



Comparative Assessment of Thermal Conditioning Effects on Concrete–GFRP Bond Resistance Across Diverse Bar Diameters

Rowida Boalhasia*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Omar Al-Mukhtar University,
El-Beida, Libya

دراسة مقارنة لتأثير المعالجة الحرارية على قوة الترابط بين الخرسانة و GFRP ذات الأقطار المختلفة

رويدا سالم بالحاسية*

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة عمر المختار، البيضاء، ليبيا

*Corresponding author: ruwayda.salim@omu.edu.ly

Received: July 25, 2026

Accepted: October 04, 2026

Published: October 19, 2026

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract:

Cracking in concrete structures can result from excessive loading, long-term creep, construction defects, shrinkage, reinforcement corrosion, and exposure to elevated temperatures. Cracks may also develop because of differences in the coefficients of thermal expansion between concrete and glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars when used as an alternative to steel reinforcement. The transverse coefficient of thermal expansion of GFRP bars is approximately three times that of concrete. When GFRP-reinforced concrete members are exposed to elevated temperatures, thermal stresses develop around the bars, potentially causing cracks that reduce the bond strength between the concrete and GFRP and compromise structural durability. Steel fibres, 3–8 cm in length and randomly distributed throughout the concrete, are used to mitigate thermal cracking and enhance concrete tensile strength. This study evaluated the effects of elevated temperatures on concrete reinforced with GFRP bars and incorporating steel fibres. Specimens were subjected to laboratory heating at 40, 80, and 120 °C. Compressive strength tests were performed on 100 mm concrete cubes, which were also tested for ultrasonic pulse velocity and density. Splitting tensile strength was measured using cylindrical specimens measuring 100 mm in diameter and 200 mm in height. Push-out tests were also conducted to assess the bond strength between GFRP bars and concrete using 100 mm concrete cubes, each containing a centrally embedded GFRP bar with a diameter of either 12 or 16 mm. Compared with the reference specimen, the test results demonstrated the effects of temperature on concrete tensile strength, compressive strength, and bond strength between concrete and GFRP bars of different diameters.

Keywords: Elevated temperatures; bond strength; steel fibres; push-out test; compressive strength.

المخلص:

تتعدد العوامل المسببة للتشققات المنشآت الخرسانية؛ حيث تنشأ الشقوق نتيجة الأحمال الزائدة، والزحف طويل الأمد، وعيوب التنفيذ، إضافة إلى الانكماش وتآكل حديد التسليح وتأثيرات درجات الحرارة المرتفعة. تظهر كذلك نتيجة الاختلاف

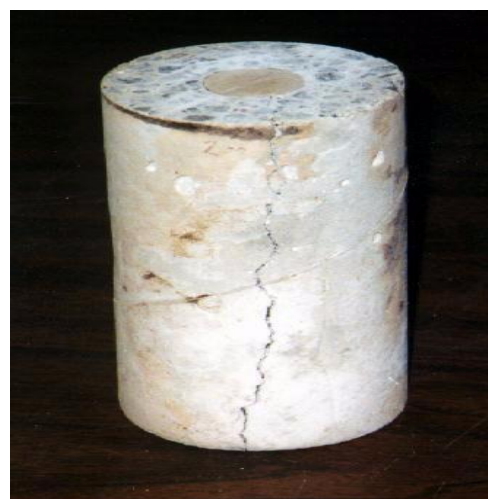
في معامل التمدد الحراري بين الخرسانة وقضبان الألياف الزجاجية (GFRP) عند استخدامه كبديل عن حديد التسليح. يُعد معامل التمدد الحراري العرضي لقضبان GFRP أكبر بنحو ثلاثة أضعاف مقارنة بمعامل تمدد الخرسانة. عندما تتعرض العناصر الخرسانية المسلحة بـ GFRP لارتفاع في درجات الحرارة، ينتج عنها إجهادات حرارية حول قضبان GFRP تسبب في حدوث تشققات مما يؤدي إلى تقلل من قوة الترابط بين الخرسانة و GFRP والمتانة للأعضاء الإنشائية. تستخدم ألياف حديدية بطول 3 إلى 8 سنتيمترات توزع عشوائياً في جميع الاتجاهات خلال كتلة الخرسانة لتقليل من التشققات الحرارية في الخرسانة المسلحة ولزيادة مقاومة الشد للخرسانة. في هذا البحث تم تقييم تأثير درجات الحرارة على الخرسانة المسلحة بقضبان الألياف الزجاجية (GFRP) والمعززة بالألياف الحديدية. حيث تم اخضاع العينات لعملية تسخين عملية عند مستويات حرارة شملت (40, 80, 120 درجة مئوية). حيث تم إجراء اختبار مقاومة الانضغاط باستخدام مكعبات مقاس (100 مم) كما أجري على نفس المكعب اختبار الموجات فوق الصوتية والكثافة، باستخدام اسطوانات مقاس (100*200 مم) تم اختبار مقاومة الشد الانشطاري. تم أيضاً إجراء اختبار الدفع (Push out) للتحقق من قوة الترابط بين GFRP والخرسانة باستخدام مكعب خرساني مقاس (100 مم) مسلح بقضيب GFRP قطر (12 مم و 16 مم) في وسط المكعب. أظهرت نتائج الاختبارات مقارنة بالعينة المرجعية تأثير درجات الحرارة على خواص الخرسانة (مقاومة الشد، مقاومة الانضغاط وقوة الترابط بين الخرسانة وقضيب GFRP مختلف الأقطار).

الكلمات المفتاحية: درجات الحرارة، قوة الترابط، ألياف الحديد، اختبار الدفع، مقاومة الانضغاط.

