First Libyan international Conference on Engineering Sciences & Applications (FLICESA_LA)
13-15 March 2023, Tripoli – Libya

استخدام الألياف الكربونية أحادية الاتجاه في تدعيم الأعمدة والكمرات الخرسانية

خيرية كمال اقليصة[1] ، وصال البهلول بن حسونة[2]، د. زيدان علي حتوش[3]
[1]مهندسة مدنية، شركة البنية للمقاولات والاستشارات الهندسية
[2]مهندسة مدنية، وزارة الإسكان والتعمير
[3]عضو هيئة تدريس، قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة طرابلس
Z.hatush@uot.edu.ly [3] ، wesalbenhasouna@gmail.com [2] ، kayglaissa97@gmail.com [1]

الملخص

تحتاج العناصر الخرسانية إلى التقوية عندما تكون مقاومتها غير كافية نتيجة التغيير في استخدام المنشأة أو نتيجة أخطاء في التصميم والتنفيذ. أيضاً قد تحتاج العناصر الانشائية الى الترميم والإصلاح في حالة نقص تحميلتها نتيجة لتعرضـــها للتأثيرات البيئية المختـلفة.

تستخدم ألياف البوليمر المركبة في التقوية الخارجية للمنشآت لغرض تحسين مقاومتها للانحناء والقص لدعم وترميم المنشـآت الخرسانية بدلاً من استخدام مواد الدعم التقليدية التي تستخدم الحديد والخرسانة.

اجريت هذه الدراسة لاختبار مدى كفاءة ألياف البوليمر المصنوعة من الكربون **(CFRP)** لدعم وتقوية الكمرات والمكعبات الخرسانية. حيث تم تنفيذ واختبـــار مجموعة مـن المكعبات والكمرات الخرسانية غير المدعمة وأخرى مدعمة بألياف الكربون. بمقاومة تصميمية في حدود 35 ميجا باسكال للعينات بعمر 28 يوم. تم تقسيم العينات بحيث تكون بعضها مرجعية وبعضها تم تدعيمها بألياف الكربون بشرائح ذات مسافات مختلفة من مركز العينة وعدد من العينات تم تغليفها بشكل تام، تم اخضـــاع المكعبات لاختبار مقاومة الضغـط حتى انهيـارها، أظهرت النتائج زيادة في مقاومة الضغط حيث كانت أفضل زيادة في نسبة مقاومة الضغط 13% بالمقارنة مع العينة المرجعية. وكذلك تم تعريض الكمرات الى اختبار الانحناء، واخذت نتـائج مقاومة الانحناء وشكـــل الانهيار تم مناقشتها، حيث لوحظ تحسن في النتائج وكانت افضل نسبة زيادة لمقاومة الانحناء 385.71% بالمقارنة مع الكمرات غير المدعمة بألياف الكربون.

الكلمات المفتاحية: الخلطة الخرسانية، ألياف الكربون، الإيبوكسي، اختبار مقاومة الضغط، اختبار مقاومة الانحناء.

المقدمـــة:

فـــي الســـنوات الأخيـــرة ازداد اســـتخدام أليـــاف البـــوليمرات المســـلحة **(Fiber Reinforced polymer)** أو مـــا تعـــرف اختصـــار بـــ **(FRP)** الخفيفـة الـوزن فـي دعـم وتـرميم المنشـآت الخرسـانية بـدلاً مـن اسـتخدام مـواد الـدعم التقليديـة التـي تسـتخدم فيهـا الحديـد والخرسـانة. حيـث يـتم اسـتخدامها فـي التسـليح الـداخلي للعناصـر الخرسـانية وكـذلك فـي التقوية والدعم الخارجي لهذه العناصر.

ان عمليـة التـدعيم باسـتخدام البـوليمرات المسـلحة اسـتخدمت للتقويـة الخارجيـة لتحسـين أداء المنشـآت مثـل تقويـة الأعمـدة الخرسـانية وذلـك عـن طريـق عمـل طـوق بأليـاف البـوليمر حـول المحـيط الخـارجي للعمـود لزيـادة المقاومـة، وكـذلك تسـتخدم لزيـادة

مقاومة الانحناء والقص بإلصاق ألياف البوليمر على السطح الخارجي للكمرات والأسقف.

أجريت دراسة لاختبار كفاءة استخدام ألياف البوليمر المصنوعة من الكربون (**CFRP**) لدعم وتقوية الأسطوانات الخرسانية، واثبتت أنه عند تدعيم الخرسانة بألياف البوليمر فان ذلك يؤدي الى زيادة مقاومة الضغط للخرسانة، حيث كانت أعلى نسبة 89.9%[1] واجريت دراسة اخرى لاختبار سلوك الانحناء بالكمرات الخرسانية المدعمة بألياف البوليمر عن طريق تقوية كمرات الخرسانة المسلحة بإلصاق ألياف الكربون المعرضة للانحناء[2]

ان الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة دور ألياف الكربون أحادية الاتجاه في تحسين أداء الأعمدة والكمرات الخرسانية، وذلك من خلال تعريض عينات مكعبات وكمرات خرسانية لاختبار مقاومة الضغط و اختبار مقاومة الانحاء، سواء كانت العينات مدعمة بشرائح متصلة أو منفصلة، حيث تم اختبارها ومقارنتها بعينات مرجعية غير مدعمة بألياف الكربون.

