

## دراسة تأثير التبريد الفوري بالماء على مقاومة الخرسانة المعرضة لدرجات الحرارة العالية

[www.doi.org/10.62341/meas6674](http://www.doi.org/10.62341/meas6674)

محمد أحمد النعيري<sup>a\*</sup> إبراهيم محمد أبوسنينة<sup>b</sup> أبوبكر على الأميلس<sup>c</sup>

الهندسة المدنية، جامعة مصراتة، ليبيا

m.annairy@eng.misuratau.edu.ly

### الملخص:

تبحث هذه الدراسة في تأثير التبريد بالماء مقابل التبريد التقليدي بالهواء على قدرة تحمل الخرسانة للضغط بعد التعرض لدرجات حرارة عالية (800 درجة مئوية) لمدة 15 دقيقة في فرن كهربائي. استخدمت الخلطات الخرسانية ركام ناعم تم الحصول عليه من محاجر الرمل في منطقة أبوروية بمدينة مصراتة وركام خشن من محاجر بالقرب من مدينة بني وليد. تم تحضير (27) عينة وإخضاعها للمعالجة الرطبة لمدة 28 يوماً. تم تصنيف العينات إلى ثلاث مجموعات بناءً على قوى الضغط المستهدفة: C25 و C30 و C35، مع تسع (9) عينات في كل مجموعة. عرضت ست (6) عينات لدرجات حرارة عالية في أحد أفران الشركة الليبية للحديد والصلب؛ ثم تم تبريد ثلاث عينات على الفور بالماء، بينما تم السماح للثلاث عينات المتبقية بالتبريد تدريجياً في درجة حرارة الغرفة، فيما تم الاحتفاظ بثلاث عينات إضافية كعينات مرجعية لم تخضع لدرجات حرارة عالية. بعد الاختبار، أشارت النتائج إلى أن العينات المبردة بالماء أظهرت قدرة تحمل ضغط أقل مقارنة بتلك التي تم تبريدها تدريجياً في درجة حرارة الغرفة. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت العينات المرجعية أعلى قدرة على تحمل الضغط. والجدير بالذكر أن النتائج كشفت عن علاقة عكسية بين طريقة التبريد وقدرة الخرسانة على تحمل الضغط، حيث تتوافق قوى الضغط الأعلى مع انخفاض القوة الإجمالية بسبب طرق التبريد المطبقة.

**الكلمات المفتاحية:** الحرارة العالية، التبريد بالماء، التبريد الطبيعي، مقاومة الضغط، عينات مرجعية.

## Study of the effect of instant cooling with water on the resistance of concrete exposed to high temperatures

<sup>a</sup>Mohamed Ahmed Alnoairi, <sup>b</sup>Ibrahim Mohamed Abusinena,  
<sup>c</sup>Abubaker Ali Alamailes

m.annairy@eng.misuratau.edu.ly

### ABSTRACT

This study investigates the impact of water-cooling versus conventional air-cooling on the compressive strength of concrete after exposure to high temperatures (800C<sup>0</sup>) for 15 minutes in an electric furnace at the Libyan Iron and Steel Company. The concrete mixtures utilized fine aggregates sourced from sand quarries in the Aburoya area of Misurata City and coarse aggregates from a quarry near Bani Walid City. A total of 27 samples were prepared and subjected to a 28-day moisture treatment. The samples were categorized into three groups based on their target compressive strengths: C25, C30, and C35, with nine samples in each group. For each group, six samples were exposed to high temperatures; three were then cooled immediately with water, while the remaining three were allowed to cool gradually at room temperature. An additional three samples were maintained as reference specimens that did not undergo high-temperature exposure. Upon testing, the results indicated that the samples cooled by water exhibited lower compressive strength compared to those that were gradually cooled at room temperature. Additionally, the reference samples demonstrated the highest compressive strength. Notably, the findings revealed an inverse relationship between the cooling method and concrete strength, with higher compressive strengths corresponding to decreased overall strength due to the cooling methods applied.

