

# تدهور قوة الترابط بين الخرسانة و GFRP تحت تأثير المعالجة الحرارية

هاجر فتحي محمد  
قسم الهندسة المدنية، جامعة عمر المختار  
البيضاء - ليبيا  
hajer.mohamed@omu.edu.ly

عمر رمضان الزروق  
قسم الهندسة المدنية، جامعة عمر المختار  
البيضاء - ليبيا  
omerelzaroug@yahoo.com

الخرسانة الليقية هي الخرسانة المصنوعة من الاسمنت والركام والماء وألياف موزعة توزيعاً عشوائياً في الخلطة الخرسانية. إضافة الألياف الحديدية إلى الخرسانة المسلحة يمكن أن يحسن من خواصها الهندسية كمتانة الانكسار ومقاومة الانحناء والكلل و الصدم والبري. كما إن الألياف الحديدية تعمل علي تقليل اتساع التشققات في الخرسانة وإعادة توزيعها، واهم وظيفة للألياف إنها تزيد من قيمة معيار المتانة للخرسانة زيادة كبيرة، وبالتالي تحول ميكانيكية الكسر من كسر قصفي مفاجئ إلى كسر غير قصفي وتدرجي [2].



شكل 1: التشقق الحراري الناتج عن التمدد العرضي لقضيب GFRP

قام الباحث Morsy [3] بأجراء دراسة لتقييم تأثير درجات الحرارة المرتفعة علي الخواص الميكانيكية والبنية المجهرية لخرسانة دقيق السليكا. حيث استخدم مكعبات مقاس 100 مم لقياس مقاومة الانضغاط واسطوانات مقاس 100\*200 مم لقياس مقاومة الشد. تمت معالجة النماذج أولاً عند رطوبة نسبية لمدة 24 ساعة وبعدها في الماء لمدة 28 يوم، ومن ثم تم تعريضها لدرجات حرارة مختلفة (100، 200، 400، 600، 800 درجة مئوية) لمدة ساعتين ثم تركت لتبرد عند درجة حرارة الغرفة. بالنسبة للخرسانة البورتلاندية العادية (0% Silica Flour) تقل كلا من مقاومة الانضغاط ومقاومة الشد إلى 100 م° ثم ترتفع المقاومة إلى 200 م° وبعدها تقل المقاومة، يمكن أن يفسر انخفاض مقاومة الانضغاط عند درجة 100 درجة مئوية إلى خروج الماء الحر مسبباً إجهادات داخلية وبعدها تستعيد الخرسانة قوتها عندما تفقد كل ماؤها.

قام Jose وآخرون [4] بتحليل استخدام الخرسانة الهيكلية عالية الأداء المقواة بألياف البولي بروبيلين والمعرض لدرجات حرارة مختلفة (100، 300، 500، 700 درجة مئوية) وكانت أوقات التعرض (6 و 24 و 48 ساعة). حيث تم التحليل الحراري الوزني، سلوك الكسر، قوة الانضغاط باستخدام مكعبات 50 مم، معامل يونج، وقوة الشد للخرسانة. أجريت الاختبارات علي النماذج بعد تعرضها لدرجات الحرارة المختلفة ومن ثم بردت لمدة 24 ساعة. عند تسخين النماذج حتى 100 م° تقل مقاومة الانضغاط بسبب ضغط البخار في الخرسانة، وهذا السلوك مشابه لما تم الكشف عنه في دراسة آخر [5]. بينما بين 100 و 300 درجة مئوية أثرت درجات الحرارة علي عجينة الاسمنت مما يحسن ترطيبه وبذلك تؤدي إلي زيادة في مقاومة الانضغاط. عند درجات حرارة اعلي من 300 درجة مئوية هناك قدر كبير من التشققات في الخرسانة، مما تضعف مقاومة الانضغاط مع زيادة الحرارة. أيضا تقل مقاومة الشد حتى

المخلص - التشققات في الهياكل الخرسانية تحدث نتيجة عدة أسباب منها التحميل الزائد، الزحف تحت الحمل المستمر، الانكماش، أخطاء البناء، تآكل حديد التسليح، الإجهادات الناتجة من ارتفاع درجات الحرارة. كما تظهر أيضا نتيجة الاختلاف في معامل التمدد الحراري بين الخرسانة وقضبان الألياف الزجاجية (GFRP). حيث أن معامل التمدد العرضي لقضبان GFRP أكبر تقريبا 3 مرات من معامل تمدد الخرسانة. عند تعرض الخرسانة المسلحة بقضبان GFRP لدرجات حرارة مرتفعة ينتج عنها إجهادات حرارية حول قضبان GFRP مما يؤدي إلى حدوث تشققات تقلل من قوة الترابط بين الخرسانة و GFRP والمتانة للأعضاء الإنشائية. ولتقليل من التشققات الحرارية في الخرسانة المسلحة ولزيادة مقاومة الشد للخرسانة تستخدم ألياف حديدية بطول 3 إلى 8 سم موزعة توزيعاً عشوائياً في جميع الاتجاهات خلال كتلة الخرسانة. في هذا البحث تم دراسة تأثير درجات الحرارة على خواص الخرسانة مع وبدون الألياف الحديدية وكذلك على قوة الترابط بين الخرسانة وقضبان الألياف الزجاجية (GFRP). تم تسخين النماذج في الفرن لدرجات حرارة (40، 80، 120 درجة مئوية). حيث تم دراسة مقاومة الانضغاط والموجات فوق الصوتية والكثافة باستخدام مكعبات مقاس (100 مم)، مقاومة الشد الانشطاري باستخدام اسطوانات مقاس (100\*200 مم). تم أيضاً إجراء اختبار الدفع (Push out) للتحقق من قوة الترابط بين GFRP والخرسانة باستخدام مكعب خرساني مقاس (100 مم) مسلح بقضيب GFRP قطر 16 مم في وسط المكعب.

نتائج الاختبارات بينت تأثير درجات الحرارة علي خواص الخرسانة (مقاومة الانضغاط ومقاومة الشد) وقوة الترابط بين الخرسانة وقضيب GFRP مقارنة بالعينات المرجعية.