ألياف البوليمر المسلحة (FRP):

البوليمر المسلح بالألياف يتكون من ألياف و المادة اللاصقة، 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.

ألياف الكربون (Carbon Fibers):

تُعرف ألياف الكربون باسم ألياف الجرافيت أيضًا، وهي عبارة عن ألياف أو أنابيب رفيعة جدًا يصل قطرها إلى حوالي 5 إلى 10 مايكرومتر، ولها أشكال بلورية مختلفة سوداء اللون وقد حصلت على هذا اللون من الكربون المكوّن لها، تتميز ألياف الكربون بالديمومة **(Durability)** العالية والأداء الجيد تحت تأثير الفشل **(Fatigue)** الناتج عن التحميل في ضوء الظروف البيئة الساخنة الرطبة. ألياف الكربون تعرف بأنها ألياف تحتوي على مالا يقل عن نسبة 90 **%** من الكربون مما تعرف بدرجة كربنتها وهي أهم العوامل لتحديد خواص ألياف الكربون الفيزيائية، وللمادة الرابطة (**Matrix material**) دوراً مهم في وظيفة ألياف البوليمر حيث إنها تعمل على ربط ألياف البوليمر مع بعضها لتمكنها من نقل الأحمال وتوفر لها الحماية ضد التأثيرات البيئية المختلفة والأضرار الناجمة عن المناولة. المواد الرابطة لها عدة أنواع مثل البوليستر (**Polyester**) والفينيل إيستر (**ester-Vinyl**) والأيبوكسي (**Epoxy**) يعتبر الأيبوكسي من المواد البوليميرية الأكثر شيوعاً ويستخدم عادة مع الألياف العالية الأداء.[3]

خصائص ألياف الكربون كمواد بناء

تتميز الياف الكربون بالعديد من الخصائص يمكن اختصارها في ما يلي [4]

1. لديها قوة شد عالية جداً، فهي قوية جداً بالنسبة لحجمها.
2. ألياف الكربون مستقرة كيميائياً ومقاومة للتآكل.
3. قساوة كبيرة جداً(**Stiffness**): تقاس القساوة بواسطة معامل يونغ، وتقيس مدى الترخيم في المادة تحت تأثير الاجهادات. يذكر أن قساوة ألياف الكربون أعلى مرتين ونصف من الألمنيوم.
4. لديها موصلية كهربائية جيدة.
5. ألياف الكربون لديها مقاومة كبيرة للنار فهي غير قابلة للاشتعال وفقاً لأسلوب التصنيع فإن

أليـاف الكربـون يمكـن أن تـدخل فـي صـناعة ألبسة رجال الإطفاء.

6. قابليـة أليـاف الكربـون لتوصـيل الحـرارة: وهـي كميـة الحـرارة المـارة عبـر سـمك المـادة، بشـكل عمـودي علـى مسـاحتها، وبسـبب تعـدد أنـواع أليـاف الكربـون فإنـه مـن غيـر الممكـن تحديـد مـدى قابليتهـا لنقـل الحـرارة، ولكـن يوجـد بعـض الأنـواع التـي تصـمم خصيصـاً لتكـون ذات ناقليـة عالية أو منخفضة.
7. معامـل تمـددها الحـراري مـنخفض : ويعنـي مـدى تمـدد أو تقلـص المـادة عنـد ارتفـاع أو انخفاض درجات الحرارة.
8. أليـاف الكربـون لهـا صـلابة عاليـا بالنسـبة للـوزن: معـدل صـلابة مـادة هـي القـوة فـي وحـدة المسـاحة عنـد الانهيـار مقسـومة علـى الكثافـة، كلمـا كانـت المـادة صـلبة وخفيفـة كـان معـدل صلابتها الى وزنها أفضل.
9. مقاومـة للإجهـادات: ولكـن عنـدما تنهـار أليـاف الكربون فـإن انهيارهـا قـد يكـون كارثيـاً حيـث أنـه يحدث بدون سابق إنذار.

هذا وهناك خصائص فنية لالياف الكربون منها :

1. سـهلة التركيـب فهـي لا تحتـاج الـى معـدات خاصـة ولا الـى عـدد كبيـر مـن العمـال ولا تحتاج وقت.
2. تنفيذها لا يحتاج وقت طويل.
3. آمنة تماماً و صديقة للبيئة.
4. مـع مـرور الـزمن إذا تـم تنفيـذها بطريقـة جيـدة فهـي لا تحتـاج الـى صـيانة وذات صـلاحية طويلة.

