينة الخرسانية في منتصف الكمرة تم أمتد في إتجاه واحد على إلى نقطة إرتكاز العينة.



شكل (15) إنهيار القص مع إنفصال ألياف الكربون، B5, B4  
Shear failure with CFRP delamination, B4, B5

الكمرة B3 تمت تقويتها بطبقتين من ألياف الكربون أحادي الإتجاه ( Tyfo SCH-41 Carbon fabric). نوع الإنهيار بهذه الكمرة كان نتيجة إنهيار في القص بالخرسانة تم لحقه فصل طبقة الكربون السفلى عن سطح الخرسانة، التشقق في الخرسانة بدأ بالسطح السفلي للعيونة و أنتشر بشكل مائل خلال إرتفاع الكمرة .

العيونة B12 والعيونة B15 دعمتا بطبقة واحدة من ألياف الزجاج أحادي الأتجاه ( Tyfo SEH-51A glass fabric)، والمادة الرابطة كانت (Tyfo S Saturant)، وحملتا تحت تأثير مقاومة الإحناء. النتيجة كانت انهيار في القص، التشقق بدأ عند أسفل العيونة ثم أمتد إلى أعلى بزواوية  $45^{\circ}$ . بعد ذلك حدث إنفصال لطبقة ألياف الزجاج عن الخرسانة. لم يشاهد أي تمزق في طبقة ألياف الزجاج، شكل (16).



شكل (16) إنهيار القص مع إنفصال ألياف الزجاج، B15, B12

#### Concrete shear crack and GFRP delamination of specimens B12, B15

الجدول (8) يلخص نتائج إختبارات الأنحناء لمجموعة من عينات الكمرات الخرسانية المدعمة بأنواع مختلفة من ألياف البوليمر. كما هو موضح بالجدول (8) والشكل (17)، ألياف الكربون أحادي الإتجاه (Tyfo SCH-41 Carbon fabric) أظهرت مقاومة أحناء أعلى بقليل من المتحصل عليها من إستخدام ألياف الزجاج أحادي الأتجاه ( Tyfo SEH-51A glass )

(fabric). مقاومة الإنحناء للعينة B3 التي دعمت بطبقتين من ألياف الكربون أحادي الإتجاه (Tyfo SCH-41 Carbon fabric) كانت حوالي 18% أعلى من نتائج العينتين B4 و B5 اللتان دعمتا بطبقة واحدة من نفس نوع الألياف. شكل الأنهيبار في كل هذه العينات الخمس كان إنهيبار في القص بالنسبة للخرسانة ثم إنفصال طبقة إلياف البوليمر عن السطح الخرسانى. كما يظهر في الشكل (17)، رغم أن العينات المدعمة بألياف الكربون أعطت مقاومة إنحناء أكبر إلا أن المطولية كانت أكثر في العينات المدعمة بالألياف الزجاجية.

الجدول (8) نتائج إختبار لعينات كمرات خرسانية مدعمة بأنواع مختلفة من ألياف البوليمر

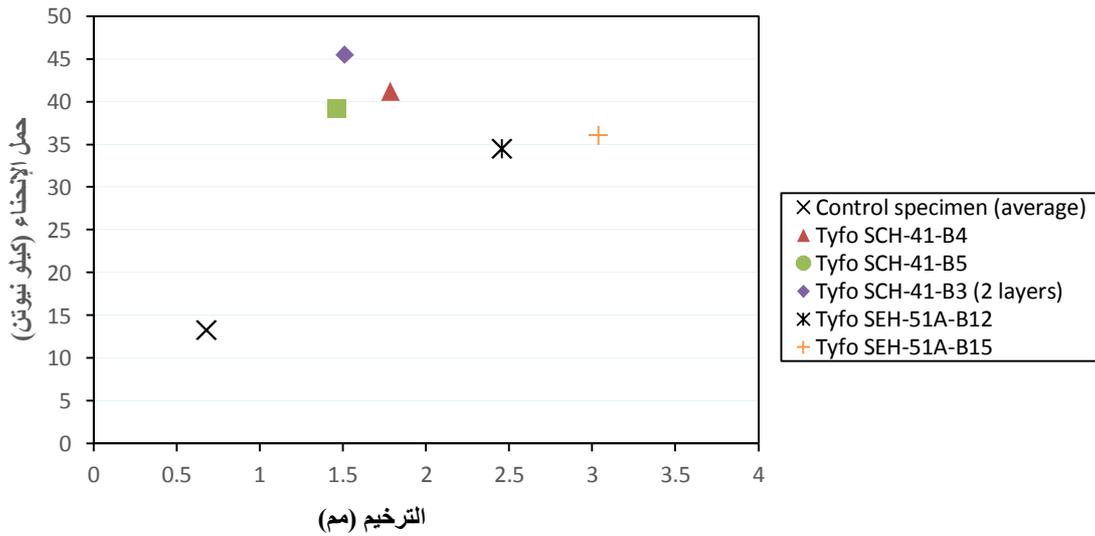
رمز العينة	نوع ألياف البوليمر	عدد طبقات ألياف البوليمر	الترخيم عند أقصى حمل (mm)	الحمل الأقصى (kN)	المقاومة القصوى (MPa)	*متوسط نسبة التحسن في المقاومة (%)	شكل الإنهيبار
B4	CFRP <sup>1</sup>	1	1.78	41.25	18.22	207	إنهيبار قص + إنفصال ألياف البوليمر
B5	CFRP <sup>1</sup>	1	1.46	39.19	17.31		إنهيبار قص + إنفصال ألياف البوليمر
B3	CFRP <sup>1</sup>	2	1.51	45.54	19.87	243	إنهيبار قص + إنفصال ألياف البوليمر
B12	GFRP <sup>2</sup>	1	2.45	34.59	15.09	166	إنهيبار قص + إنفصال ألياف البوليمر
B15	GFRP <sup>2</sup>	1	3.03	36.14	15.77		إنهيبار قص + إنفصال ألياف البوليمر

