

Received	2025/10/03	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2025/10/26	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2025/10/27	تم نشر الورقة العلمية في

تحسين مقاومة الخرسانة للحريق بإضافة ألياف الكربون (دراسة معملية)

*أ. إيمان عبد الحميد علي الترهوني، م. هالة فوزي عبد الولي، أ. خالد علي محمد قليم

كلية الهندسة الزاوية - جامعة الزاوية - ليبيا

*e.attarhoni@zu.edu.com

الملخص

تتعرض الخرسانة لفقدان مقاومتها للضغط عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة، مما يجعل تحسين أدائها أمراً ذا أهمية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير إضافة ألياف الكربون على تحسين مقاومة الخرسانة للحرائق، استخدمت نسب مختلفة من ألياف الكربون (0.5%، 1%، 1.5%، 2% من وزن الإسمنت) لدراسة أثرها على خصائص الخرسانة الطازجة والمتصلدة، بما في ذلك قابلية التشغيل، مقاومة الضغط عند درجة حرارة الجو ودرجات حرارة مختلفة (250°C، 450°، 800°C)، نسبة الامتصاص، ومقاومة الشد غير المباشر عند عمر 28 يوماً. أظهرت النتائج أن إضافة الألياف أدت إلى انخفاض في قابلية التشغيل، بينما حققت العينات المحتوية على 1% من ألياف الكربون ثباتاً نسبياً في مقاومة الضغط عند درجة حرارة 250°C وتحسناً ملحوظاً عند درجة حرارة 450°C للخلطات المحتوية على 1% فأكثر. تشير النتائج إلى أن ألياف الكربون ذات أثر مزدوج يمثل بعض التحديات المرتبطة بالخواص الطازجة مقابل تحسن ملحوظ في الأداء الميكانيكي في البيئات الحرارية العالية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، ألياف الكربون، قابلية التشغيل، مقاومة الضغط، مقاومة الحريق، مقاومة الشد غير المباشر.

Enhancing the Fire Resistance of Concrete Using Carbon Fibers An Experimental Study

Eman Al-Tarhouni*, Hala Fawzi Abdulmoula, Khaled Ali Gleem

Faculty of Engineering - University of Zawia – Libya

[*e.attarhoni@zu.edu.com](mailto:e.attarhoni@zu.edu.com)

Abstract

Concrete loses a significant portion of its strength when exposed to elevated temperatures, making the enhancement of its thermal performance an important research objective. This study aims to evaluate the effect of carbon fibers on improving the fire resistance of concrete. Various fiber contents (0.5%–2% by cement weight) were used to investigate their influence on workability, compressive strength at ambient and elevated temperatures (250°C, 450°C, and 800°C), water absorption, and indirect tensile strength at 28 days. The results indicated that the addition of carbon fibers reduced workability, while the mix containing 1% carbon fibers showed relatively stable compressive strength at 250°C and a noticeable improvement at 450°C. Overall, carbon fibers exhibited a dual effect, presenting challenges in fresh properties while enhancing the mechanical and thermal performance of concrete.

Keywords: Concrete, Carbon fibers, Workability, Compressive strength, Indirect tensile strength, Fire resistance.

1. المقدمة:

تُعدّ الخرسانة من أكثر مواد البناء استخدامًا في العالم؛ نظرًا لمقاومتها العالية للضغط وتوفّر مكوناتها، إلا أن ضعفها النسبي في مقاومة الشد والتشقّق دفع الباحثين إلى تطوير خواصها بإضافة مواد مثل الألياف. وفي هذا السياق ظهرت ألياف الكربون كأحد أبرز الحلول لتحسين أداء الخرسانة؛ نظرًا لخصائصها الميكانيكية الممتازة، مثل القوة النوعية العالية، والمقاومة الجيدة للتآكل. أشارت العديد من الدراسات إلى أن دمج ألياف الكربون ضمن الخلطات الخرسانية يُسهم في تحسين مقاومة الشد والانحناء، ويقلل من تطور الشروخ الدقيقة. ففي دراسة أجراها (أبو القاسم محمد وآخرون، 2016) اختبرت فعالية ألياف البوليمر (كربون وزجاج) في تدعيم وتقوية الكمرات الخرسانية، شملت استخدام ألياف الكربون أحادية الاتجاه وألياف الكربون والزجاج ثنائية الاتجاه مقارنة بنتائج العينات