البرنامج العملي

يشـمل البرنـامج العملـي علـى خطـوات إعـداد الخلطـة الخرسـانية لعـدد مـن المكعبـات والكمـرات الخرسـانية وإلصـاق شـرائح الكربـون أحاديـة الاتجـاه علـى العينـات بأشـكال مختلفـة عـن طريـق المـادة الرابطـة وذلـك لغـرض اجـراء الاختبـارات والمقارنـة بـين النتائج المتحصل عليها.

الاختبـارات المعمليـة للمـواد المسـتخدمة فـي الخلطـة الخرسانية:

تـم إجـراء بعـض الاختبـارات المعمليـة للمـواد المسـتخدمة فـي الخلطـة وتـم الحصـول علـى النتـائج الموضحة في جدول (1):

الخلطـــة الخرســـانية (Concrete Mix Compositions):

تم إعداد الخلطة الخرسانية:

- لعـدد 4 مكعبـات، هـذه الخلطـة كانـت لمعالجـة العينـات لمـدة 7 أيـام، أبعـاد المكعـب (150مـم x 150مم x150مم).
- لعـدد 21 مكعـب، فـي هـذه الخلطـة تـم معالجـة العينات لمدة 28يوم.
- لعـدد 3 كمـرات أبعادهـا (100مـم x100 مـم x 500مم) تم معالجتها لمدة 28 يوم.

و يوضـح جـدول (2) أوزان المـواد لتصـميم الخلطـة الخرسانية.

وكانـت نسـب مـواد الخلطـة الخرسـانية بالنسـب للاسـمنت علـى التـوالي (مـاء = 0.52: ركـام نـاعم = 1.7: ركام خشن = 2.7 : اسمنت =1)

وباقي النسب هي

W/C = 0.52, A/C = 4.4, FA/TA = $\frac{1.7}{1.7+2.7}$ = 0.39

جدول (1) نتائج بعض الاختبارات للركام والإسمنت المستخدم في الخلطة ثـــــم

الكثافة النوعية للإسمنت	المقاس الاعتباري الأكبر للركام الخشن	الكثافة النوعية للركام الخشن	نسبة الامتصاص للركام الخشن رقم (1)	نسبة الامتصاص للركام الخشن رقم (2)	الكثافة النوعية للركام الناعم	معامل النعومة للركام الناعم
3.12	20مم	2.60	%2.12	%2	2.65	1.4

تركت لمدة 24 ساعة حتى تجف في المعمل من ثم تغليف المكعبات وتركها 24 ساعة أخرى

جدول (2) اوزان مواد الخلطة الخرسانية /م3

مكونات الخرسانة	الكمية بالكيلوجرام لكل متر مكعب
اسمنت	397
ركام خشن	1082
ركام ناعم	663
الماء	206

مصادر المواد:

- اســـمنت البورتلانـــدي العـــادي (شـــركة الاتحاد العربي للمقاولات) .
- الركام الناعم (زليتن) .
- الركام الخشن (محجر راس اللفعة) .

ملاحظة:

تجدر الإشارة إلى أن الركام المستخدم بنوعين في جميع الخلطات الخاصة بالدراسة قد تم غمره في الماء، وتجفيفه في جو المعمل، أي تم استخدام ركام مشبع جاف السطح في حالة **(Saturated surface dry)**، وذلك لتجنب امتصاص ماء الخلطة من قبل الركام، أما الركام الناعم تم استخدامه في الحالة الجافة حيث كان مجفف بالهواء.

كما تجدر الإشارة أن عمر العينات الفعلي للمكعبات المعالجة بعمر 28 يوم هو 31 يوم حيث تم ترك المكعبات مغمورة في الماء 28 يوم وذلك بغرض تثبيت الألياف والتأكد من أن المادة الرابطة جفت بالكامل وبالتالي عمر العينات الفعلي 31 يوم.

توضيح برنامج العمل الخاصة بالعينات:

أولاً: الخلط.

ثانياً: ترك العينات في جو المعمل لمدة 24 ساعة (يوم كامل).

ثالثاً: فك القوالب ومعالجة العينات بالغمر في الماء لمدة 7 أيام أو 28 يوم حسب الحالة.

رابعاً: اخراج العينات من الماء وتركها تجف لمدة 24 ساعة قبل الصاق شرائح الياف الكربون.

خامساً: الصاق الشرائح على العينات في اليوم التاسع أو الثلاثون حسب الحالة.

سادساً: ترك العينات لمدة يوم في جو المعمل بعد الانتهاء من الصاق الشرائح لضمان جفاف المادة اللاصقة (الإيبوكسي) قبل الاختبار.

سابعاً: إجراء اختبار مقاومة الضغط في اليوم العاشر أو اليوم الواحد والثلاثون.

إعداد الخلطة الخرسانية

تـم إعـداد كـل العينـات الخرسـانية داخـل المعمـل الخـاص بالجامعـة، حيـث ثـم دهـن القوالـب بزيـت وذلـك لمنـع الالتصـاق وتسـهيل عمليـة فـك المكعـب بعـد تصـلد الخرسـانة. ويبـين الشـكل رقـم (1) والشـكل رقـم (2) الخلاطـة وقوالـب المكعبـات المستخدمة.

