دراسة تأثير سمك طبقة التغطية على سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المعرضة للهب النار المباشر.

م. محمد نور العمر[1] د.م منيب العلاف[2] د.م. عصام ملحم[3]

(الإيداع: 10 كانون الأول 2025، القبول: 22 كانون الثاني 2026)

الملخص:

تُعد دراسة أداء الجوائز البيتونية المسلحة تحت تأثير درجات الحرارة المرتفعة من الجوانب الحيوية لتقييم سلوك العناصر الإنشائية في ظروف الحريق. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير الحريق المباشر على سلوك الجوائز المسلحة، مع التركيز على دور طبقة التغطية الخرسانية كعامل مؤثر في مقاومة الحرارة. تم إعداد سبع جوائز بيتونية مسلحة موزعة على ثلاث مجموعات تجريبية، وفق المتغيرين الأساسيين: سماكة طبقة التغطية والتعرض للحريق. تضمنت المجموعة الأولى ثلاث جوائز بسمك تغطية mm25 غير معرضة للحريق، بينما شملت المجموعة الثانية جائزتين بنفس السماكة تعرضتا للهب النار المباشر لمدة ساعة واحدة. أما المجموعة الثالثة، فتضمنت جائزتين بسمك تغطية mm40 تعرضتا أيضاً للهب النار المباشر لمدة ساعة.خلال الاختبار، تم تعريض الجوائز للهب النيران المباشرة دون استخدام أي وسيلة تبريد، وتم قياس درجات الحرارة كل خمس دقائق باستخدام جهاز قياس ليزري. بعد انتهاء الحريق، تم تطبيق التحميل مباشرة على الجوائز لدراسة سلوكها الإنشائي و نظرًا لعدم توفر عينات مرجعية خاصة بالمجموعة الثالثة (Cover = 40 mm)، فقد تم اعتماد المجموعة الأولى (العينات غير المعرضة للحريق) كمرجع أساسي للمقارنة بين المجموعات. ويعود ذلك إلى أن جميع العينات صُنعت من نفس الخلطة الخرسانية وبنفس أبعاد المقطع العرضي ونفس نوعية التسليح، مما يجعل المجموعة الأولى مرجعًا مناسبًا لقياس تأثير كل من الحريق وسمك طبقة التغطية على السلوك الإنشائي للجوائز. كما تم توضيح هذا القيد ضمن حدود الدراسة نظرًا لعدم إمكانية تنفيذ عينات مرجعية إضافية للمجموعة الثالثة.

تم تحليل النتائج من خلال منحنيات بيانية توضح العلاقة بين (الحمولة –الانتقال، الحمولة –إجهادات الشد، الحمولة – إجهادات الضغط، منحنيات السجلات الأعظمية للحرارة مع الزمن) وقد تم استخلاص النتائج بناءً على السلوك الإنشائي للجوائز تحت ظروف الحريق، تم تسجيل انخفاض بنسبة 9.1% في قدرة التحمل على الانعطاف للجوائز الخرسانية المسلحة ذات غطاء خرساني بسماكة mm25 بعد الحريق، وزيادة السماكة إلى mm40 رفعت قوة الانهيار بنسبة 4.9%، كما تضاعفت الانتقالات بنسبة 100.7% بعد الحريق للعناصر ذات غطاء mm25 مما يدل على ضعف البنية الداخلية، بينما خفّضت زيادة السماكة إلى mm40 هذه الانتقالات بنسبة 85.73%، مما يساهم في فهم تأثير طبقة التغطية الخرسانية على مقاومة الجوائز المسلحة للحرارة المرتفعة، ويعزز من تصميم العناصر الإنشائية في حالات الطوارئ الحرارية.

الكلمات مفتاحية: طبقة التغطية–الحرائق–خصائص ميكانيكية–الجوائز البيتونية –زمن التعرض للنار.