المرجعية غير المدعمة. فسجلت تحسناً كبيراً في مقاومة الانحناء، بلغت حوالي 207% عند استخدام طبقة واحدة من الكربون أحادي الاتجاه و حتى 243% عند استخدام طبقتين من ألياف الكربون أحادي الاتجاه، مقارنة بالعينات المرجعية. أما (خيرية كمال وآخرون، 2023) بحثت في مدى كفاءة ألياف البوليمر المصنوعة من الكربون (CFRP) لدعم وتقوية الكمرات والمكعبات الخرسانية، حيث تم تنفيذ واختبار مجموعة من المكعبات والكمرات الخرسانية غير المدعمة وأخرى مدعمة بألياف الكربون. تم تقسيم العينات بحيث تكون بعضها مرجعية، وبعضها تم تدعيمها بشرائح من ألياف الكربون ذات مسافات مختلفة من مركز العينة وعدد منها تم تغليفها بشكل تام، أظهرت النتائج زيادة في مقاومة الضغط بنسبة 13%، وتحسناً كبيراً في مقاومة الانحناء بلغ 385.71% مقارنة بالعينات غير المدعمة. من جانب آخر تناولت دراسة (Gao et al، 2020) تأثير عدة عوامل على خصائص الخرسانة المسلحة بألياف الكربون، منها الطول، والنوع (كربون منفرد أو مزيج مع ألياف أخرى) وتوزيع الألياف و نسبة إضافتها. فوجد أن أفضل أداء تحقق عند إضافة نسب تتراوح بين 1% و 1.5%. وقد نوهت الدراسة إلى التحديات المرتبطة بتكلفة الألياف وصعوبة توزيعها المنتظم. كما نوه (منير عارف الأطرش، وآخرون، 2021) في بحث يدرس تأثير درجات الحرارة المرتفعة على العارضات الخرسانية المسلحة وجد انخفاض في قيمة العزم المقاوم لعينات العارضات بزيادة درجة حرارة التسخين، وقد وصلت قيمة هذا الانخفاض حتى حوالي 70% من قيمة العزم المقاوم في درجة الحرارة الطبيعية. في سياق آخر بين (Zhou et al، 2018) أن إضافة نسب قليلة من ألياف الكربون أدت إلى تحسن في مقاومة الشد غير المباشر بنسبة تجاوزت 25%. كما أشار (Yoo and Banthia، 2016) إلى أن الخرسانة المسلحة بألياف الكربون تُظهر سلوكاً أكثر ليونة وقدرة أعلى على امتصاص الطاقة تحت الأحمال المتكررة. بناءً على ما سبق، تتجه هذه الدراسة إلى سد فجوة بحثية تتعلق بأداء الخرسانة المحتوية على ألياف الكربون عند تعرضها المباشر لدرجات حرارة مرتفعة، ويهدف البحث إلى تقييم تأثير إضافة نسب مختلفة من ألياف الكربون إلى الخلطة الخرسانية على خصائصها الفيزيائية والميكانيكية، مثل مقاومة الضغط والشد والانكماش، مع التركيز على أدائها تحت تأثير الحريق، بما يساهم في تطوير خرسانة أكثر أماناً وكفاءة في ظروف الطوارئ.

2. المنهجية:

يستعرض هذا القسم المنهجية العملية المتبعة في تنفيذ البحث، حيث تم اعتماد خطوات منظمة شملت تهيئة المواد الأولية وإجراء الفحوصات اللازمة لها وفق المواصفات القياسية، يليها تصميم الخلطات وإعدادها، ثم صب العينات ومعالجتها، وانتهاءً باختبار العينات وتحليل النتائج. وقد أخذ في الاعتبار الالتزام بالمعايير الفنية لضمان دقة النتائج وموثوقية البيانات المستخلصة.

1.2 المواد المستخدمة واختباراتها المعملية:

1.1.2 الإسمنت:

تم استخدام الإسمنت البورتلاندي الاعتيادي (Type 42.5N) في جميع الخلطات الخرسانية وهو من انتاج شركة الاتحاد العربي الليبية (مصنع زليتن)، اجري اختبار زمن الشك الابتدائي والنهائي للإسمنت وفقاً للمواصفات الليبية 1340/2009 كما موضح بالجدول (1).