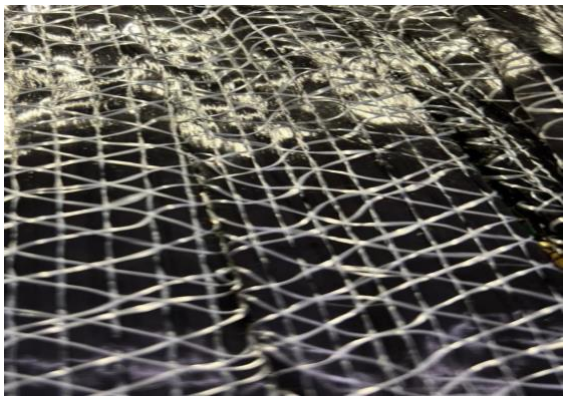
شكل رقم (1) الخلاطة الخرسانية

شكل رقم (2) قوالب المكعبات المستخدمة

تـم إعـداد خلطتـين علـى فتـرات مختلفـة، الخلطـة الأولـى لاختبـار المكعبـات بعـد الغمـر فـي المـاء لمـدة 7 أيـام وذلـك لإعطـاء فكـرة جيـدة ومقبولـة عـن جـودة الخرسـانة ومقاومتهـا التـي يجـب ألا تقـل عـن 70% مـن المقاومـة المطلوبـة بعـد 28 يـوم، والخلطـة الأخرى لاختبار المكعبات بعد 28 يوم.

ألياف الكربون المستخدمة:

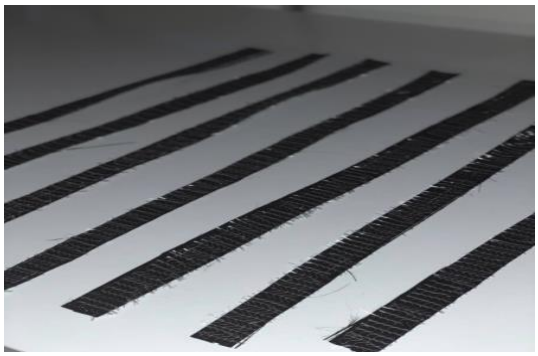
ألياف الكربون المستخدمة وهي ألياف كربون أحادية الاتجاه مستخدمة في تدعيم جميع العينات كما هو موضح في الشكل رقم (3). تم توريدها من تركيا.



شكل رقم (3) ألياف الكربون المستخدمة

الخصائص الفنية لألياف الكربون المدعمة المستخدمة:

يبين جدول (3) الخصائص الفنية (دليل المصنع) لألياف الكربون المستعملة.



جدول (3) خواص ألياف الكربون المستخدمة [5]

تجهيز ألياف الكربون للقص:

تم تجهيز ألياف الكربون وقصها بطريقة دقيقة بسمك مختلف لكل حالة وتجهيزها للصق في العينات، حيث تم قص شرائط بسمك 3سم، 9سم وغيرها حسب الحالات. ويبين الشكل (4) الألياف الكربونية بعد قصها بسمك المطلوب.

شكل رقم (4) قص عينات ألياف الكربون

شكل رقم (5) تعين طول التداخل

بيان الخاصية **Typical data**	ألياف الكربون أحادية الاتجاه
اللون	أسود
اتجاه الألياف الأساسي	أحادية الاتجاه
الوزن لكل متر مربع	644 جم/م^2
خواص الألياف **Fiber Properties**	
مقاومة الشد	3.45 جيجا باسكال
معامل الشد	230 جيجا باسكال
الاستطالة	%1.7
الكثافة	1.74 جم/ م^2
القيم التصميمية وخواص الصفائح المعالجة **Cured Laminate Properties Design**	
مقاومة الشد	834 جيجا باسكال
معامل الشد	82 جيجا باسكال
الاستطالة عند القطع	%0.85
السمك	1.0 مم

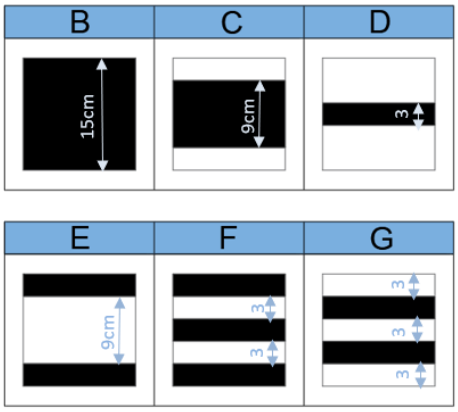
تعيين طول التداخل اللازم لشريحة ألياف الكربون

(Over Lap):

تم تعيين الطول اللازم لتداخل طرفي شريحة ألياف الكربون لتفادي انفصال الشريحتان عن بعضهم البعض، وبناءاً عن اختبارات سابقة حيث تم تحديد الطول 5سم مضافة إلى الطول الفعلي لشريحة العينة المطلوبة كما هو موضح في الشكل رقم (5).