الكلمات المفتاحية: درجات الحرارة، التشققات، ألياف الحديد، مقاومة الانضغاط، GFRP

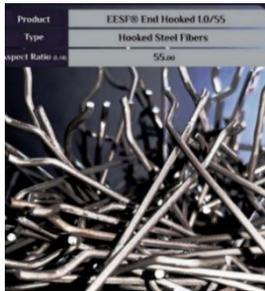
## 1. المقدمة

الخرسانة مادة إنشائية شائعة الاستخدام في صناعة التشييد ويعزي ذلك بشكل كبير إلى خواصها الميكانيكية المتميزة والتي من أهمها مقاومتها العالية للانضغاط. تتعرض الخرسانة للتشققات نتيجة عدة أسباب من أهمها التحميل الزائد، الزحف تحت الحمل المستمر، الانكماش، تآكل حديد التسليح، أخطاء البناء، الإجهادات الناتجة عن الحرارة. كما تحدث أيضا التشققات نتيجة الاختلاف بين معامل التمدد الحراري للخرسانة وقضبان الألياف الزجاجية (GFRP). حيث إن معامل التمدد العرضي لقضبان الألياف الزجاجية أكبر ثلاث مرات من معامل التمدد العرضي للخرسانة. عند تعرض الخرسانة المسلحة بقضبان الألياف الزجاجية (GFRP) لدرجات حرارة مرتفعة ينتج عنها إجهادات حرارية حول قضيب GFRP مما يؤدي إلى حدوث تشققات تقلل من قوة الترابط بين الخرسانة وقضيب GFRP والمتانة للأعضاء الإنشائية (شكل 1) [1].

استلمت الورقة بالكامل في 13 يونيو 2022 وروجعت في 14 يوليو 2022 وقبلت للنشر في 1 أغسطس 2022

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 21 أغسطس 2022

الهيكل الإنشائية [7] وهو أقل من حيث التكلفة. كما ان قضبان الألياف الزجاجية تعتبر خفيفة الوزن ولديها قوة شد أكبر من الفولاذ ولا تؤثر على المجالات المغناطيسية وترددات الراديو وغير موصلة للحرارة وغير قابلة للتآكل [8]. يوجد بها تشوه على سطح القضيب لتقوية الترابط الميكانيكي بين الخرسانة و قضبان GFRP. الجدول 2 يوضح خواص GFRP المستخدمة في هذا البحث.



شكل 2: ألياف الحديد المضافة للخرسانة



شكل 3: قضبان الألياف الزجاجية GFRP قطر 16 مم

جدول 2. خواص قضبان GFRP

الخواص	GERP
الكثافة (جم/سم <sup>3</sup> )	2.1 – 1.25
إجهاد الخضوع	NA
مقاومة الشد MPa	690 - 483
معامل المرونة GPa	51 - 35
معامل التمدد الطولي (10 <sup>-6</sup> /°C)	10 - 6
معامل التمدد العرضي (10 <sup>-6</sup> /°C)	23 - 21

#### 4. تصميم الخلطة الخرسانية

تم تصميم نسب الخلطة الخرسانية وفقاً للطريقة البريطانية وكما هو موضح بالجدول 3. تم خلط جميع مواد الخلطة في خلاط معلمي بسعة 56 لتراً. تم أولاً خلط الركام الجاف والاسمنت في الخلاط لمدة 30 ثانية، وبعدها تمت إضافة ألياف الحديد لمدة 30 ثانية مع استمرار الخلط ومن ثم سكب الماء تدريجياً خلال مدة 15 ثانية مع استمرار الخلط لمدة دقيقتين، ليكون الوقت الكلي للخلط 3 دقائق لكل خليط خرساني. بعد الخلط، يتم تعبئة القوالب بنوعين من الخرسانة مع وبدون ألياف الحديد ومن ثم دمكها بواسطة طاولة اهتزازية، وبعد الانتهاء من الدمك يتم تسوية السطح العلوي وتشطيبه بالمجرفة.

جدول 3. كميات المواد للخلطة الخرسانية (كجم/م<sup>3</sup>)

الخلطة	الاسمنت	الماء	الرمل	الركام الخشن	
				ألياف الحديد	الركام الخشن
SF-0	320	190	720	0	10-5 مم
SF-0.75	320	190	720	59.025	20-10 مم

100 م<sup>3</sup>، بينما تزيد مقاومة الشد عند درجات حرارة اعلي من 100 م<sup>3</sup> بسبب تأثير ترطيب عجينة الاسمنت بواسطة الحرارة. في الخلاطات المقاومة بالألياف من 500 إلى 700 درجة حدث هبوط ملحوظ أكثر بسبب الجفاف وتحلل عجينة الاسمنت وانصهار الألياف مما يؤدي إلي توليد فراغات في القالب الخرساني.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة تأثير درجات الحرارة المختلفة (40، 80، 120 درجة مئوية) على خواص الخرسانة مع وبدون الألياف الحديدية وكذلك على قوة الترابط بين الخرسانة وقضبان الألياف الزجاجية (GFRP)..

#### 2. البرنامج العملي

تم معملياً دراسة تأثير درجات الحرارة المختلفة علي نماذج الخرسانة العادية والنماذج المحسنة بالألياف الحديدية (SF). تسخن النماذج في الفرن عند درجات حرارة مختلفة (40، 80، 120 درجة مئوية) للمقارنة مع النماذج المرجعية (درجة حرارة الغرفة). بعد تسخين النماذج ومن ثم تبريدها لمدة 24 ساعة، تم اجراء اختبارات مقاومة الانضغاط والكثافة وسرعة النبض بالموجات فوق الصوتية باستخدام مكعب مقاس 100 مم وقوة الشد (اسطوانة 100\*200 مم). تم أيضا إجراء اختبار الدفع للتحقق من الضرر في قوة الترابط بين GFRP والخرسانة نتيجة اختلاف التمدد الحراري العرضي وذلك باستخدام مكعب خرساني مقاس 100 مم مسلح بقضيب GFRP قطر 16 مم وضع في وسط المكعب مع وبدون الألياف الحديدية.