**Keywords:** High temperatures, Water cooling, Conventional air-cooling, Compressive strength, Reference samples.

## 1. المقدمة:

تتعرض المنشآت الخرسانية خلال عمرها الافتراضي إلى العديد من الظروف القاسية سواء كانت طبيعية أو بفعل البشر، وتعتبر الحرائق واحدة من أهم الظروف الطارئة والعوارض التي من الممكن أن تطرأ على الخرسانة في المباني والمنشآت باختلاف أنواعها وأشكالها ومساحاتها. هذه الحرائق تحدث العديد من الأضرار في جسم الخرسانة، وهذا الضرر يعود بشكل سلبي على مقاومة الخرسانة المكونة للهيكل الخرساني للمبنى. وبما أن أكثر الطرق شيوعاً في التعامل مع الحريق هو استخدام الماء لغرض الإطفاء، فإن هذا الأمر يترتب عليه انخفاض مفاجئ لحرارة الخرسانة بسبب الفرق الكبير في درجة الحرارة بين الخرسانة والماء المستخدم للإطفاء. وقد ركزت الأبحاث السابقة في الغالب على مقاومة الخرسانة أثناء الحريق، حيث قام Xin Luo et al. (2000) بدراسة تأثير التبريد بالماء والتبريد داخل الفرن على سلوك الخرسانة العادية والخرسانة عالية الأداء والمعرضة لدرجات حرارة 800 م<sup>0</sup>، 1100 م<sup>0</sup>، كما أن التشققات كانت أكبر في حالة عينات الخرسانة عالية الأداء مقارنة بعينات الخرسانة العادية [1]. أجريت أيضاً دراسة أخرى في عام (2010) قام بها كل من SOUZA, A.A.A., MORENO – JR, A. L على عينات اسطوانية بأبعاد 10 × 20 سم (القطر × الارتفاع) وقام بتعريضها لدرجات حرارة مختلفة شملت 300 م<sup>0</sup> و 600 م<sup>0</sup> و 900 م<sup>0</sup>، وقد أظهرت النتائج أنه كلما زادت درجة الحرارة كلما قلت مقاومة الضغط المتبقية. [2] أجريت دراسة قام بها كل MAANSER, A.; BENOUIS, A.; FERHOUNE (2018) بتحليل الخواص الميكانيكية للخرسانة التي تحتوي على الإضافات من خلال تعريض عينات من الخرسانة لدرجات حرارة 20 م<sup>0</sup> و 105 م<sup>0</sup> و 300 م<sup>0</sup>، وقد لاحظ الباحثون أن جميع العينات المختبرة حدث لها انخفاض في مقاومة الضغط عندما ارتفعت درجة حرارتها، كما بينت الدراسة أن أكبر انخفاض للمقاومة حصل للعينات التي تحتوي على إضافة الهواء المحبوس بنسبة 2% [3]. أما الباحث LORENZON, Andressa (2014) فقام بتقييم العينات الخرسانية المعرضة إلى درجات حرارة 300 م<sup>0</sup> و 500 م<sup>0</sup> و 800 م<sup>0</sup> خلال فترات من 30 إلى 90 دقيقة والتي تم إخضاعها بعد ذلك إلى التبريد الطبيعي والتبريد