المادة الرابطة (الإيبوكسي):

المادة اللاصقة المستخدمة هي سيكادور32 للصق الألياف على العينات الخرسانية حيث تتكون من المادة السائلة **A** بيضاء اللون والعجينة **B** رمادية اللون. وهو لاصق مقاوم للرطوبة مكون من مادتين، مصممة للتطبيقات في درجات حرارة تتراوح بين 10 إلى 30 درجة مئوية. تم إعداد المادة الرابطة (**A: B**) بنسبة (2:1) بالوزن، وتم خلطها يدوياً لمدة 5 دقائق. يبين الشكل رقم (6) نوع مادة الإيبوكسي المستخدم كما يوضح الجدول (4) الخواص الميكانيكية للإيبوكسي. [6]



جـــدول (4) الخـــواص الميكانيكيـــة للإيبوكســـي سيكادور 32 (**Sikadur32**) (دليل المصنع) [6]

شكل رقم (6) المادة اللاصقة (الإيبوكسي) المستخدمة

تجهيز عينات الاختبار:

في هذه الدراسة للحصول على ترابط قوي بين سطح الخرسانة وبين الياف الكربون شكل رقم (7)، تم تجهيز العينات وفقا للخطوات التالية:

1. بعد أن تم إزالة العينات الخرسانية من المياه تم تركها لتجف لمدة 24 ساعة.
2. تم تنظيف السطح لإزالة أي زيوت قد تكون عالقة على السطح بسبب دهان القوالب قبل عملية صب الخرسانة.
3. تم تنظيف السطح بالفرشاة لضمان خلوه من أي أغبرة وأي مواد عالقة.

إلصاق شرائح ألياف الكربون المدعمة:

تم وضع مادة الأيبوكسي على السطح المستهدف من العينة الخرسانية باستخدام فرشاة بعد ذلك يتم إلصاق ألياف الكربون على السطح الخرساني المستهدف ويتم الضغط على الكربون للتخلص من أي فراغات وضمان التصاقه مع السطح الخرساني. وتم إعداد ثلاث عينات لكل حالة حيث تم اختبار العينات في الحالات الموضحة في الجدول(5).

جدول (5) تقسيم الحالات التي تم تغليفها

ملاحظات:

- عرض الشرائح في العينات (**D-E-F-G**) 3سم.
- العينة (**A**) كانت عينة مرجعية غير مدعمة.
- العينة (**B**) تغلف بالكامل بشريحة بعرض 15سم.
- العينة (**C**) مغلفة بشريحة 9سم من المنتصف.
- العينة (**D**) مغلفة بشريحة 3سم من المنتصف.

القيم النموذجية للاختبار **Typical) (Test Value**	**ASTM Method**	الخاصية **(Property)**
49نيوتن/مم^2	D 695=95	مقاومة الضغط

- العينة (**E**) مغلفة بشريحتين 3سم والمسافة بينهم 6سم.
- العينة (**F**) مغلفة بثلاثة شرائح بسمك 3سم والمسافة بينهم 3سم.
- العينة (**G**) مغلفة بشريحتين 3سم من المنتصف والمسافة بينهم 3سم.
- تم تغليف المكعبات من أربع أسطح.

إلصاق الألياف الكربونية على العينات

تم إلصاق ألياف الكربون كما هو موضح بالشكلين رقم (7) (8).

أ) الشرائح المنفصلة

شكل رقم (7) الشرائح المنفصلة للعينات

ب) الشرائح المتصلة

شكل رقم (8) الشرائح المتصلة للعينات

ملاحظات:

- عرض الشرائح 3سم لكل الحالات المنفصلة.
- الرموز (**A-B-C**) لكل حالة رمز للتمييز.

اختبار مقاومة الضغط للعينات

تم إخضاع جميع عينات المكعبات الخرسانية (المعالجة بعمر 7 و 28 يوم) التي تم تجهيزها بحمل منتظم وتم اجراء الاختبار في درجة حرارة معمل الخاص بالجامعة كما هو موضح بالشكل رقم (9).

شكل رقم (9) وضع العينات داخل الجهاز أثناء التحميل.

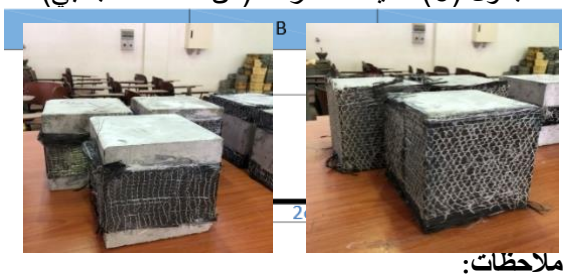
عينات الكمرات المدعمة بألياف الكربون:

تم صب عينات الكمرات الثلاثة أبعادها (100مم × 100مم × 500مم) حيث كانت العينات على النحو التالي:

- عينة مرجعية بدون تدعيم بألياف الكربون.
- عينة تم تدعيمها من الداخل حيث تم صب الخلطة بسمك 20 سم ووضع شريحة الكربون فوقها مباشرة من ثم صب باقي الخلطة في القالب، حيث هذه الكمرة تم تدعيمها في الحالة اللدنة.
- عينة تم تدعيمها من الخارج بطبقة واحدة من ألياف الكربون أحادية الاتجاه بعد أن تم قصها وتجهيزها بالطول والعرض المطلوبين، حيث هذه الكمرة ثم تدعيمها في الحالة الصلدة.