[1] طالب دراسات عليا (دكتوراه) في قسم الهندسة الإنشائيّة- كليّة الهندسة المدنيّة- جامعة حمص- سوريا
[2] أستاذ في قسم الهندسة الإنشائيّة- كلّيّة الهندسة المدنيّة- جامعة حمص- حمص- سوريا
[3] مدرس في قسم الهندسة الإنشائيّة- كليّة الهندسة المدنيّة- جامعة حمص-حمص- سوريا

A Study on the Effect of Concrete Cover Thickness on the Behavior of Reinforced Concrete Beams Exposed to Direct Fire Flame

Eng. Mohammed Nour Alomar[1] Dr. Eng. Muneeb Alallaf[2] Dr. Eng. Issam Melhem[3]

(Received: 10 December 2025, Accepted: 22 January 2026)

ABSTRACT

The structural performance of reinforced concrete beams under elevated temperatures is a critical aspect in evaluating the behavior of structural elements during fire conditions. This study aims to investigate the effect of direct fire exposure on the behavior of reinforced concrete beams, with particular emphasis on the role of concrete cover thickness as a key factor influencing thermal resistance.Seven reinforced concrete beams were prepared and divided into three experimental groups based on two primary variables: concrete cover thickness and exposure to fire. The first group consisted of three beams with a 25 mm concrete cover that were not exposed to fire. The second group included two beams with the same cover thickness, subjected to direct flame exposure for one hour. The third group consisted of two beams with a 40 mm concrete cover, also exposed to direct flame for one hour .During testing, the beams were exposed to direct flames without any cooling intervention, and temperatures were recorded every five minutes using a laser-based infrared thermometer. Immediately after fire exposure, mechanical loading was applied to the beams to assess their structural behavior. Due to the absence of dedicated reference specimens for the third group (cover = 40 mm), the first group (unexposed specimens) was adopted as the primary reference for comparison. This approach is justified by the fact that all beams were cast using the same concrete mix, identical cross-sectional dimensions, and the same reinforcement configuration, making the first group a suitable baseline for evaluating the combined effects of fire exposure and concrete cover thickness. This limitation was explicitly stated within the study's boundary conditions, as producing additional reference specimens for the third group was not feasible .The results were analyzed using graphical relationships illustrating load–deflection behavior, load–tensile strain, load–compressive strain, and maximum recorded temperatures over time. Based on the structural response of the beams under fire conditions, a 9.1% reduction in flexural load capacity was observed for beams with a 25 mm concrete cover after fire exposure. Increasing the cover thickness to 40 mm resulted in a 4.9% increase in ultimate load capacity. Additionally, deflections doubled (100.7% increase) after fire exposure for beams with a 25 mm cover, indicating significant internal degradation, whereas increasing the cover to 40 mm reduced these deflections by 85.73%.These findings contribute to a deeper understanding of the influence of concrete cover thickness on the fire resistance of reinforced concrete beams and support improved structural design considerations for elements subjected to thermal emergency conditions.

Keywords: **Concrete Cover – Fire Exposure – Mechanical Properties – Reinforced Concrete Beams – Fire Duration**

[1] Ph.D. Graduate Student in the Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Homs, Syria

[2] Professor, Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Homs University, Homs, Syria.

[3] Professor, Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Homs University, Homs, Syria.

1– مقدمة البحث:

يُعد تقييم أداء الجوائز البيتونية المسلحة تحت تأثير درجات الحرارة المرتفعة من القضايا الحيوية في مجال الهندسة الإنشائية، لا سيما عند دراسة سلوك العناصر الإنشائية أثناء تعرضها للحرائق. فقد شهدت السنوات الأخيرة العديد من الحوادث التي ألحقت أضراراً جسيمة بالمنشآت الخرسانية نتيجة التعرض للنيران، مما يجعل دراسة تأثير الحريق على هذه العناصر أمراً بالغ الأهمية.