#### 3. المواد المستخدمة

##### أ. الاسمنت

استخدم اسمنت بورتلاندي اعتيادي منتج من مصنع الفنتانج الواقع في مدينة درنة (ليبيا) وهو مطابق للمواصفة البريطانية BS 12: 1996 [6].

##### ب. الركام الناعم والخشن

تم استخدام الرمل الطبيعي المورد من منطقة الحنية (البيضاء) بوزن نوعي 2.7% وامتصاص 2.4%، وكان الركام الناعم مطابق للمواصفة البريطانية BS 882:1992 [6].

استخدم ركام خشن متدرج بأحجام (10-20) مم و (5-10) مم. يوضح الجدول 1 الخواص الفيزيائية والميكانيكية للركام المستخدم في هذا البحث وفقاً للمواصفات البريطانية BS 812: Part 2: 1995، BS 812: Part 112: 1990، BS 812: Part 110: 1990 [6].

##### ج. ماء الخلط

الماء المستخدم في الخلط والمعالجة هو ماء صالح للشرب.

جدول 1. الخواص الفيزيائية والميكانيكية للركام الخشن

خواص الركام	20-10 مم	10-5 مم
الوزن النوعي الظاهري	2.6	2.6
الامتصاص (%)	2.3	2.8
معامل التصادم (%)	10.0	
معامل التفتت (%)	25.0	

##### د. الألياف الحديدية

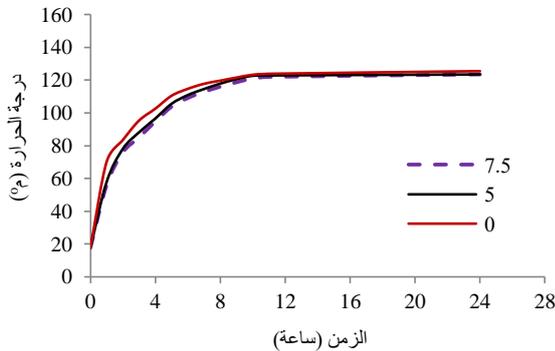
تم استخدام ألياف حديدية ذات طرف معكوف بطول 55 مم وقطر مكافئ 1.0 مم وطول خطاف 2.5 مم وارتفاع خطاف 40 مم (الشكل 2). في هذا البحث تم إضافة نسب ألياف الحديد إلى الخرسانة بنسبة 0.75 من حجم الخرسانة.

##### هـ. قضبان GFRP

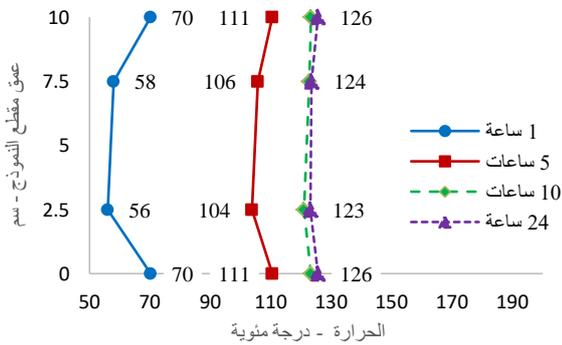
تم اختيار قضبان الألياف الزجاجية (GFRP) بقطر 16 مم كما هو موضح بالشكل 3. تحسن قضبان GFRP بشكل كبير من طول عمر

التسخين واعطت نفس شكل المنحنى تقريباً. وهذا يرجع إلى أن تسخين العينة كان من الجوانب الأربعة وقرارات الحرارة سجلت بعد كل ساعة. كما نلاحظ أيضاً من الشكل أنه بعد تقريباً 10 ساعات من التسخين فإن درجات الحرارة في الحساسات الحرارية (رقم 1، 2، 3، 4) زادت بشكل خطي تقريباً. ويفسر ذلك إلى أن درجة التسخين المطلوبة 120 م° تم الوصول إليها بعد 10 ساعات من التسخين ومن ثم تركت العينة في الفرن لمدة 24 ساعة مما أدى إلى توحيد درجة الحرارة في جميع أنحاء النموذج الخرساني المسخن.

يوضح الشكل 8 توزيع درجات الحرارة غير الخطية على طول عمق النموذج (شكل 6) في أوقات مختلفة من التسخين (1 و 5 و 10 ساعات). درجات الحرارة المقاسة على الأسطح الخارجية (السطح السفلي والعلوي عند منسوب 0 و 10 سم، رقم 2 و 1 على التوالي، شكل 6) كانت أكبر بقليل من درجات الحرارة الداخلية عند منسوب 5 و 7.5 سم (رقم 4 و 3 على التوالي، شكل 6) وذلك لأن الأسطح الخارجية تكتسب الحرارة مباشرةً بواسطة كل من الإشعاع والحمل الحراري، بينما اكتسبت الحساسات الحرارية الداخلية رقم 3 و 4 الحرارة عن طريق التوصيل. كما لوحظ من الشكل 8 بأن هناك تباين في درجات الحرارة المسجلة في كل وقت (مثلاً عند 1 ساعة و 5 ساعات) وهذا يرجع لعدة عوامل منها: (1) مقدار درجة الحرارة الأولية، (2) معدل زيادة درجة الحرارة و (3) الوقت المستغرق لكل زيادة في درجة الحرارة. درجات الحرارة غير الخطية داخل جسم الخرسانة قد ينتج عنها إجهادات شد مما يسبب في ظهور تشققات حرارية داخلية إذا كان إجهاد الشد المتولد من الحرارة أكبر من إجهاد الخرسانة، وهذه التشققات الحرارية قد تؤدي إلى التقليل من خواص الخرسانة.



شكل 7: توزيع درجات الحرارة داخل وخارج النموذج



شكل 8: توزيع درجات الحرارة غير الخطية على طول عمق النموذج

#### ب- تأثير الحرارة على شكل النموذج

بعد تعريض نماذج الخرسانة العادية وكذلك نماذج الخرسانة المعززة بألياف الحديد لدرجات الحرارة (40، 80، 120 م°) تم فحصها بصرياً للتحقق من ظهور أي تشققات نتيجة اختلاف التمدد الحراري العرضي بين الخرسانة و GFRP (جدول 5). بعد الانتهاء من اختبارات التسخين لجميع النماذج لوحظ تشقق بنموذج الخرسانة العادية (شكل 9) والمعرضة لحرارة مقدارها 120 م°، بينما النماذج الأخرى لم يظهر بها أي تشققات خارجية.