بعد وضع العينات في حوض المياه للمعالجة لمدة 28 يوم، تم تركها في الهواء حتى تجف لمدة 24 ساعة في درجة حرارة المعمل وتم تغليف العينة **B** وتركها لتجف لمدة 24 ساعة في الهواء. كما هو موضح في الجدول (6).

جدول (6) تغليف الكمرات (من المسقط الجانبي)



ملاحظات:

- العينة (**A**) عينة مرجعية.
- العينة (**B**) عينة مدعمة من الداخل بطبقة من الياف الكربون أحادية الاتجاه على سمك **2**سم.
- العينة (**C**) عينة مغلفة من ثلاث أوجه بألياف كربون أحادية الاتجاه.

اختبار مقاومة الانحناء (Flexural Strength Test)

تم اخضاع عينات الكمرات الخرسانية التي تم تجهيزها بأبعاد (50 سم × 10 سم × 10 سم) الى اختبار الانحناء بحيث كان التحميل عند منتصف العينة الجهاز المستخدم في الاختبار الموضح في الشكل (10)

شكل رقم (10) جهاز اختبار مقاومة الانحناء.

النتائج والمنـــاقشة

نتائج المكعبات الخرسانية المدعمة بألياف الكربون:

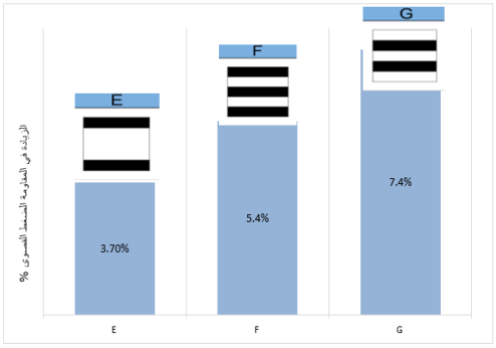
نتائج العينات المختبرة بعمر 10 يوم

جدول (7) نتائج العينات المختبرة بعمر 10 أيام.

رمز العينة	رمز الحالة	العينات MPa	المتوسط MPa	نسبة زيادة المقاومة %	نسبة تدعيم من المساحة الكلية%
A	A1	34.3	35.13		
	A2	36.9			
	A3	34.2			
B	B1	36.9	37.93	8%	100%
	B2	39.1			
	B3	37.8			
C	C1	38.4	38.93	11%	60%
	C2	37.9			
	C3	40.5			
D	D1	36.3	38.16	9%	20%
	D2	38.3			
	D3	39.9			
E	E1	38.2	37.23	5.9%	40%
	E2	36.9			
	E3	36.6			
F	F1	38.5	37.93	8%	60%
	F2	39.5			
	F3	35.8			
G	G1	38	39.63	12.8%	40%
	G2	40.3			
	G3	40.6			

يبين جدول (7) نتائج العينات المدعمة بألياف الكربون بعد انقضاء 10 يوم.

رمز العينة	مقاومة الضغط MPa	نسبة الزيادة المقاومة %	نسبة التدعيم من المساحة الكلية%
A-10	32.4		
E-10	33.7	%3.7	40%
F-10	34.3	%5.4	60%
G-10	35	%7.4	40%



شكل رقم (11) علاقة زيادة مقاومة الضغط بتغير نسبة التدعيم.

نوصي أن يتم التحقق مستقبليا من هذه النتائج لأنها خالفت السلوك المتوقع مقارنتا بعينات التي بعمر 32 يوم.

الشكل (11) يبين زيادة في المقاومة بتغيير نسبة التدعيم، حيث نلاحظ أن:

1. كلما اقتربت الشرائح من الوسط زادت نسبة مقاومة الضغط كما في العينات التي لهم نفس نسبة المساحة المدعمة.
2. اقصى نسبة زيادة كانت للعينة **G** حيث كانت النسبة 8%.
3. اقل نسبة زيادة كانت للعينة **E** حيث كانت **3.7%**.
4. أن كل نتائج نسبة الزيادة في المقاومة كانت مقارنة بالعينة المرجعية **(A-10)**.

نتائج العينات المختبرة بعمر 31 يوم

يبين جدول (8) نتائج العينات المدعمة بألياف الكربون بعد انقضاء 31 يوم.

جدول (8) يبين نتائج العينات المدعمة بعد 31 يوم.

ملاحظة: **(A1, A2, A3)**عينات مرجعية بدون ألياف الكربون.