في هذا السياق، تم إجراء دراسة تجريبية في مخبر كلية الهندسة المدنية بجامعة البعث – حمص، بهدف تحليل تأثير الحريق المباشر على سلوك الجوائز البيتونية المسلحة، مع التركيز على متغيرين رئيسيين: سماكة طبقة التغطية الخرسانية ومدة التعرض للهب النار المباشر. تم صب سبع جوائز خرسانية مسلحة موزعة على ثلاث مجموعات وفق السماكتين المعتمدتين (25,40)mm.

– المجموعة الأولى: ثلاث جوائز بسمك تغطية 25mm غير معرضة للحريق، استخدمت كمرجع لتحديد حمولة الانهيار.

– المجموعة الثانية: جائزان بسمك تغطية 25mm، تم تحميلهما مسبقاً بنسبة تقارب 60% من الحمولة المرجعية أي كحمولة استثمارية تحاكي الواقع، ثم تعرضتا للهب النار المباشر لمدة ساعة.

– المجموعة الثالثة: جائزان بسمك تغطية 40mm، بنفس ظروف التحميل للمجموعة الثانية.

تم تصميم الخلطة البيتونية بحيث تحقق مقاومة مميزة متوسطة قدرها 29.81Mpa بعد 28 يوماً. وخلال الاختبار، تم تعريض الجوائز للهب النار المباشر دون استخدام أي وسيلة تبريد، ثم خضعت لتحميل مركز حتى الانهيار.

تم تسجيل البيانات المتعلقة بـ: (علاقة الحمولة–الانتقال، الحمولة الأعظمية –تشوه الليف المشدود، الحمولة – تشوه الليف المضغوط). وأشكال نماذج الانهيار، واستخلصت النتائج وفقا لنتائج الاختبار.

2 – تجارب وآراء الباحثين:

في السنوات الأخيرة، شهدت تقنيات إنتاج البيتون تطوراً ملحوظاً، مما أتاح إمكانية تصنيع أنواع متعددة من الخرسانة، بما في ذلك الخرسانة عالية المقاومة وما فوق العالية. وقد ركزت العديد من الدراسات على سلوك هذه الأنواع المتقدمة عند التعرض للحرارة المرتفعة، خاصة من حيث قابلية التشظي والانهيار المفاجئ.

ومع ذلك، فإن الخرسانة المستخدمة في هذه الدراسة هي خرسانة تقليدية ذات مقاومة متوسطة، وليست من النوع عالي المقاومة. لذلك، فإن نتائج هذا البحث لا تتعلق بسلوك الخرسانة عالية المقاومة، بل تهدف إلى فهم تأثير الحريق المباشر على الجوائز البيتونية المسلحة المصنوعة من خرسانة عادية، وهي الأكثر شيوعاً في التطبيقات الإنشائية المحلية.

وبخلاف الخرسانة عالية المقاومة التي تُظهر قابلية أكبر للتشظي نتيجة لانخفاض نفاذيتها واحتباس الرطوبة الداخلية، فإن الخرسانة العادية تُظهر سلوكاً مختلفاً وأكثر استقراراً نسبياً عند التعرض للحرارة، مما يجعلها مناسبة للدراسة ضمن ظروف واقعية أكثر شيوعاً في المنشآت المحلية. تهدف هذه الدراسة إلى توثيق هذا السلوك وتحليل تأثير متغيري سماكة طبقة التغطية وزمن التعرض للحريق على الخصائص الميكانيكية للجوائز المسلحة، بما في ذلك التشوهات، الإجهادات، وانتشار الشقوق.

2–1–الأبحاث والدراسات المنجزة حول الحريق على الخرسانة المسلحة:

2–1–1–السلوك الإنشائي للجوائز البيتونية المسلحة المعرضة للهب النار المباشر[1]:

•في دراسة أجريت في مخابر كلية الهندسة المدنية بجامعة حمص، تم تصنيع جوائز باستخدام البيتون التقليدي وإخضاعها للهب نار يولده نظام خاص، عن طريق شلمون حراري يعمل باستخدام الغاز المنزلي البيوتان "الغاز البترولي المسال" لإنتاج الطاقة. كان هذا النظام موضوعًا في حيز خاص لإجراء هذا النوع من التجارب.