يوضح شكل 9 تشقق حراري في الغطاء الخرساني وعلى طول مقطع نموذج الخرسانة العادية بعد تعرضها لحرارة مقدارها 120 م°. ويرجع

## 5. معالجة نماذج الاختبار

بعد الصب، تمت تغطية النماذج بخيش مبلل وتركت لمدة 24 ساعة في القالب عند  $20 \pm 2$  درجة مئوية (درجة حرارة المختبر). بعد 24 ساعة، تمت إزالة النماذج من القالب وحفظها في الماء لمدة 28 يوم عند 20 درجة مئوية. بعد المعالجة سخنت النماذج في الفرن لمدة 24 ساعة لكل نوع من درجات الحرارة المختلفة (40، 80، 120 م°)، ثم تركت لتبرد لمدة 24 ساعة (الشكل 4).



شكل 4: نماذج معرضة لدرجات الحرارة في الفرن

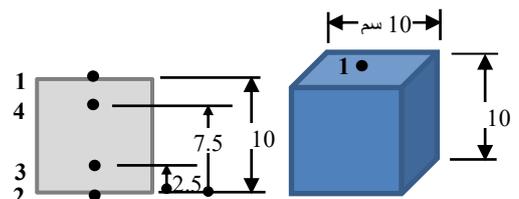
## 6. النتائج والمناقشة

### أ- توزيع درجات الحرارة

عرضت نماذج الخرسانة العادية والحاوية على الألياف الحديدية لثلاثة 3 درجات حرارة مختلفة وهي 40، 80، 120 م° من الجوانب الأربعة بواسطة الفرن الكهربائي (شكل 4). تم قياس درجات الحرارة على أعماق مختلفة داخل جسم النماذج الخرسانية بواسطة الحساسات الحرارية المتصلة بجهاز قياس درجات الحرارة (شكل 5). تم استخدام أربعة حساسات حرارية من الأسلاك الدقيقة، اثنان تم وضعهما خارجياً على السطح العلوي والسفلي (رقم 1 و 2 على التوالي) والثالث والرابع تم زرعهما داخل جسم الخرسانة في موقعين مختلفين ويبعدان عن بعضهما بمسافة 5 سم و كما هو موضح في الشكل 6. سمح هذا الترتيب للحساسات الحرارية بتحديد توزيع درجات الحرارة على طول عمق المقطع الخرساني وللتحقق من توحيد درجة الحرارة في جميع أنحاء النموذج الخرساني المسخن. تمت حماية أطراف الحساسات الحرارية لتجنب أي اختراق للرطوبة والأضرار الناجمة أثناء صب النماذج.

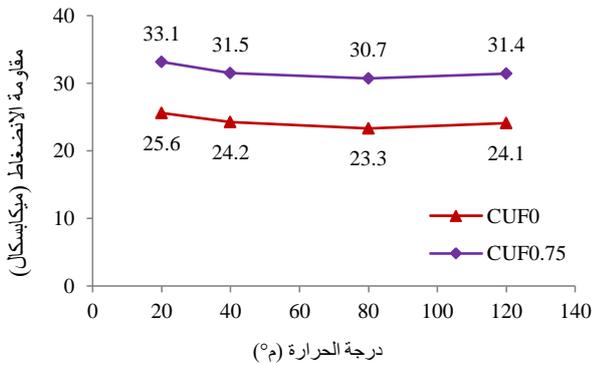


شكل 5: جهاز قياس درجات الحرارة



شكل 6: توزيع الحساسات الحرارية داخل وخارج النموذج

يوضح الشكل 7 منحنيات درجات الحرارة المقاسة من الحساسات الحرارية الأربعة (رقم 1، 2، 3، 4، شكل 6) مع الزمن لمدة 24 ساعة لاختبار الحرارة عند 120 م°، ونفس الخطوات تمت مع اختبار الحرارة عند 40 و 80 م°. نلاحظ من الشكل 7 أن الزيادة في درجات الحرارة لجميع الحساسات الحرارية كانت غير خطية حتى 10 ساعات من



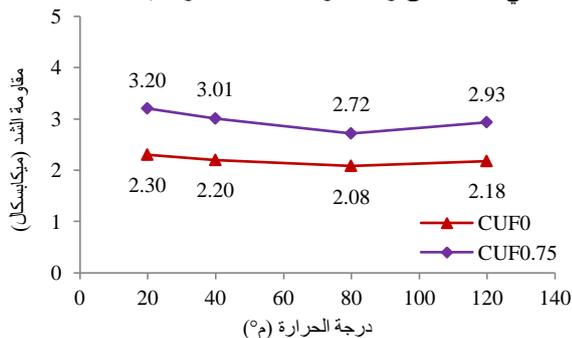
شكل 12: تأثير درجات الحرارة على مقاومة الانضغاط

أن الأبخرة التي تتمدد داخل الخرسانة نتيجة ارتفاع حرارة الماء الحر في الخرسانة تسبب إجهادات داخلية يمكن أن تقلل من مقاومة الانضغاط ما بين درجتي 60 و 90 °م وبعدها تستعيد الخرسانة قوتها عند 100 °م عندما تفقد كل ماؤها [9]. وكذلك درجات الحرارة غير الخطية (شكل 8) داخل جسم الخرسانة يولد إجهادات شدة حرارية تؤدي الي ظهور تشققات داخلية اذا كان إجهاد الشد المتولد من الحرارة أكبر من إجهاد الخرسانة، وهذه التشققات الحرارية قد تؤدي الي التقليل من مقاومة الانضغاط. كما لوحظ من الشكل 12 أن مقاومة الانضغاط تزداد مع إضافة ألياف الحديد في جميع درجات الحرارة. ويرجع السبب في ذلك الي استخدام الألياف الحديد والتي تزيد من مقاومة الانضغاط بحوالي 4-19% [10].