الجدول (1) يوضح نتائج الاختبارات الفيزيائية للإسمنت البورتلاندي الاعتيادي المستخدم

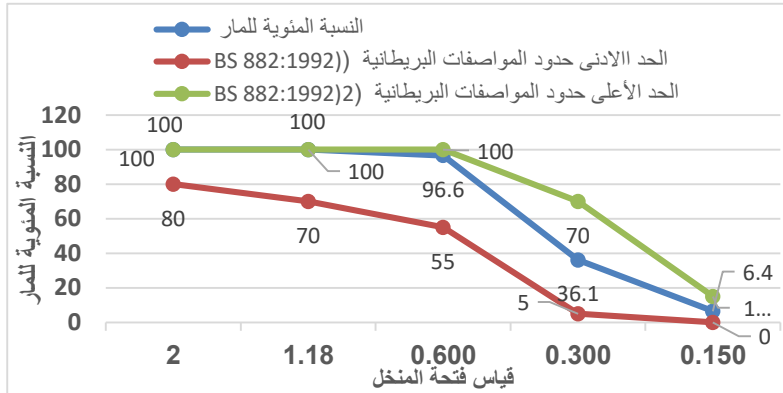
الخواص	النتائج	حدود المواصفات الليبية
زمن الشك الابتدائي	140 دقيقة	لا يقل عن 45 دقيقة
زمن الشك النهائي	3.4 ساعات	لا يزيد عن 10 ساعات

2.1.2 الركام :

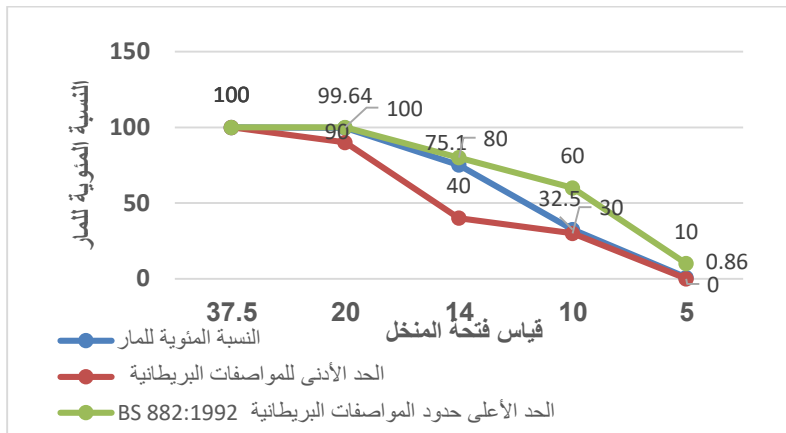
ورد ركام خشن مقاس 20 ملم من كسارات وادي الحي بالجبل الغربي، كما استخدم رمل طبيعي خالي من الشوائب مورد من مقالع مدينة زليتن. أجريت الاختبارات التالية:

▪ اختبار التحليل المنخلي للركام

تم فحص التدرج الحبيبي للركام بنوعيه وفقاً للمواصفات البريطانية (BS 882:2002) و الشكلا (1) و (2) يوضحان أن الركام بنوعيه ذو تدرج حبيبي مطابق للمواصفات.



الشكل (1) يوضح نتائج اختبار التحليل المنخلي للركام الناعم



الشكل (2) يوضح نتائج اختبار التحليل المنخلي للركام الخشن

اختبار الوزن النوعي للركام

تم تحديد الوزن النوعي للركام وفقاً للمواصفات البريطانية BSI 812 : Part2:75 وكان الركام الخشن ذو وزن نوعي 2.6 والركام الناعم (الرمل الطبيعي) بوزن نوعي 2.65 وكلاهما مطابقاً للمواصفات البريطانية والتي تحدده ما بين 2.6-2.7. والشكل (3) يوضح الأجهزة المستخدمة في ذلك.



الشكل (3) يوضح الأجهزة المستخدمة لاختبار الوزن النوعي للركام بنوعيه

■ اختبار تعيين وزن وحدة الحجوم للركام الخشن والناعم:
يغيد تعيين الوزن الحجمي في حساب النسبة المئوية للفراغات بين حبيبات الركام بمعلومية الوزن الحجمي والوزن النوعي الظاهري للركام. هذا الاختبار يجري طبقاً للمواصفات البريطانية (BS 812: 2002) كما موضح بالشكل (4).