•تم إنتاج ست عينات من الجوائز البيتونية المسلحة باستخدام البيتون التقليدي بعيار إسمنت 550 كغ/م3. تم كسر عينتين مرجعيتين لدراسة الخصائص الميكانيكية وتمثيل منحنيات القوة–الانتقال (P–Δ) كما هو موضح بالشكل (1). ثم أخضعت العينات المتبقية للهب النار لمدتين زمنيتين نصف ساعة وساعة (0.5 ساعة، 1 ساعة)، باستخدام طريقتين للتبريد: التبريد التدريجي بالهواء والتبريد المفاجئ باستخدام المياه. بعد ذلك، أجريت مقارنة سلوكية بينها وبين العينات المرجعية.

– النتائج:

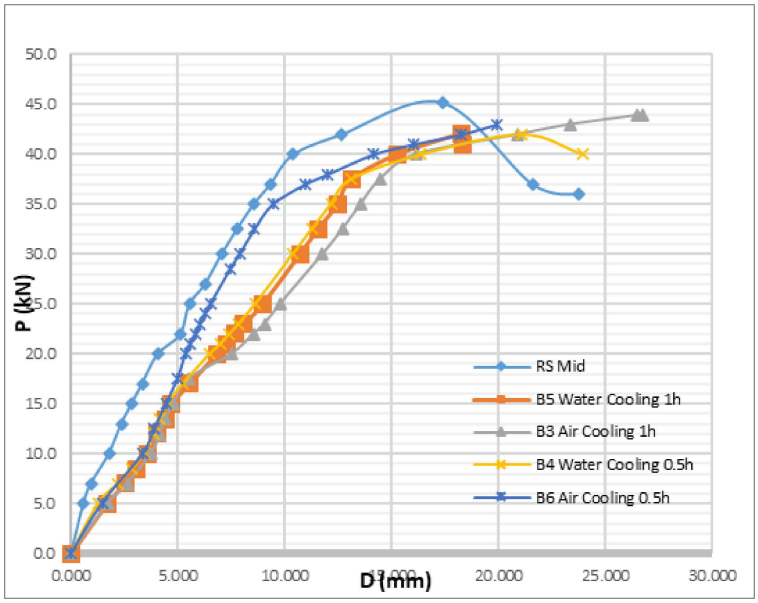
1–انتقالات الجوائز : بينت النتائج زيادة في قيم انتقالات الجوائز البيتونية بحالتي التبريد.

2–انخفاض المقاومة:

•بحالة التبريد التدريجي: انخفضت قيمة المقاومة حتى 2.48% للعينات المعرضة لمدة نصف ساعة، وحتى 5.23% للعينات المعرضة لمدة ساعة.

•بحالة التبريد المفاجئ: انخفضت قيمة المقاومة حتى 7.7% للعينات المعرضة لمدة نصف ساعة، وحتى 7.74% للعينات المعرضة لمدة ساعة.

3–تغيير سلوك المادة: أظهرت التجربة تغييرًا في سلوك المادة على حدود الاستثمار، حيث زادت قيم السهوم وسطياً حتى 34.66% عند التعرض للهب لمدة نصف ساعة، وحتى 52.7% عند التعرض لمدة ساعة.