#### هـ. مقاومة الشد الانشطاري

يوضح الشكل 13 تأثير درجات الحرارة على مقاومة الشد الانشطاري للنماذج الخرسانة لكل من الخرسانة العادية (CYF0) والمعززة بالألياف الحديدية (CYF0.75). عند درجات الحرارة 40 و 80 °م تقل مقاومة الشد لجميع النماذج الخرسانية العادية والمحسنة بالألياف ، بينما عند درجة حرارة 120 °م ترتفع مقاومة الشد إلى 2.18 و 2.93 ميكاسبكال على التوالي مقارنة بقيمة مقاومة الشد عند درجة الحرارة 80 °م. ومع ذلك فإن قيم مقاومة الشد لا تزال أقل من قيم النماذج المرجعية 2.3 و 3.2 ميكاسبكال على التوالي.

أظهرت جميع النماذج الخرسانية التي تحتوي على ألياف الحديد (CYF0.75) مقاومة شد أعلى في جميع درجات الحرارة (40 ، 80 ، 120 °م) مقارنةً بنماذج الخرسانة العادية CYF0 (شكل 13). ويرجع السبب إلى زيادة الترابط بين مكونات الخلطة الخرسانية بإضافة الألياف والتي بدورها تزيد من مقاومة الشد وتؤخر من ظهور التشققات [6]. الشكل 14 يوضح تأثير الألياف الحديدية على نوع الانهيار في الأسطوانات الخرسانية تحت تأثير اختبار الشد الانشطاري. لوحظ عند حمل الانهيار حدوث انشطار كامل للعينة المرجعية الغير حاوية على الألياف وكذلك نماذج الخرسانة العادية المعرضة لدرجات الحرارة (40 ، 80 ، 120 °م)، بينما جميع النماذج الحاوية على الألياف الحديدية لم يحدث بها انفصال بالرغم من تشققها واستمرت متماسكة نتيجة تأثير الألياف التي عملت على ربط مكونات الخلطة الخرسانية.



شكل 13: تأثير درجات الحرارة على مقاومة الشد الانشطاري

السبب في ذلك الي الاختلاف في معامل التمدد العرضي بين الخرسانة وقضيب GFRP، مما ينتج عنه إجهادات شد تتسبب في ظهور تشققات حرارية حول محيط القضيب وتخنق الغطاء الخرساني مع زيادة درجات الحرارة.

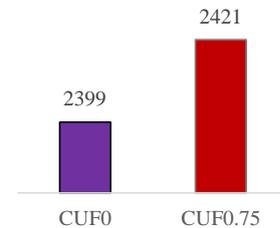


شكل 9: التشقق الناتج عن الاختلاف في التمدد العرضي (120 °م)

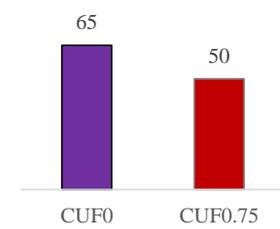
نموذج الخرسانة الحاوية على الألياف الحديدية والمسخنة عند 120 °م لم يظهر بها أي تشققات خارجية وذلك نتيجة تأثير الألياف التي عملت على زيادة مقاومة الشد للخرسانة.

#### ج. خصائص الخرسانة الطرية

الكثافة الرطبة لنماذج الخرسانة بدون ألياف حديدية CUF0 كانت 2399 كجم/م<sup>3</sup> وهي أقل من الخرسانة المعززة بالألياف CUF0.75 (2421 كجم/م<sup>3</sup>) (شكل 10). يتناقص الهطول مع إضافة ألياف الحديد لنموذج الخرسانة من 65 إلى 50 مم (شكل 11) ، ويرجع السبب الي أن إضافة ألياف الحديد يؤدي الي تماسك العينة الخرسانية مما تقلل من قيمه الهطول.



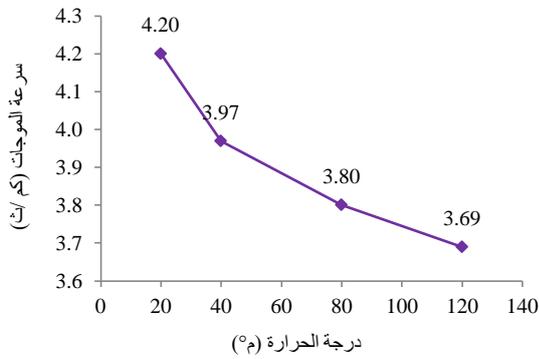
شكل 10: الكثافة الرطبة لنماذج الخرسانة (كجم/م³)



شكل 11: قيم الهطول (مم)

#### د. مقاومة الانضغاط

يوضح الشكل 12 مقاومة الانضغاط لنماذج الخرسانة المعرضة لدرجات الحرارة المختلفة (40 ، 80 ، 120 °م). نلاحظ من الشكل أن مقاومة الانضغاط تقل لكل من نماذج الخرسانة العادية (CUF0) والنماذج المحسنة بالألياف الحديد (CUF0.75) إلي درجة الحرارة تقريباً 80 °م، بعدها تزداد مقاومة الانضغاط قليلاً عند درجة الحرارة 120 °م. تمت ملاحظة هذه النتائج أيضاً في بعض الدراسات السابقة [3 & 4].