الشكل (4) يوضح الأدوات المستخدمة في اختبار وزن وحدة الحجوم

يعد الركام الخشن ذو وحدة حجوم 1670 والركام الناعم بوحدة حجوم 1660 مطابقاً للمواصفات البريطانية والتي تحدده ما بين 1400-1800.

3.1.2 ماء الخلط:

تم استخدام مياه معدنية صالحة للشرب من مدينة الزاوية في جميع الخلطات الخرسانية.

4.1.2

لألياف (ألياف الكربون):

استخدمت ألياف الكربون المقطعة والتي تكون على شكل رقائق كما موضح في الشكل (5)، والتي وتحضر عن طريق حرق نسبة 90% من البولي اكريلونيتريل ونسبة 10%

من الرايون بعملية الكربنة بدون الأكسجين، ومن أبرز خواص الكربون المستخدم موضحة في الجدول (2).



الشكل (5) يوضح ألياف الكربون المستخدمة في الدراسة

الجدول (2) خواص ألياف الكربون المستخدمة في الدراسة

خواص ألياف الكربون	
94<	محتوى الكربون
1.76	الكثافة g/cm ³
4200-3500	قوة الشد MPa
240-220	معامل المرونة GPa
1.82	الاستطالة عند الكسر %

2.2 تصميم الخلطة:

شملت الدراسة عدد 5 خلطات مكونة من إسمنت، ركام ناعم وركام خشن بنسب وزنية (1:1.5:2.5) على التوالي وبمقاومة ضغط مستهدفة (30 MPa)، و محتوى مائي (w/c=0.5)، كما موضح بالجدول (3). ولغرض دراسة تأثير ألياف الكربون على الخلطات الخرسانية تم إعداد خلطة مرجعية M1 خالية من الألياف الكربون وعدد 4 خلطات خرسانية (M5, M4, M3, M2) تحوي إضافة الألياف بالنسب (0.5%, 1%, 1.5%, 2%) كنسبة من وزن الإسمنت على التوالي.

جدول (3) مكونات الخلطة الخرسانية للمتر المكعب

الإسمنت	الماء	الركام الخشن	الركام الناعم
400 Kg	200 L	1020 Kg	680Kg

3.2 الخلط وإعداد العينات:

تم خلط المواد الأولية (الإسمنت، الركام الناعم، الركام الخشن) في خلاط كهربائي وفق النسب التصميمية، وأضيفت الألياف في الخلطات المعدلة حسب النسب المحددة لإنتاج 12 مكعبًا مقاس (15سم)؛ لفحص مقاومة الضغط عند درجة حرارة الجو ودرجات مختلفة (250،800،450) درجة مئوية، عدد 3 مكعبات؛ لفحص نسبة الامتصاص وعدد 3 نماذج إسطوانية مقاس (15*30سم)؛ لاختبار مقاومة الشد غير المباشر عند عمر 28 يوم لكل خلطة. أُجري الخلط الجاف لمدة تتراوح بين 2-3 دقائق، ثم أُضيف الماء تدريجيًا، واستُكمل الخلط لمدة لا تتجاوز 5 دقائق، صُبَّت الخلطة في القوالب بعد أن نُظِّفَتْ وَرُيِّتَتْ بشكل مناسب باستخدام الهزاز، أزيلت القوالب بعد مرور 24 ساعة كما موضح بالشكل (6)، ووضعت العينات في الماء لمعالجتها لمدة 28 يوم.



شكل (6) يوضح إعداد العينات

4.2 الاختبارات المعملية للخرسانة:

1.4.2 اختبار الهبوط :

الهدف من اختبار الهبوط هو قياس قابلية التشغيل للخرسانة الطازجة وتحديد قوامها. يجرى هذا الاختبار وفقا للمواصفات البريطانية (BS EN 12350-2) باستخدام قالب الاختبار الموضح بالشكل (7)، يقاس مقدار الهبوط بعد رفع المخروط مباشرة وهو الفرق بين ارتفاع القالب وارتفاع مركز الخرسانة الطازجة.