المقدمة:

الخرسانة مادة إنشائية شائعة الاستخدام في صناعة التشييد ويعزي ذلك بشكل كبير إلى خواصها الميكانيكية المتميزة والتي من أهمها مقاومتها العالية للضغط. نتيجة عدة أسباب تتعرض الخرسانة للتشققات من أهمها التحميل الزائد، الزحف تحت الحمل المستمر، الانكماش، تآكل حديد التسليح، الإجهادات الناتجة عن الحرارة. كما تحدث أيضاً التشققات نتيجة الاختلاف بين معامل التمدد الحراري للخرسانة وقضبان الألياف الزجاجية (GFRP). حيث إن معامل التمدد العرضي لقضبان الألياف الزجاجية أكبر ثلاث أضعاف 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 تقلل من قوة الترابط بين الخرسانة و GFRP والمتانة للأعضاء الإنشائية شكل 1 [1].

الخرسانة اللبيفية 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 والصدم والبري. كما إن الألياف الحديدية تعمل على تقليل اتساع التشققات في الخرسانة وإعادة توزيعها، وأهم وظيفة للألياف إنها تزيد من قيمة معيار المتانة للخرسانة زيادة كبيرة، وبالتالي تحول ميكانيكية الكسر من كسر قصفي مفاجئ وخطير إلى كسر غير قصفي وتدرجي [2].



شكل رقم (1): التشقق الحراري الناتج عن التمدد العرضي لقضيب GFRP

قام الباحث [Morsy 3] بإجراء دراسة لتقييم تأثير درجات الحرارة المرتفعة على 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 العينات أولاً عند رطوبة نسبته 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 (Silica Flour 0%) تقل كلاً من مقاومة الانضغاط ومقاومة الشد

إلى درجة 100 درجة ثم ترتفع المقاومة إلى درجة 200 درجة 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 مائها.

قام Jose وآخرون [4] بتحليل استخدام الخرسانة الهيكلية عالية الأداء المقواة بالألياف البولي بروبيلين والمعرضة 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 ملم، معامل يونج، وقوة الشد للخرسانة. أجريت الاختبارات على العينات بعد تعرضها لدرجات الحرارة المختلفة ومن ثم بردت لمدة 24 ساعة. عند تسخين العينات حتى 100 درجة تقل مقاومة الانضغاط بسبب ضغط البخار في الخرسانة، وهذا السلوك مشابه لما تم الكشف عنه في الدراسات السابقة [5]. بينما بين 100 و 300 درجة مئوية أثرت درجات الحرارة على عجينة الاسمنت مما يحسن ترطيبه وبذلك تؤدي إلى زيادة في مقاومة الانضغاط. عند درجات حرارة أعلى من 300 درجة مئوية هناك قدر كبير من التشققات في الخرسانة، مما تضعف مقاومة الانضغاط مع زيادة الحرارة. أيضاً تقل مقاومة الشد حتى 100 درجة مئوية، بينما تزيد مقاومة الشد عند درجات حرارة أعلى من 100 درجة بسبب تأثير ترطيب عجينة الاسمنت بواسطة الحرارة. في الخلطات المقواة بالألياف من 500 إلى 700 درجة حدث هبوط ملحوظ أكثر بسبب الجفاف وتحلل عجينة الاسمنت وانصهار الألياف مما يؤدي إلى توليد فراغات في القلب الخرسانى.

البرنامج العملي:

تم معملياً دراسة تأثير درجات الحرارة المختلفة على عينات الخرسانة العادية والعينات المحسنة بالألياف الحديدية (SF). تسخن العينات في الفرن عند درجات حرارة مختلفة (40, 80, 120 درجة مئوية) للمقارنة مع العينات المرجعية (درجة حرارة الغرفة). بعد تسخين العينات ومن ثم تبريدها لمدة 24 ساعة، تم إجراء اختبارات مقاومة الانضغاط والكثافة وسرعة النبض بالموجات فوق الصوتية باستخدام مكعب مقاس 100 ملم ومقاومة الشد الانشطاري (اسطوانة 100*200 ملم). تم أيضاً إجراء اختبار الدفع لتقييم مدى التدهور في قوة الترابط بين GFRP والخرسانة نتيجة اختلاف التمدد العرضي وذلك باستخدام مكعب خرساني مقاس 100 ملم مسلح بقضيب GFRP قطر 12 ملم و 16 ملم وضع في وسط المكعب مع وبدون الألياف الحديدية.

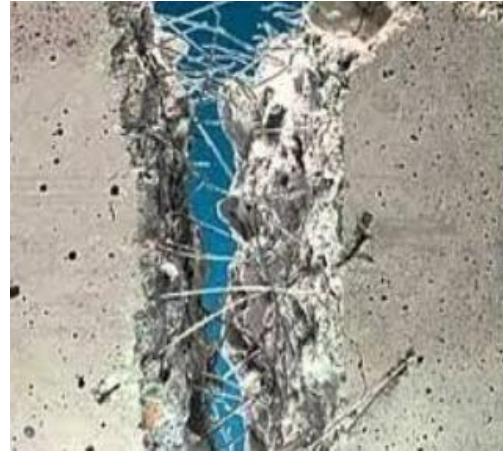
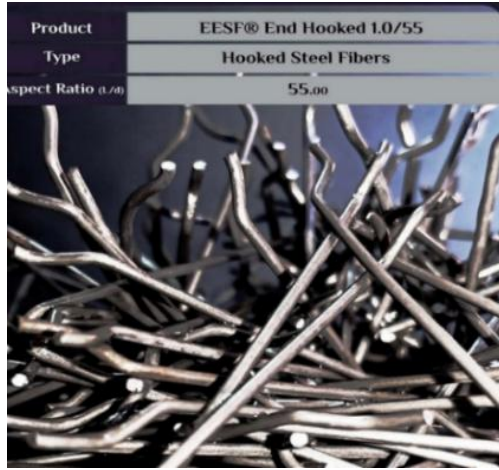
المواد المستخدمة:

- **الاسمنت:** استخدم اسمنت بورتلاندي اعتيادي منتج من مصنع الفتائح الواقع في مدينة درنة (ليبيا)، خواصه الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية، وهو مطابق للمواصفة البريطانية BS 12: 1996 [6].
- **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) ملم و (5-10) ملم. يوضح الجدول 1 الخواص الفيزيائية والميكانيكية للركام المستخدم في هذا البحث وفقاً للمواصفات البريطانية BS 812: Part 2: 1995، BS 812: Part 110: 1990، BS 812: Part 112: 1990 [6].