المفاجئ بالماء، وكانت النتائج انخفاض مقاومة الضغط بمعدل 30% للخرسانة المعرضة لدرجة حرارة (300 م<sup>0</sup>) و43% للخرسانة المعرضة لدرجة حرارة (500 م<sup>0</sup>)، وتقريباً 100% للخرسانة المعرضة لدرجة حرارة (800 م<sup>0</sup>)، وفيما يتعلق بالتبريد المفاجئ لوحظ أن قيم مقاومة الخرسانة المتبقية بالتبريد المفاجئ مقارنة بالتبريد الطبيعي أقل بنسبة 7.5 % [4]. كما قام كل من BOTTE, W.; CASPEELE, R (2017) بتحليل آثار اثنين من طرق التبريد على الخواص الميكانيكية للخرسانة بعد تعريضها لدرجات (175 م<sup>0</sup> و 350 م<sup>0</sup> و 600 م<sup>0</sup> و 900 م<sup>0</sup>) لمدة 15 ساعة ثم تبريدها بطريقتين (الغمر والرش) مع مقارنة النتائج بعينات عند درجة 20 م<sup>0</sup>، ففي الطريقة الأولى تم رش الماء لمدة 5 دقائق على سطح العينات الخرسانية بعد تعرضها لدرجات الحرارة أما الطريقة الثانية فقام بغمر العينات في ماء عند 20 م<sup>0</sup> لنفس الفترة، وتوصل الباحث إلى أن تبريد العينات بالغمر كان له أثر سلبي على مقاومة العينات أكثر من التبريد برش الماء لنفس الفترة [5]. وأخيراً في هذه الدراسة، سيتم المقارنة بين تأثير التبريد بالماء والتبريد الطبيعي (التبريد في درجة حرارة الغرفة بدون أي مؤثر خارجي) على مقاومة الضغط لعينات من الخرسانة بمقاومات مختلفة تم تعريضها لدرجة حرارة (800 م<sup>0</sup>) داخل الفرن مع نتائج اختبارات العينات المرجعية لمقاومة الضغط (القياسية) في المعمل.

## 2. منهجية الدراسة:

تتمثل المنهجية المتبعة في هذه الدراسة في إجراء تجارب عملية على عدد (27) عينة من مكعبات خرسانية بمقاس 15 سم × 15 سم × 15 سم بمقاومات مختلفة شملت 25 ن/مم<sup>2</sup> و 30 ن/مم<sup>2</sup> و 35 ن/مم<sup>2</sup>. تم تجهيز العينات ومعالجتها بطريقة الغمر بالماء لمدة 28 يوم، ثم بعدها تقسيم هذه العينات كل صنف (مقاومة ضغط) من الخرسانة إلى ثلاثة مجموعات، وإجراء اختبار مقاومة الضغط للمجموعة الأولى من المكعبات من كل صنف على اعتبار أنها عينات مرجعية، ووضع الجزئين الباقيين بفرن في درجة حرارة عالية ولمدة ربع ساعة، وذلك لغرض محاكاة ارتفاع درجة حرارة الخرسانة أثناء الحريق. ثم غمر أحد الأجزاء في الماء فور خروجه من الفرن، والجزء الثاني من العينات ترك ليبرد عند درجة حرارة الغرفة دون أي مؤثر خارجي. هذه الدراسة أجريت على خرسانة منتجة من

اسمنت شركة الاتحاد العربي للمقاولات العامة ومن ركام خواصه موضحة في الجداول التالية:

جدول 1 : يبين نتائج اختبار تحديد الوزن النوعي ونسبة الامتصاص للركام الخشن

WT .IN AIR SATURATED SURFACE DRY. (A) g	1029.1	1032.5	
WT .IN AIR OF OVEN DRY SAMPLE, (B) g	1017.8	1021.2	
WT .OF SAMPLE IN WATER. (C) g	642.9	645.5	Average
BULK SP Gr. B/(A-C)	2.635	2.639	2.637
BULK SP Gr. A/(A-C) (S.S.D.)	2.665	2.668	2.666
APPARENT SP.Gr -B/(B-C)	2.715	2.718	2.716
ABSORPTION PERCENT (A-B/B)*100	1.11	1.11	1.11

كما يبين الجدول 2 نتيجة اختبار تعيين معامل الصدم للركام الخشن والذي أجري وفقا للمواصفة (BS 812-Part 112: 1990).