الشكل (7) يوضح كيفية إجراء اختبار الهبوط

2.4.2 اختبار نسبة امتصاص الخرسانة للماء :

الهدف من اختبار نسبة الامتصاص هو تحديد قدرة الخرسانة على امتصاص الماء، تعيين نسبة الامتصاص وفقاً للمواصفات البريطانية (BS 1881-122:2011). المكعبات خرسانية مقاس 15 سم توزن العينة المشبعة جافة السطح ويتم أخذ وزن العينة (أ)، بعد ذلك تجفف العينات المستخرجة من الماء في فرن درجة حرارته 125 درجة مئوية لمدة 24 ساعة كما موضح بالشكل (8)، يسجل وزن العينة (ب)؛ وتحسب نسبة الامتصاص

$$\text{نسبة الامتصاص} = \frac{100 \times \text{ب} - \text{أ}}{\text{ب}}$$



الشكل (8) يوضح الفرن المستخدم في اختبار نسبة امتصاص

3.4.2 اختبار مقاومة الضغط:

يُعتبر اختبار مقاومة الضغط مؤشراً أساسياً على جودة الخرسانة، تم إجراء اختبار مقاومة الضغط باستخدام آلة ضغط بمعمل الخرسانة بالمعهد العالي للعلوم والتقنية بالزاوية لعدد

(12) عينة نوع مكعب مقاس (15سم) لكل خلطة لاختبار مقاومة الضغط في درجة حرارة الجو وعند درجات حرارة (250⁰, 450⁰, 800⁰). كما موضح بالشكل (9).



الشكل (9) يوضح جهاز اختبار مقاومة الضغط

4.4.2 اختبار مقاومة الشد غير المباشر:

الهدف من اختبار الشد الغير مباشر هو قياس قدرة الخرسانة على تحمل القوى المؤثرة عليها في اتجاه الشد، تم إجراء هذا الاختبار على العينة الإسطوانية مقاس (15*30سم) في العمر 28 يوم كما موضح بالشكل (10).

مقاومة الشد الغير مباشر: $\frac{2P}{\pi dL}$
حيث أن: P- حمل الكسر d- قطر الإسطوانة L- الطول الإسطوانية



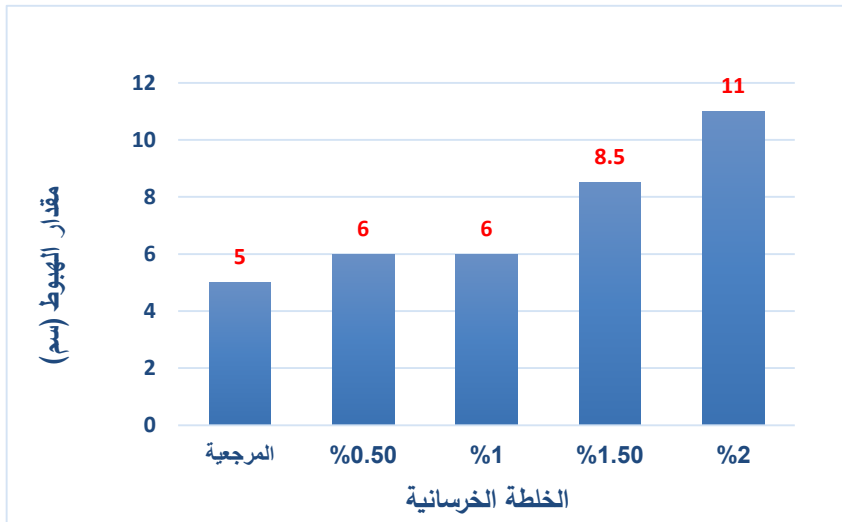
الشكل (10) يوضح اختبار مقاومة الشد الغير مباشر للعينة الإسطوانية

3. النتائج والمناقشة:

النتائج التجريبية لاختبار الهبوط لجميع عينات الدراسة مبينة بالجدول (4)، والشكل (11) يوضح التغير في مقدار الهبوط وفق تغير نسبة إضافة ألياف الكربون لها في الخلطة، معمليا يجب توزيع ألياف الكربون بشكل منتظم في الخلطة، إذا لم يتم توزيعها بشكل جيد يمكن أن تتكتل الألياف مما يؤدي إلى تدهور قابلية التشغيل وتفاوت في خصائص الخرسانة، وجد أن ألياف الكربون تميل إلى تقليل قابلية التشغيل للخرسانة، حيث إنها تعيق حركة المكونات داخل الخلطة بسبب شكلها وطبيعتها اللصيقة، هذا يجعل الخلطة أكثر لزوجة وبحاجة إلى زيادة نسبة الماء في الخلطة أو المضافات لتعويض انخفاض قابلية التشغيل، مما قد يؤثر على مقاومة الخرسانة. وقد تم إضافة نسبة ماء للإسمنت تصل إلى (0.55) من وزن الإسمنت، فكلما زادت نسبة الألياف في الخلطة زادت كمية الماء اللازمة.