جدول رقم (1): الخواص الفيزيائية والميكانيكية للركام الخشن

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

- **ماء الخلط:** الماء المستخدم في الخلط والمعالجة هو ماء صالح للشرب.
- **الألياف الحديدية:** تم استخدام ألياف حديدية ذات طرف معكوف بطول 55 مم وقطر مكافئ 1.0 ملم وطول خطاف 2.5 مم وارتفاع خطاف 40 ملم (الشكل 2). في هذا البحث تم إضافة نسب ألياف الحديد إلى الخرسانة عند بنسبة 0.75 من حجم الخرسانة.



شكل رقم (2): ألياف الحديد المضافة للخرسانة

- **قضبان GFRP:** تم اختيار قضبان الألياف الزجاجية (GFRP) بقطر 12 ملم و 16 ملم كما هو موضح بالشكل 3. تحسن قضبان GFRP بشكل كبير من طول عمر الهياكل الانشائية [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]. توجد نتوءات سطحية على سطح القضيب لتعزيز الترابط الميكانيكي بين الخرسانة وقضبان GFRP. الجدول 2 يوضح خواص GFRP المستخدمة في هذا البحث.



شكل رقم (3): قضبان الألياف الزجاجية GFRP

جدول رقم (2): خواص قضبان GFRP

الخواص	GERP
الكثافة (جم/سم ³)	1.25 -
إجهاد الخضوع	N/A
مقاومة الشد MPa	483 -
معامل المرونة GPa	51 - 35
معامل التمدد الطولي (10 ⁻⁶)	10-6
معامل التمدد العرضي (10 ⁻³)	23-21

تصميم الخلطة الخرسانية:

تم تصميم نسب الخلطة الخرسانية وفقاً للطريقة البريطانية وكما هو موضح بالجدول 3. تم خلط جميع مواد الخلطة في خلاط معمل بسعة 56 لترًا. 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 تدريجيًا 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 ودمكها بواسطة طاولة اهتزازية، وبعد الانتهاء من الدمك يتم تسوية السطح العلوي وتشطيبه بالمجرفة.

معالجة عينات الاختبار:

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



شكل رقم (4): عينات معرصة لدرجات الحرارة في الفرن

جدول رقم (3): كميات المواد للخلطة الخرسانية (كجم /³)

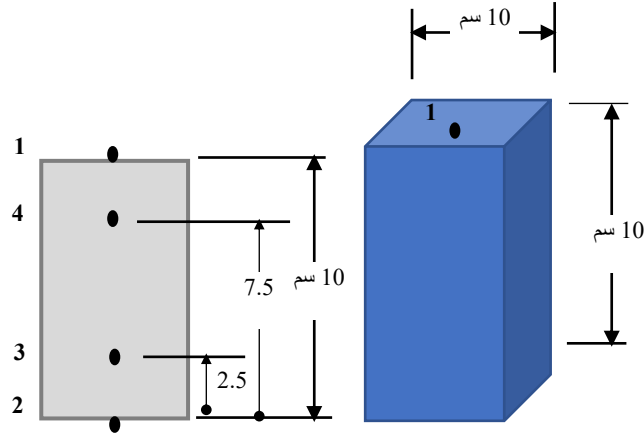
الركام الخشن	ألياف الحديد	الرمل	الماء	الاسمنت	الخلطة
10-5 ملم	الحديد				
432	0	720	190	320	SF-0
432	59.025	720	190	320	SF-0.75

النتائج والمناقشة:

توزيع درجات الحرارة: في هذا البحث عينات الخرسانة العادية والحاوية على الألياف الحديدية تعرضت لثلاثة درجات الحرارة المختلفة وهي 40، 80، 120 °C من الجوانب الأربعة بواسطة الفرن الكهربائي (شكل 4). تم قياس درجات الحرارة على أعماق مختلفة داخل جسم العينات الخرسانية بواسطة الحساسات الحرارية المتصلة بجهاز قياس درجات الحرارة (شكل 5). تم استخدام أربع 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 وكما 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 العينة الخرسانية المسخنة. تمت حماية أطراف الحساسات الحرارية لتجنب أي اختراق للرطوبة والأضرار الناجمة أثناء صب العينات.