شكل 16: تأثير الحرارة على سرعة الموجات فوق صوتية

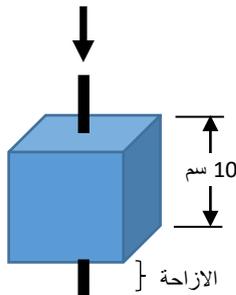
ح. تأثير الحرارة على الترابط بين GFRP والخرسانة

1. منحني الحمل والاستطالة

شكل 17 يوضح النموذج بجهاز اختبار الدفع وذلك لدراسة التلف في الترابط بين الخرسانة وقضيب GFRP تحت تأثير درجات الحرارة المختلفة. شكل 18 يوضح منحنيات الحمل والإزاحة لنماذج الخرسانة العادية (F0) والحاوية على ألياف الحديد (F0.75) بعد تعرضها لدرجات الحرارة (40، 80، 120 م°) بالإضافة إلى العينة المرجعية (20 م°). نلاحظ من الشكل 18 أن نماذج الخرسانة العادية (F0) عند تسخينها عند 40 و 80 م° أظهرت زيادة تقريبا خطية حتى أحمال الانهيار (30.5 و 21.0 كيلو نيوتن، على التوالي) وكانت قيمها أقل من قيم النموذج المرجعي (37.5 كيلو نيوتن) عند درجة حرارة الغرفة (20 م°). ويرجع تفسير ذلك إلى درجات الحرارة غير الخطية داخل جسم الخرسانة (شكل 8) والذي ينتج عنها إجهادات شد مما يسبب في ظهور تشققات حرارية داخلية تؤدي إلى التقليل من الترابط بين الخرسانة و GFRP، وكذلك الاختلاف في معامل التمدد العرضي بين الخرسانة (10<sup>-6</sup>/°C) و GFRP (جدول 5). بالإضافة إلى التغيرات في النموذج نتيجة ارتفاع الحرارة ومنها تبخر الماء وجفاف المركبات الكيميائية وعدم التوافق الحراري بين عجينة الاسمنت والركام.

أظهرت جميع النماذج الخرسانية التي تحتوي على ألياف الحديد (F0.75) مقاومة أعلى عند درجات الحرارة (20، 40، 80 درجة مئوية) مقارنة بنماذج الخرسانة العادية (F0) (شكل 18). ويرجع السبب إلى زيادة الترابط بين مكونات الخلطة الخرسانية بإضافة الألياف والتي بدورها تؤخر من ظهور التشققات.

نماذج الخرسانة العادية والحاوية على ألياف الحديد عند تسخينها لدرجة 120 م° فشلت عند حمل انهيار 2.3 و 3.4 كيلو نيوتن على التوالي وهو أقل بكثير من أحمال النماذج المسخنة عند 20، 40، 80 م° (شكل 18). ويمكن تفسير هذا السلوك بأن تسخين النماذج إلى درجة 120 م° كان أعلى من درجة انصهار مادة البوليمر (115 م° [7]) والتي تستخدم لربط الألياف الزجاج المصنوع منها قضيب GFRP. وهذه الحرارة المرتفعة تتسبب في تلف النتوءات الموجودة على سطح القضيب وبذلك تدمر قوة الترابط الميكانيكية بين الخرسانة و GFRP.



شكل 17: النموذج وجهاز اختبار الدفع



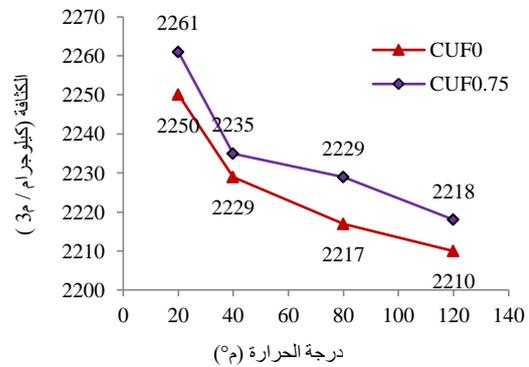
CYF0

CYF0.75

شكل 14: النماذج بعد التعرض لدرجات الحرارة والاختبار

و. الكثافة

يوضح الشكل 15 تأثير درجات الحرارة على الكثافة لكل من نماذج الخرسانة العادية والمعززة بالألياف الحديدية. نلاحظ من الشكل أن كثافة النماذج التي لا تحتوي على ألياف الحديد (CUF0) تقل مع زيادة درجات الحرارة مقارنة بالعينة المرجعية (2250 كجم/م<sup>3</sup>). ويرجع السبب في ذلك إلى الجفاف العالي لهيدروكسيد الكالسيوم في الاسمنت وكذلك نتيجة تبخر الماء مع ارتفاع درجات الحرارة [11]. من الشكل أيضاً تبين بأن النماذج التي تحتوي على ألياف الحديد (CUF0.75) كثافتها أعلى من نماذج الخرسانة العادية CF0 عند جميع درجات الحرارة (40، 80، 120 م°)، وهذا نتيجة لوزن الألياف الحديدية بالنماذج.



شكل 15: تأثير الحرارة على كثافة الخرسانة

ز. سرعة الموجات فوق صوتية

يوضح الشكل 16 تأثير درجات الحرارة على سرعة الموجات فوق الصوتية لنماذج الخرسانة العادية (بدون ألياف حديدية). يظهر في الشكل 16 أن سرعة الموجات فوق الصوتية تتناقص بشكل غير خطي مع زيادة درجات الحرارة. وكما ذكر سابقاً، درجات الحرارة غير الخطية (شكل 8) داخل جسم الخرسانة ينتج عنها إجهادات شد تؤدي إلى ظهور تشققات داخلية إذا كان إجهاد الشد الحراري أكبر من إجهاد الخرسانة، وهذه التشققات الحرارية تؤدي إلى تقليل من سرعة الموجات فوق الصوتية. كما أن ارتفاع درجات الحرارة يتسبب في تغيرات فيزيائية وكيميائية في كتلة الخرسانة منها تبخر الماء وجفاف المركبات الكيميائية وعدم التوافق الحراري بين عجينة الاسمنت والركام [12]، وهذه العوامل تؤثر أيضاً على تقليل سرعة الموجات فوق الصوتية.

لم يتم عرض نتائج سرعة الموجات فوق الصوتية للنماذج المحسنة بألياف الحديد لأنها لا تعطي نتائج دقيقة، ويمكن تفسير هذا السلوك إلى أن السرعة في المعادن تكون أسرع منها في المواد غير المعدنية [13].