الشكل رقم (1) : مخطط (القوة– الانتقال) للعينات المختبرة[1]

2–1–2–أداء الحريق للركام الخرساني المعاد تدويره والخواص الميكانيكية في درجات حرارة مرتفعة[2]:

– في هذه التجربة، تمت دراسة 17 عينة من الركام المعاد تدويره، مع أخذ متغيرات مختلفة في الاعتبار، وهي نسبة الركام المعاد تدويره بنسب متفاوتة (0%، 30%، 100%). كما تم أخذ تأثير درجة الحرارة في الحسبان، حيث تم تثبيت درجة الحرارة مرة عند درجة الحرارة الطبيعية 20 درجة مئوية، ومرة أخرى عند درجة حرارة تزيد عن 500 درجة مئوية ناتجة عن تأثير لهب النار. في هذه الدراسة، تم اعتماد الحالة المستقرة للحرارة بدلاً من الحالة المتزامنة مع تطبيق الحمولة (الحرارة أثناء الحمل).

– مواصفات الجوائز المختبرة

يبين الجدول (1) مواصفات الجوائز المختبرة للمجموعتين. يشمل الجدول تفاصيل مثل نسبة الركام المعاد تدويره، درجات الحرارة المستخدمة، والطريقة المتبعة في التجارب.

الجدول رقم (1): المواصفات الميكانيكية للعينات المختبرة في هذه التجربة

Test #	Coarse RCA (% by mass)	Tested temperature (°C)	Test type	f'_c (MPa)	E (MPa)	ν	ε_c	ε_t (°C)
1	0	20	Ambient strength	43.3	21,100	0.16	0.004	–
2	0	20	Ambient strength	43.4	23,800	0.25	0.006	–
3	0	20	Ambient strength	44.0	22,000	0.17	0.008	–
4	0	500	Elevated temperature strength	40.0	9400	0.31	0.010	7.3E−06
5	0	500	Elevated temperature strength	39.8	10,800	0.36	0.011	4.9E−06
6	0	>500	Unloaded but heated	–	–	–	–	–
7	30	20	Ambient strength	45.1	21,000	0.23	0.004	–
8	30	20	Ambient strength	47.2	22,700	0.17	0.004	–
9	30	500	Elevated temperature strength	38.2	7300	0.28	0.014	6.9E−06
10	30	500	Elevated temperature strength	39.6	7200	0.25	0.014	6.8E−06
11	30	>500	Unloaded but heated	–	–	–	–	–
12	100	20	Ambient strength	48.7	19,300	0.19	0.005	–
13	100	20	Ambient strength	47.7	24,400	0.21	0.003	–
14	100	500	Elevated temperature strength	34.6	5500	0.19	0.016	8.1E−06
15	100	500	Elevated temperature strength	35.5	5000	0.15	0.012	7.0E−06
16	100	560	Elevated temperature strength	31.3	5300	0.13	0.014	7.3E−06
17	100	>500	Unloaded but heated	–	–	–	–	–

• أظهرت النتائج أن الخواص الميكانيكية للخرسانة تأثرت بشكل ملحوظ عند استخدام الركام المعاد تدويره (RCA) تحت تأثير الحرارة العالية. تحديداً، لوحظ انخفاض بنسبة 0.2٪ في طاقة تحمل المقطع لكل زيادة بنسبة 1٪ في نسبة RCA عند درجة حرارة 500 درجة مئوية. بالإضافة إلى ذلك، تتأثر نسبة بواسون بحرارة البيئة ونوع الركام المستخدم داخل الخرسانة.

• على سبيل المثال، عند درجة حرارة 500 درجة مئوية، أظهرت الدراسة زيادة في نسبة بواسون تصل إلى 73٪ في عينات الخرسانة التي تحتوي على الركام الطبيعي، بينما لوحظ انخفاض بنسبة 15٪ في العينات التي تحتوي فقط على RCA.

• هذه النتائج تشير إلى أن استخدام الركام المعاد تدويره يمكن أن يكون له تأثير كبير على الخصائص الميكانيكية والاستجابة الحرارية للخرسانة، مما يستدعي دراسة أعمق لتقييم الأداء في الظروف العملية المختلفة.