جدول 2: نتائج اختبار تعيين معامل الصدم للركام الخشن

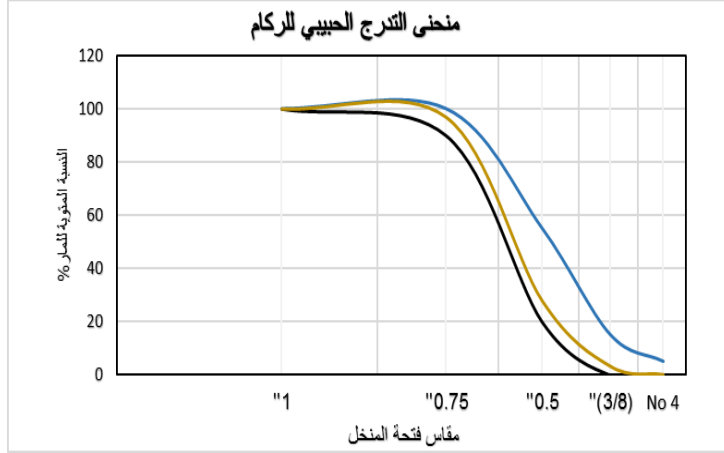
Test sample	Mass of dry sample A(g)	Mass Passing Sieve (2.36 mm) B(g)	Impact value 100×B/A(%)
	636.4	52.2	8.2
	639.6	51.5	8.1
Average			8.1

كما يبين الجدول 3 نتيجة اختبار التدرج الحبيبي للركام والذي أجري وفقا للمواصفة ASTM Designation C136-01

جدول 3: يبين نتيجة نتائج التحليل المنخلي للركام المستخدم في الخلط

Sieve	1.5''	1''	0.75''	0.5''	3/8''	No4	Pan
Retained (g)	0	0	230	5058	1803	231.0	7
Retained %	0	0	3.1	69	24.6	3.2	1
Passing %	100	100	96.9	27.8	3.2	0.1	0

والشكل 1 يبين تدرج عينة الركام المستخدم في الخلطات.



شكل 1 : تدرج عينة الركام المستخدم مع حدود المواصفة

كما يبين الجدول 4 كميات ومكونات الخلطة للمتر المكعب للمقاومات مجال الدراسة.

جدول 4: كميات ومكونات الخلطة للمتر المكعب للمقاومات مجال الدراسة

نوع الخلطة	كمية الاسمنت (Kg/m <sup>3</sup> )	كمية الركام (Kg/m <sup>3</sup> )	كمية الرمل (Kg/m <sup>3</sup> )	كمية ماء الخلط (Liter/m <sup>3</sup> )
C25	300	1100	650	205
C30	350	1005	759	175
C35	390	1100	720	208

بعد إجراء عملية خلط وصب وتجهيز العينات ومعالجتها بطريقة الغمر لمدة 28 يوماً، تم تعريضها للحرارة العالية (عند عمر 29 يوماً) كما بالشكل 2، ومن ثم عملية التبريد (جزء برد بالماء مباشرة والجزء الآخر ترك ليبرد تدريجياً في درجة حرارة الغرفة) كما هو موضح في الشكل 3 الذي يبين تبريد العينة فور خروجها من الفرن مباشرة. الشكل 4 يوضح تبريد العينات في درجة حرارة الغرفة.



شكل 2: الفرن المستخدم في تسخين العينات



شكل 3: إحدى العينات أثناء التبريد الفوري بالماء



شكل 4 : بعض العينات التي تركت لتبرد في درجة حرارة الغرفة

### 3. النتائج:

بعد الانتهاء من تعريض العينات من كل صنف لدرجة الحرارة العالية نقلت العينات إلى أحد المعامل الموثوقة والمعتمدة للقيام بتحديد مقاومة الضغط لكل صنف من العينات المدروسة بواسطة جهاز تحديد مقاومة الضغط للخرسانة كما موضح في الشكل 5. الشكل 6 يبين الانهيار في إحدى العينات.



شكل5: يوضح احدى العينات أثناء اختبار مقاومة الضغط



شكل6 : نمط الانهيار لعينة من الخلطة C30

وبعد إجراء الاختبار على جميع العينات تحصلنا على مقاومة العينات مجال الدراسة والتي أدرجت في الجداول التالية لكل صنف على حدة.



جدول 5 نتائج مقاومة الضغط للخلطة C25 القياسية.