جدول (4) يبين مقدار الهبوط لجميع الخلطات الخرسانية

نسبة إضافة الألياف	المرجعية	%0.5	%1	%1.5	%2
مقدار الهبوط cm	5	6	6	8.5	11



الشكل (11) يوضح مقدار الهبوط للخلطات الخرسانية

تظهر النتائج أن إضافة ألياف الكربون بنسبة 0.5% و 1% من حجم الإسمنت للخلطة أدت لزيادة الهبوط بمقدار 1cm، وإضافة نسبة 1.5% و 2% أدت لزيادة الهبوط بمقدار 3.5، 6 سم على التوالي مقارنة بالمرجعية، يمكن تفسير ذلك بأن الألياف تزيد من الاحتكاك الداخلي والزوجة للخلطة حول الألياف، مما يتطلب كمية ماء إضافية للحفاظ على قابلية التشغيل. بزيادة الماء لتعويض هذا الاحتكاك المحلي، يزداد الماء الحر في الفراغات مما ينعكس عملياً بزيادة الهبوط (slump) ظاهرة تبدو متناقضة ظاهرياً لكنها نتاج تداخل تأثيري الاحتكاك للألياف وتوزيع الماء الحر داخل الخلطة.

الجدول (5) يبين النتائج التجريبية لاختبار تحديد الكثافة ونسبة الامتصاص لجميع عينات الدراسة، إن إضافة ألياف الكربون بنسب 0.5% و 1% من وزن الإسمنت للخرسانة أدت إلى زيادة طفيفة في نسبة الامتصاص بنسب 3.4% و 4.14% على التوالي، أما العينات التي تحتوي على نسب 1.5% و 2% من الألياف فقد كانت الزيادة فيها أكثر وضوحاً، حيث كانت الزيادة بنسب 56.5% و 87.6% على التوالي مقارنة بالخلطة المرجعية، ورغم الزيادة الملحوظة إلا أنها تعد مطابقة للمواصفات والتي تنص على أن لا تزيد نسبة الامتصاص عن 10%، من ناحية أخرى لوحظ أن كثافة الخرسانة تراجعت تدريجياً لجميع العينات التي أضيفت لها ألياف الكربون، مما يشير إلى زيادة المسامية وتقليل الكثافة، وبناءً عليه فإن زيادة نسبة ألياف الكربون المضافة تؤدي إلى زيادة مسامية الخرسانة وامتصاصها للماء بينما تقلل من كثافتها.

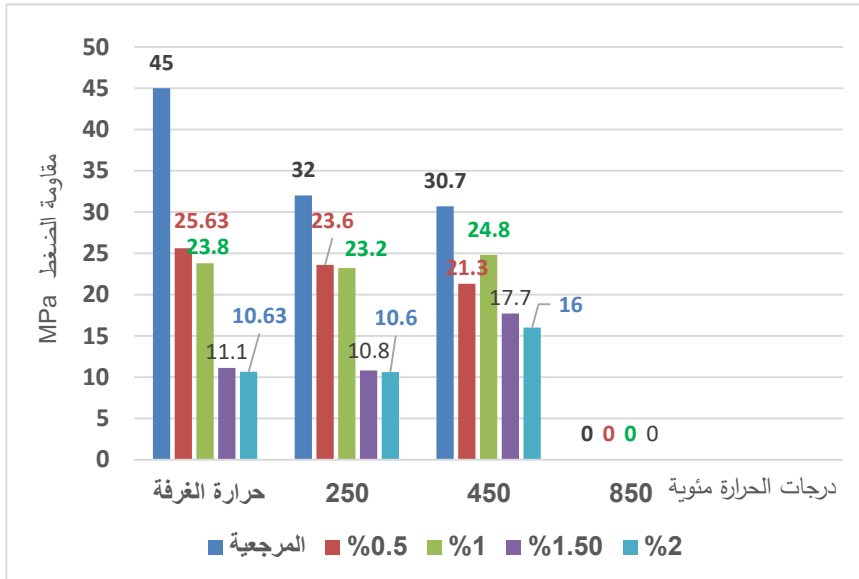
الجدول (5) يبين تأثير اضافة الياف الكربون على الكثافة ونسبة الامتصاص