شكل رقم (5): جهاز قياس درجات الحرارة

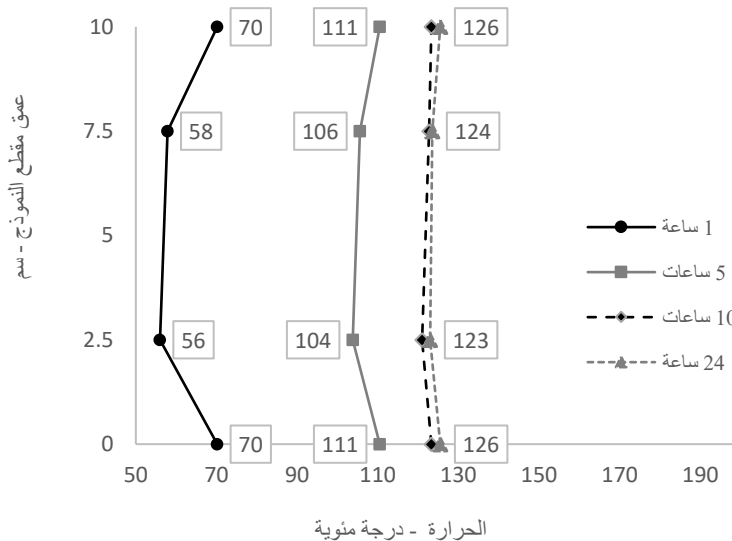


شكل رقم (6): توزيع الحساسات الحرارية داخل وخارج النموذج

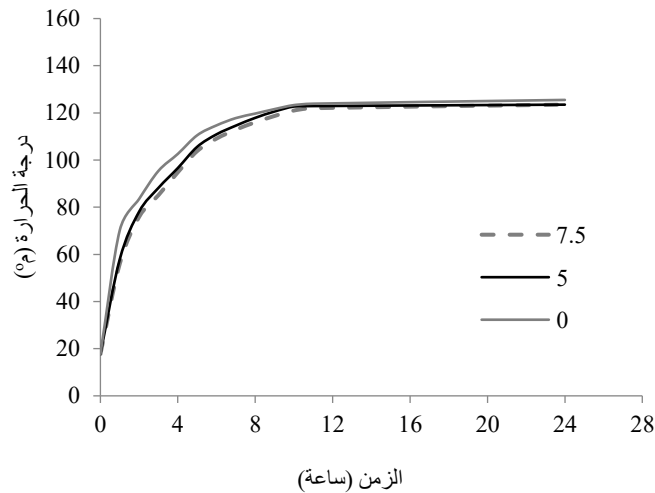
يوضح الشكل 7 منحنيات درجات الحرارة المقاسة من الحساسات الحرارية الأربعة (رقم 1، 2، 3، 4 شكل 6) مع الزمن لمدة 24 ساعة لاختبار الحرارة عند 120 م°، ونفس الخطوات تمت مع اختبار الحرارة عند 40، 80 م°. نلاحظ من الشكل 7 ان الزيادة في درجات الحرارة لجميع الحساسات الحرارية كانت غير خطية حتى 10 ساعات من التسخين 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 ان درجة التسخين المطلوبة 120 م° تم الوصول إليها بعد 10 ساعات من التسخين ومن ثم تركت العينة في الفرن لمد 24 ساعة مما أدى إلى توحيد درجة الحرارة في جميع أنحاء العينة الخرسانية المسخنة.

يوضح الشكل 8 توزيع درجات الحرارة غير الخطية على طول عمق العينة (شكل 6) في اوقات مختلفة من التسخين (1 و 5 و 10 ساعات). درجات الحرارة المقاسة على الاسطح 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 الاسطح الخارجية تكتسب الحرارة مباشرة 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 رقم (7): توزيع درجات الحرارة داخل وخارج النموذج



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

تأثير الحرارة على شكل النماذج:

بعد تعريض عينات الخرسانة العادية وكذلك عينات 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 2). 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 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.

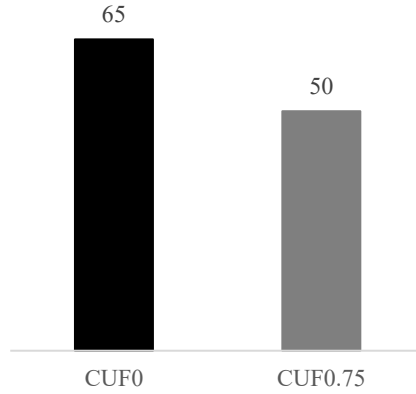


شكل رقم (9): التشقق الناتج عن الاختلاف في التمدد العرضي (120 م°)

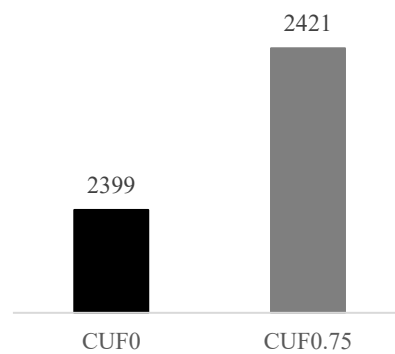
عينة الخرسانة الحاوية على الألياف الحديدية والمسخنة عند 120 م° لم يظهر بها أي تشققات خارجية وذلك نتيجة تأثير الألياف التي عملت على زيادة مقاومة الشد للخرسانة.

خصائص الخرسانة الطرية:

الكثافة الرطبة لعينة الخرسانة بدون ألياف حديدية CUF0 كانت 2399 كجم/م³ وهي أقل من الخرسانة المعززة بالألياف (CUF0.75 2421 كجم/م³) (الشكل 10). يتناقص الهطول مع إضافة ألياف الحديد لعينة الخرسانة من 65 إلى 50 مم (الشكل 11)، ويرجع السبب إلى أن إضافة ألياف الحديد يؤدي إلى تماسك العجينة الخرسانية مما تقلل من قيمه الهطول.



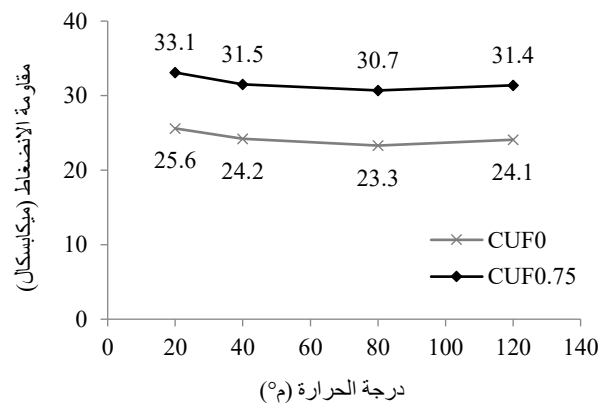
شكل رقم (10): الكثافة الرطبة لعينات الخرسانة (كجم/م³)



شكل رقم (11): قيم الهطول (مم)

مقاومة الانضغاط:

يوضح الشكل 12 مقاومة الانضغاط لعينات الخرسانة المعرضة لدرجات الحرارة المختلفة (40، 80، 120 م°). نلاحظ من الشكل أن مقاومة الانضغاط تقل لكل من عينات الخرسانة العادية (CUF0) والعينات المحسنة بألياف الحديد (CUF0.75) إلى درجة الحرارة تقريباً 80 م°، بعد ذلك تزداد قوة الانضغاط قليلاً عند درجة الحرارة 120 م°. تمت ملاحظة هذه النتائج أيضاً بواسطة بعض الدراسات السابقة [3 & 4]. 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 درجة عندما تفقد كل ماؤها [9]. وكذلك درجات الحرارة غير الخطية (شكل 8) داخل جسم الخرسانة يولد إجهادات شد حرارية تؤدي إلى ظهور تشققات داخلية إذا كان إجهاد الشد المتولد من الحرارة أكبر من إجهاد الخرسانة، وهذه التشققات الحرارية قد تؤدي إلى 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 إلى استخدام الألياف الحديد والتي تزيد من مقاومة الانضغاط بحوالي 4-19% [10].