2-1-3-متطلبات طبقة التغطية حسب الكود الأوروبي EN 1992 [3]:

نص الكود الأوروبي EN 1992-1-1 على أن طبقة التغطية الخرسانية (Concrete Cover) يجب أن تحقق ثلاثة متطلبات رئيسية:

– الحماية من التآكل (corrosion protection)

– التحمل الإنشائي (bond strength)

– مقاومة الحريق (fire resistance)

ويُحدد الكود سماكة التغطية الدنيا (minimum nominal cover) بناءً على:

– نوع العنصر الإنشائي

– قطر التسليح

– ظروف التعرض البيئي (exposure class)

– متطلبات مقاومة الحريق (fire resistance class)

على سبيل المثال، للحصول على مقاومة حريق لمدة ساعة واحدة (R60)، يجب أن تكون سماكة التغطية لا تقل عن 30mm إلى 40mm حسب نوع العنصر وموقعه، وفق الجدول 5.8 من EN 1992-1-2

الخلاصة: تبرز الدراسات السابقة أهمية تحليل تأثير الحريق على العناصر الإنشائية، لما يسببه من تغيرات في الخصائص الميكانيكية وسلوك الانفعال للخرسانة المسلحة. ومع ذلك، يُلاحظ أن بعض الأبحاث ركّزت على تأثير درجة الحرارة القصوى فقط، دون ربطها بتوزيع الحرارة على ارتفاع المقطع أو بسلوك الخرسانة تحت ظروف تحميل واقعية.

لذلك تهدف هذه الدراسة إلى سدّ جزء من هذا النقص، من خلال تسجيل بيانات حرارية وزمنية دقيقة، وتحليل شامل للسلوك الإنشائي للجوائز الخرسانية المسلحة المصنوعة من خرسانة عادية، بما يعزز فهم تأثير الحريق المباشر على الأداء الإنشائي لهذه العناصر.

3-المواد وطرق البحث:

مما سبق لوجهات نظر الباحثين عن تأثير الحريق على العناصر البيتونية فكان لا بد من عرض أهداف البحث. تم تنفيذ البرنامج التجريبي للتحقيق في الخصائص السلوكية للجوائز البيتونية التي تتعرض للنيران المباشرة وتطبيق الحمولة عليها مباشرة بعد الانتهاء من تطبيق اللهب بدون أي عملية تبريد. وتم اختبار الجوائز بزيادة طردية للحمولات الشاقولية حتى الانهيار. وسجلت العلاقات التي تربط بين الحمولة –الانتقال لكل مرحلة من زيادة الحمولة.

3-المواد وطرق البحث:

3-1-المواد المستخدمة

• **الإسمنت:** بورتلندي رتبته 42.5.

• **الحصويات:** حجارة طبيعية مكسرة متوفرة في المقالع السورية ورمل وأكبر قطر للبحص الناعم والخشن المستخدم 20mm. واجريت اختبارات (التحليل الحبي – النعومة ...) على الرمال والحصى للعينات للتأكد من مطابقتها للمواصفات.

• **المياه:** كانت المياه المستخدمة لعينات الاختبار مياه الشرب النظيفة.

3-1-1-العيناتووصفها:

تم صب سبع جوائز ويوضح الجدول(2) خصائص الجوائز وأبعادها.

الجدول رقم (2) : يوضح خصائص الجوائز المختبرة وأبعادها

الخصائص	النوع
15.0X20.0Cm	مقطع الجائز العرضي bXh
200Cm	الطول
180Cm	المجاز الفعال الصافي للجائز
0,75%	نسبة التسليح
2Ø12	فولاذ التسليح الرئيسي
5Ø8mm/m	نوع فولاذ الأتاري
بورتلندي عادي	الإسمنت
400Kg/m^3	عيار الإسمنت
Hyperplast ES901	الخلائط المضافة(ملدن)

3-2- طرق البحث

3-2-1-المتغيرات الرئيسية من خلال البرنامج التجريبي:

3-2-1-1- سماكة الغطاء البيتوني:

صبت الجوائز لدراسة العوامل المؤثرة على هذا السلوك. وبسماكة للغطاء البيتوني على التوالي mm (25,40) .