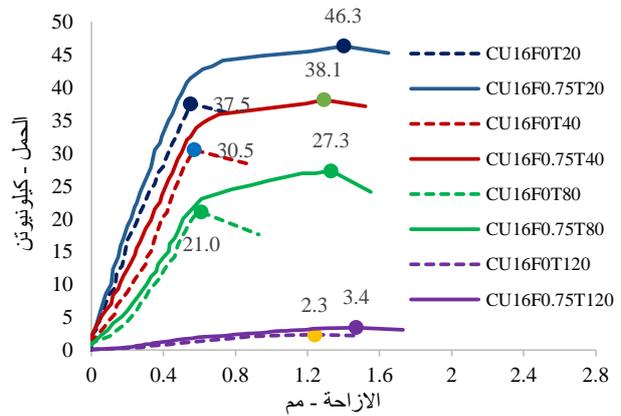
3.4 كيلو نيوتن، شكل 18)، على التوالي، مقارنة بالنماذج المعرضة لدرجات حرارة (20، 40، 80 م°). ويرجع تلييل ذلك إلى السبب الرئيسي وهو تسخين النماذج عند درجة 120 م° كان أعلى من درجة حرارة انصهار مادة البوليمر (115 م°) والتي تسببت في تلف التوتوات الموجودة على سطح القضيب وبذلك تدمر قوة الترابط الميكانيكية بين الخرسانة و GFRP، وبالإضافة إلى الأسباب المذكورة سابقاً.



شكل 20: نوع الانهيار بالنماذج بعد التحميل

## 7. الاستنتاجات

- ان الزيادة في درجات الحرارة كانت غير خطية عندما اخذت قراءات الحرارة بعد كل ساعة وكانت الزيادة خطية عندما تركت الحرارة أكثر من 12 ساعة. هناك تباين في درجات الحرارة الخارجية والداخلية وهذا يرجع لعدة عوامل منها مقدار درجة الحرارة الأولية ومعدل زيادة درجة الحرارة والوقت المستغرق لكل زيادة في درجة الحرارة. درجات الحرارة غير الخطية داخل جسم الخرسانة ينتج عنها إجهادات شد تسبب في تشققات حرارية داخلية تؤدي إلى التقليل من خواص الخرسانة.
- يتناقص الهطول مع اضافة الألياف الحديدية ويرجع السبب إلى أن إضافة ألياف الحديد يؤدي إلى تماسك العجينة الخرسانية مما تقلل من قيمه الهطول.
- تقل كثافة نماذج الخرسانة العادية والمعززة بالألياف الحديدية بزيادة درجات الحرارة ويرجع السبب في ذلك إلى الجفاف العالي لهيدروكسيد الكالسيوم في الاسمنت وكذلك نتيجة تبخر المار مع ارتفاع درجات الحرارة.
- سرعة الموجات فوق الصوتية تتناقص بشكل غير خطي مع زيادة درجات الحرارة والتي تسبب في تشققات حرارية وتبخر الماء وجفاف المركبات الكيميائية وعدم التوافق الحراري بين عجينة الاسمنت والركام، وهذا يؤدي إلى تقليل سرعة الموجات فوق الصوتية.
- مقاومة الانضغاط والشد تقل لكل من نماذج الخرسانة العادية والمحسنة بالألياف الحديدية إلى درجة الحرارة تقريباً 80 م°، بعد ذلك تزداد المقاومة قليلاً عند درجة الحرارة 120 م°، أن الأبخرة التي تتمدد داخل الخرسانة نتيجة ارتفاع حرارة الماء الحر في الخرسانة تسبب إجهادات داخلية يمكن أن تقلل من المقاومة وبعدها تستعيد الخرسانة مقاومتها عند 100 م° عندما تفقد كل ماؤها. وكذلك درجات الحرارة غير الخطية داخل جسم الخرسانة يولد إجهادات شد حرارية تؤدي إلى تشققات داخلية تؤدي إلى التقليل من مقاومة الخرسانة.
- ظهور تشقق حراري في الغطاء الخرساني وعلى طول مقطع نموذج الخرسانة العادية بعد تعرضها لحرارة مقدارها 120 م°. ويرجع السبب في ذلك إلى الاختلاف في معامل التمدد العرضي بين الخرسانة وقضيب GFRP، مما ينتج عنه إجهادات شد تتسبب في ظهور تشققات حرارية حول محيط القضيب وتخرق الغطاء الخرساني مع زيادة درجات الحرارة.
- قوة الترابط بين الخرسانة و GFRP لنماذج الخرسانة مع وبدون الألياف عند تسخينها (40 و 80 م°) أظهرت زيادة تقريباً خطية حتى أحمال الانهيار وكانت قيمها اقل من قيم النماذج المرجعية (20 م°). ويرجع ذلك إلى درجات الحرارة غير الخطية داخل جسم الخرسانة والذي ينتج تشققات حرارية داخلية تؤدي إلى التقليل من الترابط بين الخرسانة و GFRP،



شكل 18: منحنى الازاحة والحمل للنماذج الخرسانية

جدول 4 يوضح اقصى حمل المتحصل عليه من اختبار الدفع لنماذج الخرسانة العادية (F0) والحاوية على الياف الحديد (F0.75). من الجدول نلاحظ ان نسبة الانخفاض في الحمل لنماذج الخرسانة العادية يزيد مع ارتفاع درجات الحرارة، واكبر انخفاض ظهر عند تعرض النموذج إلى حرارة مقدارها 120 م° ويمكن تفسير هذا الانخفاض للأسباب التي ذكرت بالفقرة السابقة (ح-1).

جدول 4: اقصى حمل والانخفاض في الحمل

نوع النموذج	اقصى حمل (كيلو نيوتن)	انخفاض في الحمل (كيلو نيوتن)
F0.75T20	46.3	%23.5
F0T20	37.5	
F0.75T40	38.1	%24.9
F0T40	30.5	
F0.75T80	27.5	%31.0
F0T80	21.0	
F0.75T120	3.4	%47.8
F0T120	2.3	

## 2. نوع الانهيار

شكل 19 يوضح نوع الانهيار بنموذجين من الخرسانة العادية والحاوية على الياف الحديد بعد التحميل والتي سخنت عند 40 م°. من الشكل نلاحظ ظهور تشقق طولي على طول عمق النموذج الخرساني الغير حاوي على الياف (CU16F0T40)، ونفس السلوك حدث مع النموذج المسخن عند 80 م°. ويمكن تلييل ذلك بالأسباب المذكورة سابقاً. بينما النماذج الحاوية على الياف الحديد (CU16F0.75T40) بعضها لم يظهر بها التشققات والبعض الآخر كانت تشققات ضعيفة، ويرجع السبب إلى زيادة الترابط بين مكونات الخلطة الخرسانية بإضافة الياف والتي بدورها تؤخر من ظهور التشققات.