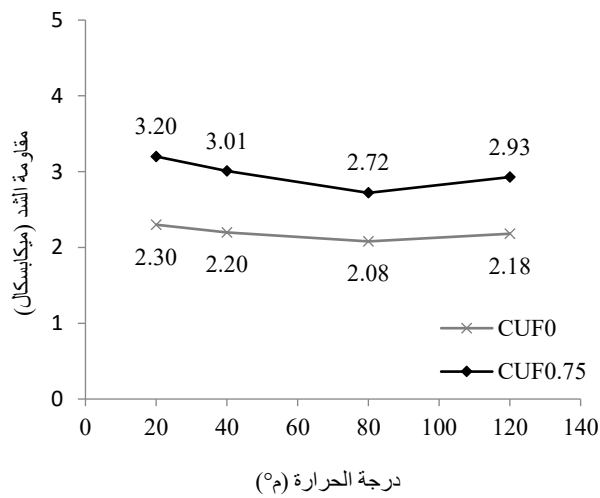
شكل رقم (12): تأثير درجات الحرارة على مقاومة الانضغاط

مقاومة الشد الانشطاري:

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

أظهرت جميع العينات الخرسانية التي تحتوي على ألياف الحديد (CYF0.75) مقاومة شد أعلى في جميع درجات الحرارة (40، 80، 120 درجة مئوية) مقارنةً بعينات الخرسانة العادية CYF0 (شكل 12). ويرجع السبب إلى زيادة الترابط بين مكونات الخلطة الخرسانية بإضافة الألياف والتي بدورها تؤخر من ظهور التشققات.

الشكل 14 يوضح تأثير الألياف الحديدية على نوع الانهيار في الأسطوانات الخرسانية في اختبار الشد الانشطاري. لوحظ عند إجراء الاختبار حدوث انشطار كامل للعينة المرجعية غير الحاوية على الألياف عند حمل الانهيار بينما جميع العينات الحاوية على الألياف الحديدية لم يحدث بها انفصال بالرغم من تشققها واستمرت متماسكة نتيجة تأثير الألياف التي عملت على ربط مكونات الخلطة الخرسانية.



شكل رقم (13): تأثير درجات الحرارة على مقاومة الشد الانشطاري



شكل رقم (14): العينات بعد التعريض لدرجات الحرارة والاختبار

الكثافة:

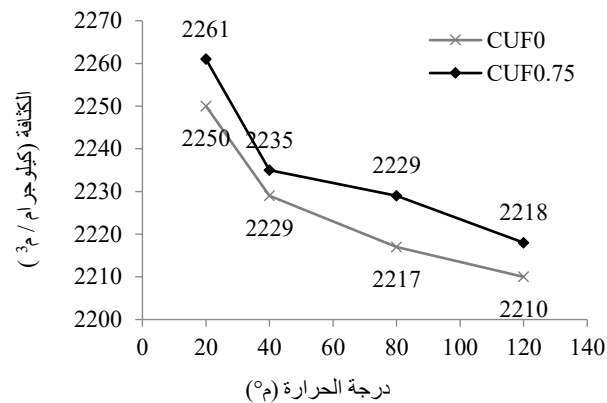
يوضح الشكل 15 تأثير درجات الحرارة على الكثافة لكل من عينات الخرسانة العادية والمعززة بالألياف الحديدية. نلاحظ من الشكل أن كثافة العينات التي لا تحتوي على ألياف الحديد (CYF0) تقل مع زيادة درجات الحرارة مقارنة بالعينة المرجعية (2250 كجم/م³). ويرجع السبب في ذلك إلى الجفاف العالي لهيدروكسيد الكالسيوم في الأسمنت وكذلك نتيجة تبخر الماء مع ارتفاع درجات الحرارة [11]. من الشكل أيضاً تبين بأن العينات التي تحتوي على ألياف الحديد

(CUF0.75) كثافتها أعلى من عينات الخرسانة العادية CUF0 عند جميع درجات الحرارة (40، 80، 120 م°)، وهذا نتيجة لوزن الألياف الحديدية بالعينات.

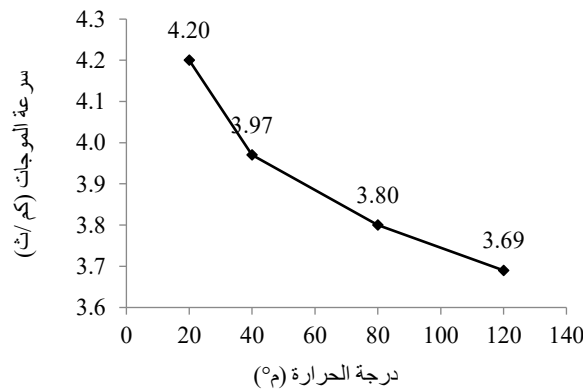
سرعة الموجات فوق صوتية:

يوضح الشكل 16 تأثير درجات الحرارة على سرعة الموجات فوق الصوتية لعينات الخرسانة العادية (بدون ألياف حديدية). يظهر في الشكل 16 أن سرعة الموجات فوق الصوتية يتناقص 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 الأسمنت والركام [12]، وهذه العوامل تؤثر أيضاً على تقليل سرعة الموجات فوق الصوتية.