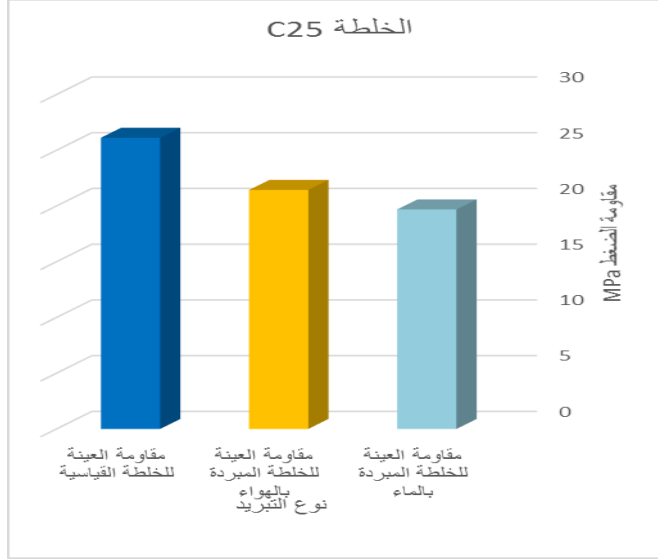
رقم العينة	وزن العينة (Kg)	كثافة العينة (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومة العينة (MPa)
1	7.74	2293	25.24
2	7.74	2293	25.51
3	7.76	2299	27.6
المتوسط			26.12

جدول 6 نتائج مقاومة الضغط للخلطة C25 للعينات المبردة في درجة.

رقم العينة	وزن العينة (Kg)	كثافة العينة (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومة العينة (MPa)
1	7.48	2216	21.38
2	7.32	2169	20.84
3	7.56	2240	22.09
المتوسط			21.44

جدول 7 نتائج مقاومة الضغط للخلطة C25 للعينات المبردة بالماء.

رقم العينة	وزن العينة (Kg)	كثافة العينة (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومة العينة (MPa)
1	7.38	2187	20.07
2	7.36	2181	19.76
3	7.36	2181	19.24
المتوسط			19.69



شكل 7 تأثير نوع التبريد على مقاومة الخرسانة من الخلطة C25

من الشكل 7 يتضح أن التبريد بالماء يؤثر سلبا على مقاومة الخرسانة مقارنة بالعينات التي تركت لتبرد في درجة حرارة الغرفة، هذا راجع إلى الصدمة الحرارية التي تتعرض لها الخرسانة نتيجة التبريد بالماء مقارنة بالعينات التي تركت في درجة حرارة الغرفة والعينات القياسية للخلطة.

جدول 8 نتائج مقاومة الضغط للخلطة C30 القياسية

رقم العينة	وزن العينة (Kg)	كثافة العينة (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومة العينة (MPa)
1	8.1	2400	35.98
2	7.92	2347	35.73
3	7.84	2323	35.67
المتوسط			35.79

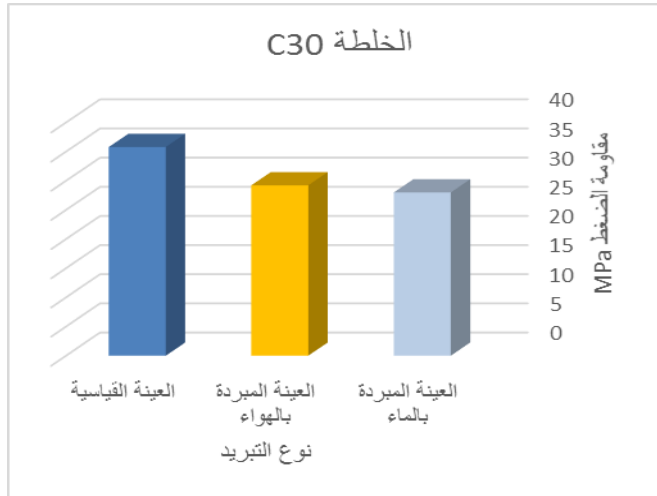
تم استلام الورقة بتاريخ: 2024/6/30 م وتم نشرها على الموقع بتاريخ: 2024/7/31 م