شكل 19: نوع الانهيار بالنماذج بعد التحميل

شكل 20 يبين نموذجين من الخرسانة العادية والحاوية على الياف الحديد (CU16F0T120) و (CU16F0.75T120) بعد التسخين عند درجة حرارة 120 م° وبعد التحميل، على التوالي. نلاحظ من الشكل 20 ظهور تشققات بالنموذجين على طول عمق المكعب وذلك نتيجة تأثير درجة الحرارة المرتفعة. فشل النموذجين عند حمل صغير جدا (2.3 و

7. Hughes Brothers Inc., 2002, Aslan 100 fiber glass rebars, technical report data.
8. ACI Committee 440.1 R-15, 2015, Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars, American concrete institute.
9. Lydon, F. D., Development in Concrete Technology – 1, Applied Science Publishers, Ltd, 1979.
10. Yazici, S., Inan, G.& Tabak, V., 2007, Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, Construction and building materials, vol. 21, pp. 1250-1253.
11. Osuji, S. O., and U. Ukeme, 2015, Effects of elevated temperature on compressive strength of concrete: A case study of grade 40 concrete, Nigerian Journal of Technology 34.3: 472-477.
12. Viana, A., Moraes, P., & Padaratz, I., 2022, Ultrasonic wave propagation in thermally treated concrete up to 400 °C, Revista Ibracon de Estruturas Materiais, vol. 1, no. 35.
13. AL-Ridha, A., Atshan, A., Abbood, A.& Dheyab, L., 2013, Effect of steel fiber on ultrasonic pulse velocity and mechanical properties of self-compact concrete, Construction and building materials, vol. 39, pp. 26–32.

## BIOGRAPHIES

**Omer Ramadan Elzaroug** Professor in Structures B.Sc. (1992) (Hons) Civil Engineering, Tripoli University, Tripoli – Libya. MSc. (1999) Reinforced concrete, Concordia University, Montreal, Canada. PhD (2008) Reinforced concrete, Leeds University, Leeds – UK. Area of expertise: Reinforced Concrete, FRP reinforced concrete, Concrete materials Coordinator, Engineering Unit for Laboratory Tests & Consultations (2008 -2022). Head, Department of Civil Engineering, Omar Al -Mukhtar University, (2000-2004, 2008 – 2011). Manger of engineering management of El-jebel Al-Akhdar Province (2002-2004). Member of management committee of Organization for Development of Administrative Centers (ODAC), (2010-2011). Follow-up of eastern part projects in Libya, (2011). Advisor at the National commercial Bank, (2020-2022). Tuning Middle East and North Africa (T-MEDA) Project, University of Deusto – Spain, (2013-2016). Fulbright Visiting Scholar Program, USA, 2013.

- وكذلك الاختلاف في معامل التمدد العرضي بين الخرسانة و GFRP.
- قوة الترابط بين الخرسانة و GFRP عند تسخينها لدرجة 120 °م فشلت عند حمل انهيار أقل بكثير من احمال النماذج المسخنة عند 20 ، 40 ، 80 °م . ويمكن تفسير هذا السلوك بأن تسخين النماذج الى درجة 120 °م كان أعلى من درجة انصهار مادة البوليمر (115 °م) والتي تستخدم لربط ألياف الزجاج المصنوع منها قضيب GFRP. وهذه الحرارة المرتفعة تتسبب في تلف النتوءات الموجودة على سطح القضيب وبذلك تدمر قوة الترابط الميكانيكية بين الخرسانة و GFRP.
  - أظهرت جميع النماذج الخرسانية التي تحتوي على ألياف الحديد مقاومة أعلى عند درجات الحرارة (20 ، 40 ، 80 درجة مئوية) مقارنةً بنماذج الخرسانة العادية. ويرجع السبب إلى زيادة الترابط بين مكونات الخلطة الخرسانية بإضافة الألياف والتي بدورها تؤخر من ظهور التشققات.

## 8. المراجع

1. Elbadry, M. M. & Abdalla, H. A., 1998, Experimental studies on thermal cracking in concrete member reinforced with FRP. In: the first conference on durability of fiber reinforced polymer (FRP) composites for construction, CDCC98. Sherbrooke, Canada, 669-680.
2. سوامي، آر. إن. 1988، خرسانة مسلحة جديدة، ترجمة د. محمد علي عبد الزروق الأوسي و بابل طه ناجي العلي، الجامعة المستنصرية، بغداد، العراق، عدد الصفحات 299.
3. Morsy, M. S., Alsayed, S. H. & Aqel, M., 2010, Effect of elevated temperature on mechanical properties and microstructure of silica flour concrete. International journal of civil & environmental engineering 10.1, 1-6.
4. Ríos, J., Cifuentes, H., Leiva, C., Garcia, C. & Alba, M., 2018, Behavior of high-strength polypropylene fiber-reinforced self-compacting concrete exposed to high temperatures, Journal of Materials in Civil Engineering 30.11.
5. Zhang, B. & Bicanic, N., 2006, Fracture energy of high-performance concrete at high temperatures up to 450°C: the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold), Magazine of Concrete Research, 58, No. 5, 277–288.
6. British Standard Institution:
  - BS 12:1996: Specification for Portland cement.
  - BS812: Part2: 1995: Methods for determinations of density and absorption.
  - BS 812: Part 103: 1992: Method for determination of particle size distribution.
  - BS812: Part110: 1990: Method for determination of aggregate impact.
  - BS812: Part112: 1990: Method for determination of aggregate crushing value.
  - BS 1881: Part 102: 1983: Method for determination of slump.
  - BS 1881: Part 107: 1983: Method for determination of density of compacted fresh concrete.
  - BS 1881: Part 111: 1983: Method for normal curing of test specimens (20°C Method).
  - BS1881: Part 116: 1983: Method for determination of compressive strength concrete cubes.
  - BS 1881: Part 117: 1983: Method for determination of tensile splitting strength.