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



شكل رقم (15): تأثير الحرارة على كثافة الخرسانة

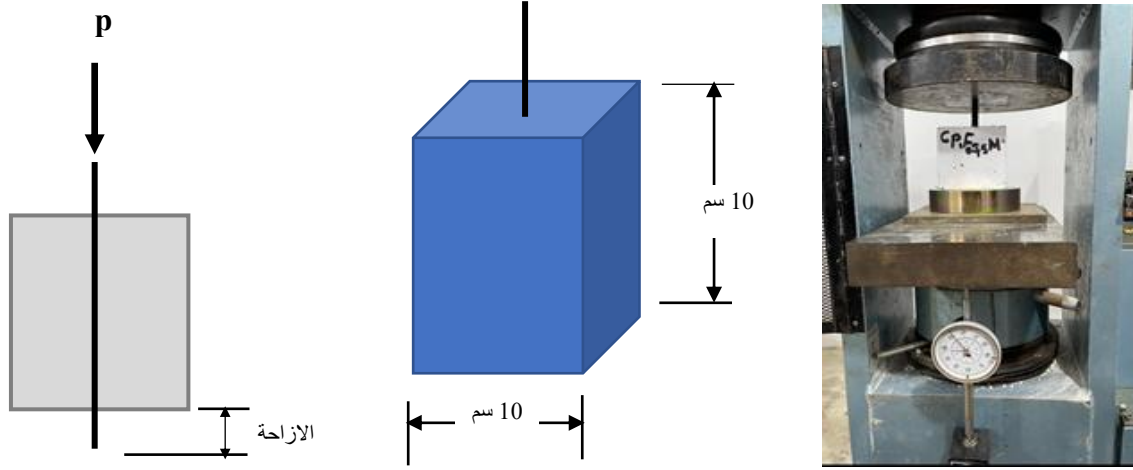


شكل رقم (16): تأثير الحرارة على سرعة الموجات فوق صوتية

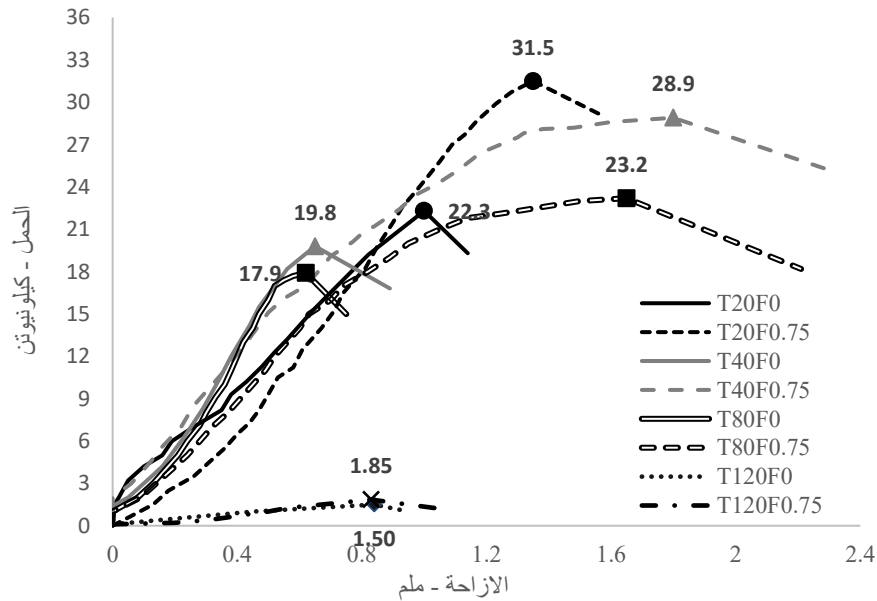
تأثير الحرارة على الترابط بين GFRP والخرسانة: منحنى الحمل والاستطالة:

شكل 17 يوضح النموذج بجهاز اختبار الدفع وذلك لدراسة التلف في الترابط بين الخرسانة وقضيب GFRP تحت تأثير درجات الحرارة المختلفة. يوضح الشكلين 18 و19 منحنيات الحمل والإزاحة لعينات الخرسانة المسلحة العادية F0 والمحصنة بالألياف الحديدية F0.75 المسلحة بقطر 12 مم و16 مم بعد تعرضها لدرجات حرارة (40، 80، 120 درجة مئوية) بالإضافة إلى العينة المرجعية (20 درجة مئوية). نلاحظ من الشكلين 17 و18 أن عينات الخرسانة العادية (F0) عند تسخينها عند 40 و80 درجة مئوية أظهرت زيادة شبه خطية حتى أحمال الانهيار وكانت قيمها أقل من قيم العينات المرجعية (20 درجة مئوية) بسبب درجات الحرارة غير الخطية داخل جسم الخرسانة (الشكل 8)، مما ينتج عنه إجهادات شد، مما يسبب ظهور شقوق حرارية داخلية تقلل من الترابط بين الخرسانة وGFRP، وكذلك اختلاف معامل التمدد العرضي بين الخرسانة وGFRP ($10^{-6}/C^{\circ}$) (الجدول 5). بالإضافة إلى التغيرات في العينة نتيجة ارتفاع درجة الحرارة، بما في ذلك تبخر الماء، وجفاف المركبات الكيميائية، وعدم التوافق الحراري بين عجينة الأسمنت والركام.