<sup>1</sup> ألياف الكربون أحادي الإتجاه (Tyfo SCH-41 Carbon fabric)

<sup>2</sup> ألياف الزجاج أحادي الأتجاه (Tyfo SEH-51A glass fabric)

• مقارنة بمتوسط مقاومة الكمرات المرجعية ( جدول (6))

ملاحظة: المادة الرابطة أيبوكسي (Tyfo S Saturant)



شكل (17) العلاقة بين حمل الإنحناء والترخيم عند منتصف بحر الكمرات مدعمة بأنواع مختلفة من ألياف البوليمر

### الاستنتاجات (Conclusions)

1. مقارنة بنتائج العينات المرجعية ( العينات غير المدعمة بألياف البوليمر)، تحسن كبير حصل في مقاومة الإنحناء للعينات المدعمة بألياف الكربون والمدعمة بألياف الزجاج أيضاً.
2. العينات المدعمة بطبقة واحدة من ألياف الكربون ثنائي الإتجاه ( SikaWrap Hex 113 Bi-directional (0°/90°)، أثبتت تحسن ملحوظ في مقاومة الإنحناء بنسبة 40 % مقارنة بالعينات المرجعية. بينما هذا التحسن وصل إلى 70 % عند إستخدام طبقتين من نفس نوع الألياف.
3. العينات التي دعمت بطبقة واحدة من ألياف الكربون أحادي الإتجاه ( Tyfo SCH-41 Carbon fabric) أظهرت تحسن في مقاومة الإنحناء حتى 80% مقارنة بالعينات المرجعية.

4. تحسن كبير جداً في مقاومة الإنحناء لوحظ بالعينات المدعمة سوى بألياف الكربون أحادي الإتجاه (Tyfo SCH-41 Carbon fabric) أو بألياف الزجاج أحادي الإتجاه (Tyfo SEH-51A glass fabric)، حيث وصلت نسبة الزيادة حوالي 207% عند استخدام طبقة واحدة من الكربون أحادي الإتجاه (Tyfo SCH-41 Carbon fabric) و 243% عند استخدام طبقتين. بينما كانت نسبة التحسن في مقاومة الإنحناء حوالي 166% للعينات المدعمة بطبقة واحدة من ألياف الزجاج أحادي الإتجاه (Tyfo SEH-51A glass fabric).
5. نمط الإنهيار في ألياف البوليمر كان بأنفصالها عن الخرسانة لجميع العينات التي دعمت سوى بطبقة واحدة أو طبقتين من ألياف الزجاج أحادي الإتجاه (SikaWrap Hex 100G glass fiber sheets) أو ألياف الكربون أحادي الإتجاه (Tyfo SCH-41 Carbon fabric) أو ألياف الزجاج أحادي الإتجاه (Tyfo SEH-51A glass fabric)، وكذلك للعينات المدعمة بطبقتين من ألياف الكربون ثنائي الإتجاه (SikaWrap Hex 113 Bi-directional (0°/90°)). أما شكل الإنهيار في العينات المدعمة بطبق واحدة من ألياف الكربون ثنائي الإتجاه (SikaWrap Hex 113 Bi-directional (0°/90°)) فكان نوع الإنهيار تمزق في طبقة ألياف الكربون.
6. العينات المدعمة بألياف البوليمر الزجاجية أظهرت تحسن أكبر في المطولية مقارنة بتلك المدعمة بألياف الكربون.
7. كلاً من أيوكسي (Sikadur 300) و (Tyfo saturant) أثبتت نتائج جيدة كمادة رابطة.

### References :

1. Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu, L. W., and Connelly, G. M., 1991, External strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics, *ACI Struct. J.*, 88, 490–500.

2. Elarbi, A. M. , 2011, *Durability performance of FRP strengthened concrete beams and columns exposed to hygrothermal environment*, PhD Dissertation, Wayne State University.
3. Choi. H.T.; West, J.S.; Soudki, K.A., 2008, *Analysis of the flexural behavior of partially bonded FRP strengthened concrete beams*’ journal of composites for construction, /July/August. ,P375-286.
4. Taljsten, B., 2003, *FRP strengthening of existing concrete structures design guidelines*, lulea university printing office: lulea, sweden,.
5. Gibson, R.F., 2007, *Principles of Composite Material Mechanics*, second edition, Taylor & Francis Group,LLC.
6. Matthews, F.L.; Davies, G.A.O.; Hitchings, D.; and Soutis, C., 2000, *Finite element modeling of composite materials and structures*, Woodhead Publishing Ltd.
7. Dussek I.J. , 1974, *Strengthening of bridge beams and similar structures by means of epoxy resin bonded external reinforcement*, Transport research record, National Research Council, No. 785,1974,pp21-24.
8. ASTM C 39/C 39M – 05, 2008, *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United State.