يبين الشكل رقم (12) زيادة في المقاومة بتغيير نسبة التدعيم، حيث نلاحظ أن:

1) كلما اقتربت الشرائح من الوسط زادت نسبة مقاومة الضغط كما في العينات **(E,G)** التي لها نفس نسبة المساحة المدعمة.
2) أعطت العينة **G**نسبة مقاومة 13% بينما **E**أعطت 6%.
3) كلما زادت مساحة التدعيم في الوسط زادت نسبة الزيادة في المقاومة، كما في العينات **(C,D)** حيث كانت **C**نسبة المساحة المدعمة 60% أعطت زيادة

في المقاومة 11%, بينما **D** التي كانت نسبة المساحة المدعمة **20%** أعطت زيادة 9%.

4) عند تدعيم العينات بشرائح متصلة بنسبة **60%** كانت الزيادة في المقاومة أعلى من الشرائح المنفصلة التي لها نفس نسبة التدعيم كما في العينات **(C,F)** حيث كانت نسبة الزيادة في **C 11%** و. **F 8%**
5) نسب الزيادة كانت متقاربة مما يدل ان اختلاف أماكن التدعيم لم يسبب تغير ملحوظ.
6) مقارنة بدراسة السابقة للتركي والمليتي لوحظ نفس النتائج ان أكبر نسبة زيادة كانت للعينات المدعمة بشريحتين من المنتصف.

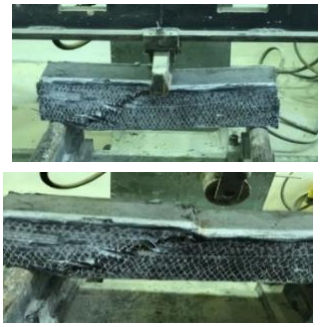
وكما هو موضح في الشكل رقم (13) منحى الزيادة في مقاومة الضغط للحالات (E-F-G)

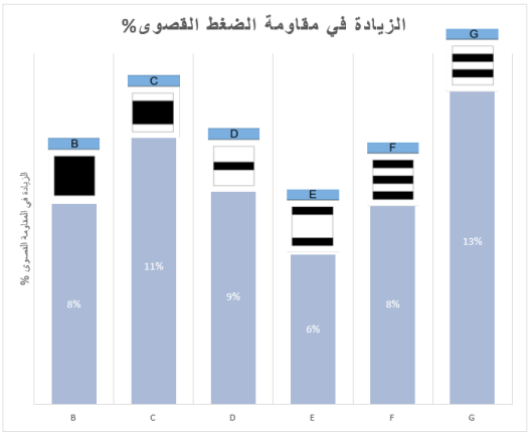
شكل رقم (14) يوضح العينات بعد تعرضها للاختبار

شكل رقم (14) عينات المكعبات بعد تعرضها لاختبار مقاومة الضغط

نتائج عينات الكمرات (Strengthened Concrete Beam Specimens**)**

- العينة المرجعية كان حمل الانهيار لها **(7 KN)** ، شكل الانهيار لهذه العينة كان انهيار إنحناء (**Flexural failure**)، حيث بدأ التشقق عند أسفل منتصف الكمرة تم أنتشـر عمودياً الى أعلى.
- أعلى حمل انحناء لهذه العينات كان **(34 KN)** للعينة **C** التي تم تدعيمها من الخارج. شكل الانهيار **(Failure mode)** كان تهشم الخرسانة أولاً تـم اتبعها انفصال ألياف الكربون عن سطح العينة (**FRP rupture**) موضح في الشكل (15).

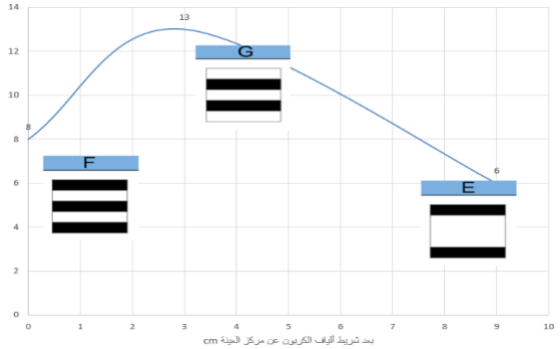




شكل رقم (12) علاقة زيادة مقاومة الضغط بتغير نسبة التدعيم.

شكل رقم (15) تمزق الأليـــاف في الكمرة (C)

- الكمرة **B** دعمت من الداخل وأخضعت الى اختبار التحميل بنفس الكيفية السابقة حتى الانهيار، حمل الانهيار كان **(11 KN)**، شـكل الانهيار كـان بتحطم الخرسانة أولاً من أسفل الكمرة ثم انتشر عمودياً الى أعلى تم اتبعه انفصال نسيج الألياف عن بعضها كما هو موضح بالشكل (16)



شكل رقم (13) منحى الزيادة في مقاومة الضغط للحالات (E-F-G)

شكل رقم (16) انهيار الخرسانة وانفصال الألياف الكربونية

ويوضح الجدول (9) نتائج مقاومة الانحناء لعينات الكمرات

جدول (9) نتائج عينات الكمرات.