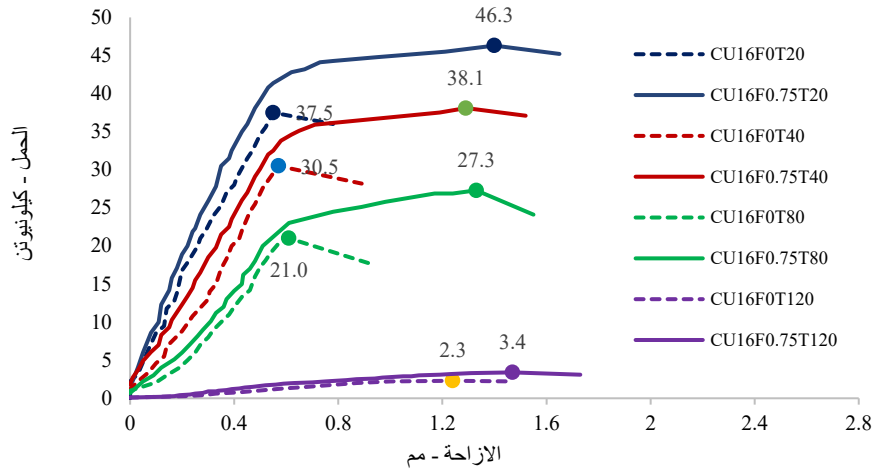
أظهرت جميع عينات الخرسانة المحتوية على ألياف حديدية (F0.75) مقاومة أعلى عند درجات حرارة (20، 40، 80 درجة مئوية) مقارنةً بعينات الخرسانة العادية (F0) (الشكل 18) (الشكل 19). ويعود ذلك إلى زيادة الترابط بين مكونات الخلطة الخرسانية بفضل إضافة الألياف، مما يؤدي بدوره إلى تأخير ظهور الشقوق. فشلت عينات الخرسانة العادية والحاوية على ألياف الحديد عند تسخينها إلى 120 درجة مئوية عند حمل انهييار 1.5 و 1.85 كيلو نيوتن على التوالي، للعينات المسلحة بقطر 12 مم و 2.3 و 3.4 كيلو نيوتن على التوالي، للعينات المسلحة بقطر 16 مم، وهو أقل بكثير من الأحمال لعينات المسخنة عند 20 و 40 و 80 درجة مئوية (الشكلان 18 و 19). يمكن تفسير هذا السلوك بحقيقة أن تسخين العينات إلى 120 درجة مئوية كان أعلى من درجة انصهار مادة البوليمر (115 درجة مئوية)، والتي تستخدم لربط ألياف الزجاج المصنوع منها قضيب GFRP هذه الحرارة المرتفعة تتسبب في إتلاف النتوءات الموجودة على سطح القضيب وبذلك تدمر قوة الترابط الميكانيكية بين الخرسانة و GFRP.



شكل رقم (17): النموذج وجهاز اختبار الدفع



شكل رقم (18): منحنى الازاحة والحمل للعينات الخرسانية المسلحة بقضيب قطر 12 مم



شكل رقم (19): منحنى الازاحة والحمل للعينات الخرسانية المسلحة بقطر 16 مم

نوع الانهيار:

شكل 20 يوضح نوع الانهيار بعينات الخرسانة العادية والحاوية على ألياف الحديد بعد التحميل. من الشكل نلاحظ ظهور تشقق طولي على طول عمق العينات الخرسانية غير الحاوية على الألياف (F0) عند درجات الحرارة المختلفة (T20 – T40 – T80)، ويمكن تعليل ذلك بالأسباب المذكورة سابقاً. بينما العينات الحاوية على ألياف الحديد بعضها لم يظهر بها التشققات والبعض الآخر كانت تشققات ضعيفة، ويرجع السبب إلى زيادة الترابط بين مكونات الخلطة الخرسانية بإضافة الألياف والتي بدورها تؤخر من ظهور التشققات.

شكل 21 يبين عينتان من الخرسانة العادية والحاوية على ألياف الحديد (T120F0) و (T120F0.75) بعد التسخين عند درجة حرارة 120 °م وبعد التحميل، على التوالي. نلاحظ من الشكل 21 ظهور تشققات بالعينتين على طول عمق المكعب وذلك نتيجة تأثير درجة الحرارة. فشل العينتين (T120F0) و (T120F0.75) عند حمل صغير جداً (1.5 و 1.85 كيلو نيوتن، شكل 18)، على التوالي، مقارنة بالعينات المعرضة لدرجات حرارة (20، 40، 80 °م). ويرجع تعليل ذلك إلى السبب الرئيسي وهو تسخين العينات عند درجة 120 °م كان أعلى من درجة حرارة انصهار مادة البوليمر (115 °م) والتي تسببت في تلف النتوءات الموجودة على سطح القضيب وبذلك تدمر قوة الترابط الميكانيكية بين الخرسانة و GFRP، وبالإضافة إلى الأسباب المذكورة سابقاً.



شكل رقم (20): نوع الانهيار بالنماذج بعد التحميل



T120F0.75 T120F0
شكل رقم (21): نوع الانهيار بالنماذج بعد التحميل

يوضح الشكل 22 نوع انهيار عينتان من الخرسانة العادية والحاوية على ألياف حديدية، والمسلحة بقضيب GFRP قطره 16 مم بعد التحميل والتسخين عند درجة حرارة 40 درجة مئوية. من الشكل، نلاحظ ظهور شق طولي على طول عمق عينة الخرسانة الخالية من الألياف (CU16F0T40)، وقد حدث نفس السلوك مع النموذج المسخن عند درجة حرارة 80 درجة مئوية. يمكن تفسير ذلك بالأسباب المذكورة أعلاه. بينما العينات الحاوية على ألياف حديدية (CU16F0.75T40)، فإن بعضها لم تظهر عليها شقوق، والبعض الآخر كانت شقوقه ضعيفة، ويعود السبب إلى زيادة الترابط بين مكونات الخلطة الخرسانية بإضافة الألياف، مما يؤخر ظهور الشقوق.



CU16F0.75T40



CU16F0T40

شكل رقم (22): نوع الانهيار في النماذج بعد التحميل

يوضح الشكل 23 عينتين من الخرسانة العادية والحاوية على الياف حديد (CU16F0T120) و (CU16F0.75T120) بعد التسخين عند 120 درجة مئوية وبعد التحميل، على التوالي. نلاحظ من الشكل ظهور تشققات في العينتين على طول عمق المكعب نتيجة لتأثير درجة الحرارة العالية. وقد فشلت العينتان عند حمل صغير جدًا (2.3 و 3.4 كيلو نيوتن، الشكل 19) على التوالي، مقارنةً بالعينات المعرضة لدرجات حرارة (20، 40، 80 درجة مئوية). ويعود ذلك إلى الأسباب المذكورة أعلاه.