جدول 9 نتائج مقاومة الضغط للخلطة C30 للعينات المبردة في درجة

رقم العينة	وزن العينة (Kg)	كثافة العينة (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومة العينة (MPa)
1	7.28	2157	29.22
2	7.31	2166	28.13
3	7.34	2175	29.13
المتوسط			29.23

جدول 10 نتائج مقاومة الضغط للخلطة C30 للعينات المبردة بالماء

رقم العينة	وزن العينة (Kg)	كثافة العينة (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومة العينة (MPa)
1	7.3	2163	28.02
2	7.52	2228	27.78
3	7.36	2181	28
المتوسط			28



شكل 8: تأثير نوع التبريد على مقاومة الخرسانة من الخلطة C30

يتضح من الشكل 8 أن تبريد العينات مباشرة بالماء يؤثر سلباً على مقاومة الخرسانة أكثر من العينات التي تركت لتبرد تدريجياً في درجة حرارة الغرفة للخلطة C30.

جدول 11 : نتائج مقاومة الضغط للخلطة C35 القياسية

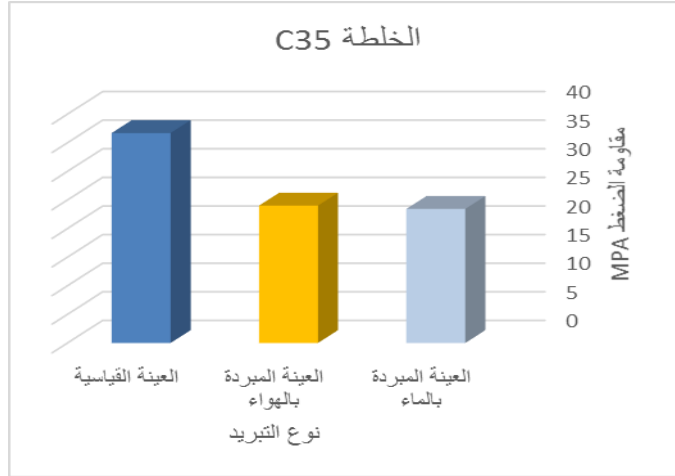
رقم العينة	وزن العينة (Kg)	كثافة العينة (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومة العينة (MPa)
1	7.64	2264	36.44
2	7.68	2276	37.51
3	7.6	2258	36.13
المتوسط			36.69

جدول 12 : نتائج مقاومة الضغط للخلطة C35 للعينات المبردة في درجة حرارة الغرفة

رقم العينة	وزن العينة (Kg)	كثافة العينة (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومة العينة (MPa)
1	7.26	2151	24.09
2	7.3	2163	24.18
3	7.32	2169	23.78
المتوسط			24.01

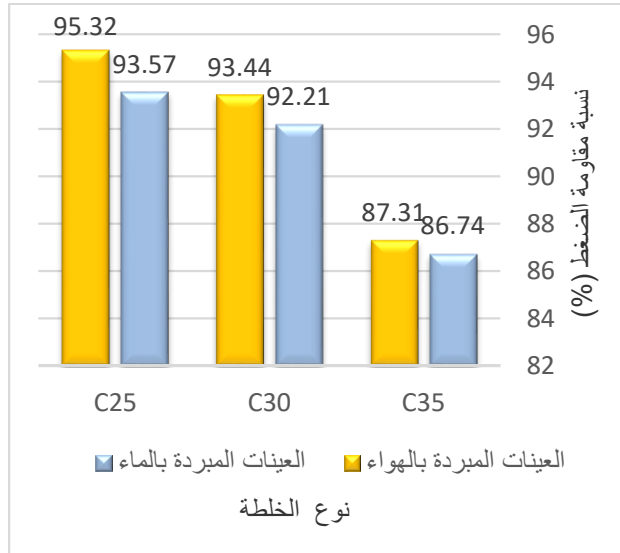
جدول 13 : نتائج مقاومة الضغط للخلطة C35 للعينات المبردة بالماء

رقم العينة	وزن العينة (Kg)	كثافة العينة (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومة العينة (MPa)
1	7.32	2169	23.29
2	7.3	2163	23.04
3	7.38	2187	23.98
المتوسط			23.44



شكل 9: تأثير نوع التبريد على مقاومة الخرسانة من الخلطة C35

من الشكل 9 يتضح أن تبريد العينات مباشرة بالماء يؤثر سلبا على مقاومة الخرسانة أكثر من العينات التي تركت لتبرد تدريجيا في درجة حرارة الغرفة للخلطة C35.