العينة	أقصى حمل KN	شكل الانهيار	مقاومة الانحناء Mpa	نسبة الزيادة في مقاومة الانحناء
A	7.5	انحناء	5.25	
B	11	انفصال ألياف البوليمر	8.25	57.14%
C	34	انهيار قص	25.5	385.71%

قانون مقاومة الانحناء $\delta = \frac{M \times Y}{I}$

من خلال الجدول المرفق بالحسابات نلاحظ أن الكمرة (**C**) المدعمة من الخارج هي الأكثر كفاءة حيث أظهرت أكبر نسبة زيادة في مقاومة الإنحناء.

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات:

تم في هذه الدراسة تدعيم عينات المكعبات خرسانية بألياف الكربون أحادية الاتجاه بطرق متنوعة ودراسة أفضل هذه الطرق التي يمكن الاستفادة منها وتنفيذها على المنشأة الخرسانية، ونستنتج من هذه الدراسة النقاط التالية:

1. عند مقارنة العينات المدعمة بالعينات المرجعية (العينات غير المدعمة بألياف الكربون) لوحظ تحسن في مقاومة الضغط للعينات المدعمة بألياف الكربون.
2. العينات المدعمة بالكامل بألياف الكربون بلغت نسبة الزيادة في المقاومة بها 8%.
3. العينات المدعمة بنسبة 60% أظهرت زيادة في المقاومة 11%.
4. الحالة (**G**) المدعمة بشرائح منفصلة أظهرت أفضل زيادة في المقاومة حيث بلغت نسبة الزيادة 13%.
5. بقية الحالات كانت الزيادة في المقاومة بها من 6% إلى 9%.
6. نمط الانهيار في العينات كان تهشيم الخرسانة فقط لم يحدث أي تمزق في ألياف الكربون.
7. طول التداخل (**overlap**) لجميع العينات 5سم، حيث أنه و لم يحدث انفصال لألياف الكربون لجميع العينات.
8. المكعبات المعالجة لمدة 7 أيام في الماء يوصى التحقق بها مستقبلاً نظراً لأنها خالفت السلوك المتوقع مقارنة بالمكعبات المعالجة بعمر28 يوم في الماء.
9. في عينات المكعبات المعالجة بعمر 28 يوم كانت فيهم نسبة الزيادة في مقاومة الضغط متقاربة مع اختلاف أماكن التدعيم.
10. ألياف الكربون المستعملة والإيبوكسي أثبت نتائج جيدة كمادتي تدعيم وربط.

كما تم في هده الدراسة تدعيم عينات الكمرات الخرسانية بألياف الكربون الأحادية الاتجاه بهدف معرفة ومقارنة أعلى حمل تم تحملته الكمرات المدعمة بهده الألياف بمقارنتها مع عينة مرجعية. ومن هذه المقارنة نستنتج:

1. مقارنة العينات المدعمة بالعينة المرجعية (العينات غير المدعمة بألياف الكربون)، حيث

لوحظ تحسن كبير في مقاومة الانحناء للعينات المدعمة.

2. العينة المدعمة من الداخل من الخارج تحملت حمل أكبر من العينة المدعمة من الداخل بألياف الكربون.
3. نوع الايبوكسي **sikadur32** أثبت نتائج جيدة كمادة رابطة.

التوصيات:

1. هذه الدارسة قد أعطت مؤشراً جيداً لمواصلة البحث في هذا المجال.
2. إعادة إجراء هذه الدراسة باستخدام ألياف الكربون ثنائية الاتجاه ومقارنة النتائج.
3. استخدام الألياف الزجاجية المدعمة ومقارنتها بألياف الكربون الأحادية الاتجاه المستخدمة في هذه الدراسة.
4. استخدام طرق وأشكال أخرى للتغليف بتغيير عرض الشرائح والمسافات بينها.
5. استخدام مادة رابطة أخرى بدل المستخدمة في هذه الدراسة ومقارنتها بها.
6. عمل دراسة واختبارات على كمرات خرسانية مدعمة بطرق مختلفة.
7. إجراء الدراسة على عينات اسطوانية واستخدام طرق أخرى للتدعيم.

المراجع

[1] رياض إبراهيم التركي، محمد خالد المليتي، تدعيم الأسطوانات الخرسانية باستخدام ألياف الكربون المدعمة -مشروع لاستكمال الحصول على درجة البكالوريوس في جامعة طرابلس قسم الهندسة المدنية، خريف 2019.

[2] أبو القاسم محمد العربي، عمران محمد كنشيل اختبارات على سلوك الانحناء بالكمرات الخرسانية المدعمة بألياف البوليمر، مجلة الجامعة – العدد الثامن عشر – المجلد الثالث-2016.

[3] AFZIR ADVANCE SOLUTION COMPANY
https://www.afzir.com/arabic/

and Schwegler, G. 1993. [4] Meier, U., Deuring, M., Meier, H., CFRP bonded sheets. Fibre Reinforced Plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications. Nani, A. (editor) Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.

[5] Gite, Miss. Suvidha R. Margaj Amrutvahini College of Engineering, Sangamner

[6] Sikadur®-32 Hi-Mod
https://usa.sika.com/en/construction/repair-protection/multi-purpose-epoxies/adhesives/sikadur-32-hi-mod.html

[7] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)