CU16F0T120 CU16F0.75T120
شكل رقم (23): نوع الانهيار في النماذج بعد التحميل

مقارنة بين العينات المسلحة بقضبان الألياف الزجاجية بمقاس 12مم و16مم:

يوضح الجدول 4 مقارنة بين حمل فشل الترابط لعينات الخرسانة المُحسَّنة بألياف الحديد وبدونها، المعرضة لدرجات حرارة مختلفة وأقطار مختلفة من GFRP. يتضح من الجدول 4 أن العينات التي يبلغ قطرها 12 مم تحمل أحمال فشل ترابط أقل، كما يُلاحظ أن أكبر انخفاض حدث عند التعرض لدرجة حرارة (120 درجة مئوية)، وأن العينات المعرضة لدرجات الحرارة بمقدار 120 درجة مئوية كانت أكثر عرضة للتلف. ويعود ذلك أساسًا إلى أن تسخين العينات عند 120 درجة مئوية كان أعلى من درجة حرارة انصهار مادة البوليمر (115 درجة مئوية)، مما تسبب في تلف النتوءات على سطح القضيب، مما أدى إلى إتلاف قوة الترابط الميكانيكية بين الخرسانة و GFRP.

جدول رقم (4): تأثير قضبان GFRP بقطر 12 مم و16 مم على حمل فشل الترابط

العينات الحاوية على الياف حديدية CUF0.75				العينات بدون الالياف الحديدية CUF0				درجة الحرارة	الخاصية
Reductio n (%)	16	Reductio n (%)	12	Reductio n (%)	16	Reductio n (%)	12	c	
0	46.3	0	36.1	0	37.5	0	29.1	20	حمل فشل الترابط Kn
17.7	38.1	17.7	29.7	18.7	30.5	18.9	23.6	40	
41.04	27.5	34.1	23.8	44	21.0	37.5	18.2	80	
92.66	3.4	94	2.15	93.9	2.3	94.7	1.55	120	

يوضح الجدول 5 تأثير درجات الحرارة 40 و80 و120 درجة مئوية على نمط فشل اختبار الدفع للعينات المُحسَّنة بألياف الحديد مُسلحة بقطر 12 و16 مم، أو بدونها. يتضح أن أنماط فشل العينات المُسلحة بقطر 12 و16 مم كانت متطابقة تقريبًا، إلا أن الخرسانة المُسلحة بقطر 12 مم أظهرت حمل فشل أقل (الجدول 4). وكما أوضحنا سابقًا، فقد حُسِّن استخدام ألياف الحديد نمط فشل العينات المُسلحة بقطر 12 و16 مم.

جدول رقم (5): تأثير قضبان الاليف الزجاجية قطر 12مم و16 مم علي نمط لانهيار

الحرارة C°	12mm		16mm	
	CUF0	CUF0.75	CUF0	CUF0.75
40				
80				
120				

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 الى التقليل من خواص الخرسانة.
- يتناقص الهطول مع اضافة ألياف الحديد ويرجع السبب الى أن إضافة ألياف الحديد يؤدي الى تماسك العجينة الخرسانية مما تقلل من قيمه الهطول.
- مقاومة الانضغاط والشد تقل لكل من عينات الخرسانة العادية والمحسنة بألياف الحديد الى 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 اجهادات داخلية يمكن أن تقلل من المقاومة وبعدها تستعيد الخرسانة مقاومتها عند 100 درجة عندما تفقد كل مائها. وكذلك درجات الحرارة غير الخطية داخل جسم الخرسانة يولد إجهادات شد حرارية تؤدي الى تشققات داخلية هذه التشققات تؤدي الى التقليل من مقاومة الخرسانة.
- مقاومة الانضغاط والشد تزداد مع إضافة ألياف الحديد في جميع درجات الحرارة، ويرجع ذلك الى استخدام الألياف الحديدية والتي تزيد من مقاومة الخرسانة وتؤخر من ظهور التشققات.

- 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 الماء 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.
- عينات الخرسانة العادية عند تسخينها عند 40 و 80 °م أظهرت زيادة تقريبا خطية حتى أحمال الانهيار وكانت قيمها أقل من قيم العينات 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، وكذلك الاختلاف في معامل التمدد العرضي بين الخرسانة و GFRP.
- عند تسخين عينات الخرسانة العادية المحتوية على ألياف حديد إلى درجة حرارة 120 درجة مئوية، فإنها تنهار عند حمل انهيار أقل بكثير مقارنةً بالنماذج التي سُخِّنت إلى درجات حرارة 20 و 40 و 80 درجة مئوية. ويمكن تفسير هذا السلوك بأن درجة الحرارة (120 درجة مئوية) تتجاوز درجة انصهار المادة البوليمرية (115 درجة مئوية) المستخدمة لربط الألياف الزجاج المكونة لقضيب (GFRP)؛ إذ تتسبب هذه الحرارة العالية في إتلاف النتوءات الموجودة على سطح القضيب، مما يؤدي بدوره إلى تدمير قوة الترابط الميكانيكي بين الخرسانة وقضيب GFRP.
- أظهرت جميع العينات الخرسانية التي تحتوي على ألياف الحديد مقاومة أعلى عند درجات الحرارة (20، 40، 80 درجة مئوية) مقارنةً بعينات الخرسانة العادية. ويرجع السبب إلى زيادة الترابط بين مكونات الخلطة الخرسانية بالإضافة إلى الألياف والتي بدورها تؤخر من ظهور التشققات.

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. ان، 1988، خرسانة مسلحة جديدة، ترجمة د. محمد علي عبد الزروق الأوسي وباسل 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.
 - BS812: part103:1992: methods for determinations of particle size distribution.
 - BS812: part110:1990: methods for determinations of aggregate impact.
 - BS812: part112:1990: methods for determinations of aggregate crushing value.
 - BS1881: part102:1983: methods for determinations of slump.
 - BS1881: part107:1983: methods for determinations of density of compacted fresh concrete.
 - BS1881: part111:1983: methods for normal curing of test specimens (20c method).
 - BS1881: part116:1983: methods for determinations of compressive strength concrete cubes.
 - BS1881: part117:1983: methods for determinations of tensile splitting strength.
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.