نسبة إضافة الألياف	المرجعية	0.5%	1%	1.5%	2%
الكثافة (كجم / م ³)	2139.3	2060	1994.5	1797.43	1725.01
نسبة الامتصاص (%)	5.07	5.24	5.28	7.94	9.51

وبالنظر للشكل (12) يوضح تأثير إضافة ألياف الكربون على خاصية مقاومة الضغط للخرسانة في درجات حرارة مختلفة عند العمر 28 يوم . تشير النتائج إلى أن إضافة ألياف الكربون بالنسب 05%، 1%، 1.5%، 2% من وزن الإسمنت للعينات التي تركت بدرجة حرارة الغرفة سببت نقصان واضح في قيمة مقاومة الضغط للخرسانة بنسب قاربت النصف للخلطتين ذات إضافة ألياف 1% و 0.5%، أما باقي الخلطات فكان الانخفاض كبير يفوق 75% مقارنة بالعينة المرجعية، في حين أن العينات التي وضعت

في فرن درجة حرارته 250° نقصت مقاومتها بنسب 8.6، 2.59، 2.8، و 0.28% على التوالي مقارنة بالمرجعية، وعند حرق العينات في درجة حرارة تصل حتى 450° لوحظ أن مقاومة الضغط للعينة المرجعية والعينة التي تحتوي نسبة 0.5% من الألياف نقصت، بينما زادت قيمة مقاومة الضغط للعينات 1، 1.5، 2% بشكل ملحوظ في حين انهارت جميع عينات الدراسة عند حرارة 800 درجة مئوية.

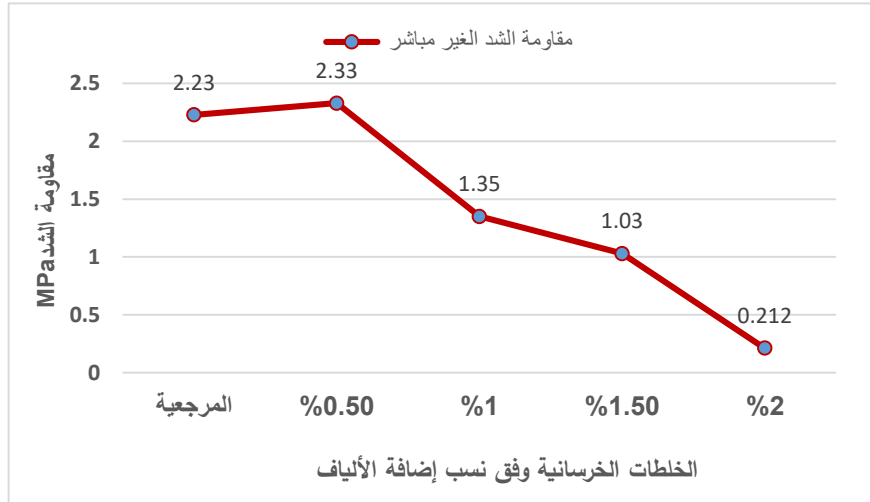
من الممكن افتراض أن الألياف تشكل بنية ليفية مستمرة تعمل على الحفاظ على تماسك المصفوفة بعد بدء تدهور رابط المونة (cement paste) بفعل الحرارة، فتقلل من انتشار الشقوق بالإضافة، قد يتوافق معامل التمدد الحراري والخواص الحرارية للألياف مع البنية الكلية بحيث يقللان من تراكم الإجهادات الحرارية مما يحد من تفكك البنية ويظهر في مقاومة متبقية أعلى عند 450° م للخلطات المحتوية على $\leq 1\%$ ألياف.



الشكل (12) يوضح تأثير إضافة ألياف الكربون على مقاومة الضغط الخرسانة

أما نتائج اختبار مقاومة الشد غير المباشر، فإن إضافة ألياف الكربون للخرسانة كنسبة 0.5% من وزن الإسمنت أدت إلى زيادة مقاومة الشد بنسبة 5%، بينما إضافة النسب 1.5% و 2% من وزن الإسمنت أدت إلى نقصان واضح في قيمة مقاومة الشد للخرسانة بنسبة 39.5، 53.8، و 90.5% على التوالي مقارنة بالمرجعية عند عمر 28

يوما. والشكل (13) يوضح تأثير إضافة ألياف الكربون 28 يوما، والشكل (13) يوضح تأثير إضافة ألياف الكربون على خاصية مقاومة الشد غير المباشر.