شكل 10 : النسب المئوية لمقاومة الضغط المتبقية

حيث يتضح من الشكل 10 ولجميع عينات الدراسة أن التبريد المباشر للخرسانة المعرضة للحرارة العالية يعطي نتيجة سلبية لمقاومة الخرسانة أكثر مما لو تركت لتبرد لوحدها بدون مؤثر خارجي.

#### 4. المناقشة:

توضح النتائج التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة أن تبريد الخرسانة المعرضة للحرارة العالية بالماء يسبب في انخفاض مقاومة الضغط بدرجة أكبر من تبريدها طبيعياً بدون تدخل خارجي في الهواء. ويرجح أن يكون سبب ذلك أن التبريد بالماء يعمل على خفض درجة حرارة الخرسانة بشكل مفاجئ ويسبب صدمة حرارية للخرسانة تعمل على توليد إجهادات داخلية كبيرة نتيجة للتمدد والانكماش غير المتجانس للخرسانة لكونها مادة غير متجانسة (عجينة اسمنتية - ركام). هذه الإجهادات تتسبب في حدوث تشققات دقيقة في جسم الخرسانة أو حتى تصدعات كبيرة داخل الخرسانة، مما يؤدي إلى انخفاض في مقاومتها. في حين تترك الخرسانة المعرضة للحرارة العالية لتبرد بشكل طبيعي (بالهواء) فإن حرارة الخرسانة تنخفض بشكل تدريجي وأقل حدة من التبريد بالماء. هذه الطريقة من التبريد تسمح للإجهادات الداخلية بالتوزع بشكل أكثر توازناً ويقلل من خطر التشققات والتصدعات في بنية الخرسانة بشكل مركز في أماكن التعرض للماء.

#### 5. الاستنتاجات:

- أ. التبريد الفوري للخرسانة المعرضة للحرارة العالية بالماء يسبب في انخفاض كبير في مقاومتها.
- ب. التبريد الفوري بالماء يعمل على خفض مقاومة الضغط للخرسانة بمعدل أكبر من التبريد الطبيعي (في الهواء).
- ج. يقل الفارق في معدل انخفاض المقاومة بزيادة مقاومة الضغط للخرسانة.

#### 6. الخلاصة:

توصلت هذه الدراسة إلى أن التبريد الفوري للخرسانة المعرضة للحرارة العالية بالماء

يخضع من مقاومة الخرسانة بمقدار 6.43%، 7.79%، 13.26% للعينات من الخلطات C35، C30، C25 المدروسة على الترتيب بينما العينات التي تركت لتبرد في درجة حرارة الغرفة انخفضت مقاومتها بمقدار 4.67%، 6.56%، 12.69% للعينات من الخلطات C35، C30، C25 على الترتيب.

#### 7. المراجع:

- [1] XIN, L., WEI, S., & SAMMY, N. C. (2000). "Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high performance concrete." *Cement and Concrete Research*, 30, 379-383.
- [2] SOUZA, A. A. A.; MORENO, A. L. Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. *Revista bracon de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 3, n. 4, p. 432–448, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952010000400005>.
- [3] MAANSER, A.; BENOUIS, A.; FERHOUNE, N. Effect of high temperature on strength and mass loss of admixture concretes *Construction and Building Materials*, Guildford, v. 166, p. 916–921, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.181>.
- [4] LORENZON, Andressa. Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas. 2014. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.
- [5] BOTTE, W.; CASPEELE, R. Post-cooling properties of concrete exposed to fire. *Fire Safety Journal*, Lausanne, v. 92, p. 142–150, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.06.010>