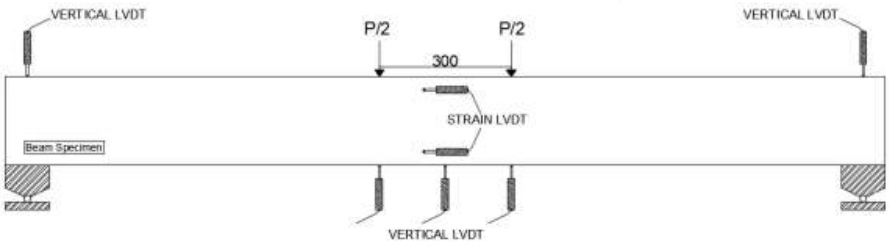
3-2-1-2- التعرض للهب النار :

تمت دراسة نموذجين من الجوائز الخرسانية المسلحة ذات طبقة تغطية بسماكة 25mm، أحدهما كنموذج مرجعي غير معرض للحريق، والآخر تعرض للهب النار المباشر لمدة ساعة واحدة.

تم تنفيذ سيناريو الحريق باستخدام خمسة منابع حرارية موزعة بالتساوي على كامل السطح السفلي للجائز، بحيث يغطي اللهب منطقة الشد السفلية بشكل متجانس قدر الإمكان. وقد ثُبتت المنابع على مسافات متساوية على طول الجائز لضمان انتظام التعرض الحراري، مع توجيه اللهب مباشرة نحو السطح السفلي للعينة.

بعد انتهاء مدة التعريض للحريق، جرى الانتقال مباشرة إلى مرحلة الاختبار الميكانيكي دون إجراء أي عملية تبريد للعينات، وذلك بهدف دراسة السلوك الإنشائي للجوائز في الحالة الساخنة مباشرة بعد التعرض للهب.

تم قياس درجة حرارة السطح السفلي لكل عينة قبل بدء التحميل باستخدام جهاز قياس حرارة يعمل بتقنية الأشعة تحت الحمراء، وهو جهاز غير تلامسي يلتقط الإشعاع الحراري المنبعث من سطح الخرسانة ويحوّله إلى قراءة رقمية فورية، مما يتيح توثيق الحالة الحرارية الفعلية للعينة بدقة. كما تم تثبيت حساسات الإزاحة (LVDT) بما يتوافق مع المدى العملي للحساسات، مع الإشارة إلى أن مجال القياس يصل إلى ±30 إنش (±0.762 متر)، مما يسمح برصد الحركات الصغيرة والكبيرة ضمن نطاق الاختبار بشكل موثوق.



الشكل رقم (2) : نموذج توزع المستشعرات LVDT على الجوائز البيتونية المسلحة

3-2-3-مرحلة التحضير والصب:

حضرت الخلطة وصب سبع جوائز وفق النسب التالية للمتر المكعب كما هو موضح بالجدول (3) وغطيت بالخيش الرطب لأسبوعين، وتركت لأسبوعين لتجف في الهواء بدرجة حرارة المخبر.

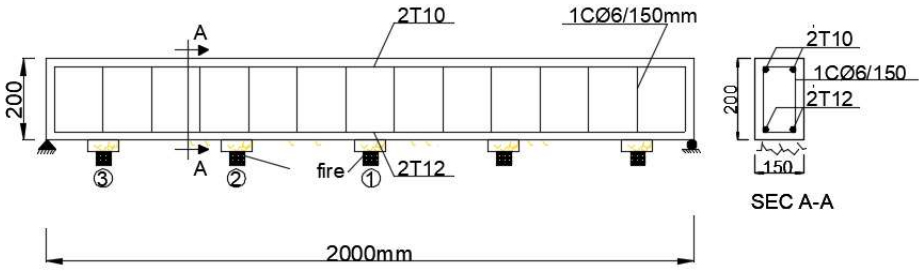
الجدول رقم (3): النسب لتحضير المتر المكعب من الخرسانة