الشكل (13) يوضح تأثير إضافة ألياف الكربون على خاصية مقاومة الشد غير مباشر

كما لوحظ أن جميع العينات الخرسانية الإسطوانية التي تحتوي على ألياف الكربون وخاصة العينات التي بها نسب 1.5% و2% من ألياف الكربون حافظت على شكلها وظلت متماسكة ولم يظهر عليها غير شق بسيط بعد تعريضها لقوة الشد غير المباشر ووصولها للفشل، على عكس عينات الخلطة المرجعية التي انقسمت لنصفين عند وصولها للفشل تحت تأثير قوة الشد كما موضح بالشكل (14) والذي يعزى للترابط الليفي للخليط.



الشكل (14) تأثير إضافة ألياف الكربون على شكل الإنفلاق

4. الاستنتاجات:

أظهرت النتائج أن إضافة ألياف الكربون تقلل من قابلية تشغيل الخرسانة، الأمر الذي يستلزم استخدام ماء إضافي أو ملدنات، مما أدى إلى زيادة المسامية وانخفاض الكثافة وبالتالي ارتفاع نسبة الامتصاص. كما سُجل انخفاض في مقاومة الضغط عند الظروف العادية وعند 250 °م، في حين تحسنت المقاومة بشكل ملحوظ عند 450 °م للخلطات المحتوية على 1% فأكثر من الألياف، مما يدل على فاعليتها في تحسين الأداء تحت الظروف الحرارية العالية، أما بالنسبة لمقاومة الشد غير المباشر فقد حققت إضافة نسبة 0.5% أفضل تحسن، بينما انخفضت المقاومة مع زيادة نسب الألياف مع ملاحظة احتفاظ العينات المدعمة بالألياف بتماسكها وشكلها مقارنة بالعينات المرجعية. وبناءً على ذلك، يمكن القول إن ألياف الكربون تُظهر أثراً مزدوجاً يتمثل في بعض التحديات المرتبطة بالخواص الطازجة وزيادة المسامية، مقابل تحسن ملحوظ في الأداء الميكانيكي والحراري، وهو ما يستدعي موازنة دقيقة بين هذه العوامل عند النظر في استخدامها.

5. الخلاصة:

تبرهن النتائج على إمكانية توظيف ألياف الكربون في تعزيز مقاومة الخرسانة ضمن البيئات الحرارية العالية، وتوصي الدراسة باعتماد محتوى ألياف 1% مع استخدام الملدنات المناسبة لضمان تحقيق توازن بين خصائص الخرسانة الطازجة وخواصها الصلبة في ظروف الحرارة العالية.

6. المراجع:

- أبو القاسم محمد العربي، د. عمران محمد كنشيل (2016م). اختبارات على سلوك الانحناء بالكميرات الخرسانية المدعمة بألياف البوليمر. جامعة طرابلس.
- المواصفات القياسية الليبية م ق ل 48-1-2020م.
- خيرية كمال اقليصة، د. زيدان علي حتوش، وصال البهلول بن حسونة (2023م) - دراسة مقدمة للأكاديمية الليبية.
- منير عارف الأطرش، زكائي طريفي، عصام محمد عبد الماجد (2021م). تأثير الحرارة العالية على العارضات الخرسانية المسلحة المحسنة. سوريا. مجلة العلوم الهندسية.
- British Standards Institution BSI 812. (2002). Testing aggregates. British Standard, London, UK.

- British Standards Institution BSI 882. (2002). Specification for aggregates from natural sources for concrete. British Standard, London, UK.
- BS 1881- 122 2011. Testing concrete: Method for determination of water absorption. British Standard Institution, London, UK.
- Gao, Y., Zhang, L., & Wang, Y. (2020). Effect of fiber type and content on the mechanical properties and durability of carbon fiber reinforced concrete. *Materials*, 13(18), 4014. <https://doi.org/10.3390/ma13184014>
- Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2016). Mechanical and structural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete holding different fibers. *Construction and Building Materials*, 107, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.004>
- Zhou, X., Li, Q., & Wang, Z. (2018). Mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete at different strain rates. *Construction and Building Materials*, 179, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.195>