الركام الطبيعي (كغ)	الرمل الطبيعي (كغ)	الملدن (%)	الإسمنت (كغ)	نسبة الماء للإسمنت (W/C)
1175.31	234.02	0.5	400	50%

الشكل رقم (3): الجوائز المصبوبة بمخبر كلية الهندسة المدنية–جامعة حمص

3-2-4-إجراءات الاختبار:

طليت الجوائز بالكلس المطفأ خفيف التركيز لتسهيل مراقبة الشقوق أثناء الاختبار قبل أسبوع من التجارب. وعرضت الجوائز والمكعبات للنار للفترة المطلوبة. يبين الشكل (4) تفاصيل الجوائز (فولاذ التسليح– الأبعاد).

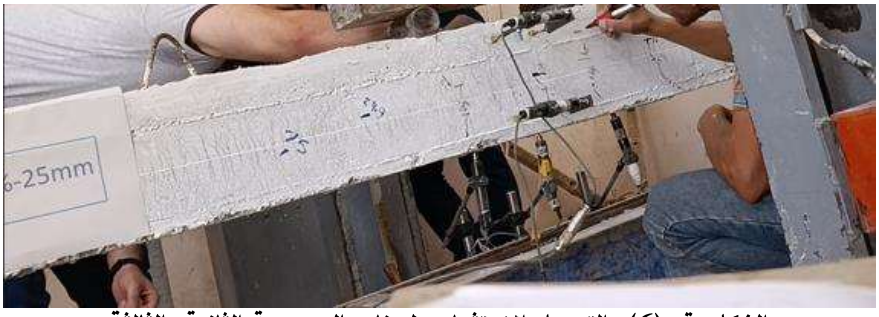


الشكل رقم (4): تفاصيل التسليح والابعاد للجوائز المختبرة

- تم بداية اختبار المجموعة الأولى كعينات مرجعية دون تطبيق الحرارة، كما هو موضح في الشكل (5). أما المجموعتان الثانية والثالثة فقد تم تحميلهما استثمارياً بنسبة 60% من حمولة الانهيار المستخلصة من المجموعة الأولى، كما هو موضح في الشكل (6)، ثم جرى تعريضهما للهب النار لمدة ساعة. وقد سُجلت درجات الحرارة كل خمس دقائق على كامل ارتفاع المقطع وفي عدة نقاط على طول الجائز كما هو موضح في الشكل (7).

بعد انتهاء التعريض الحراري، خضعت العينات للاختبار الميكانيكي مباشرة دون أي وسيلة تبريد، بهدف تقييم السلوك في الحالة الساخنة. وقد لوحظ أن نمط الانهيار لجميع العينات كان من نوع الانعطاف(Flexural Failure) ، مع تشكل مفصلات لدنة في منطقة العزم الأعظمي، وهو ما يتوافق مع طبيعة التحميل وظروف الاختبار.

الشكل رقم (5): شكل انهيار جائز مرجعي من المجموعة الأولى



الشكل رقم (6): التحميل الاستثماري لعينات المجموعة الثانية والثالثة

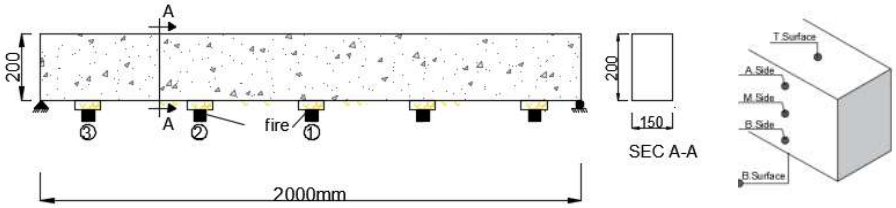
الشكل رقم (7): تعرض جوائز المجموعة الثانية والثالثة للحريق

ويبين الشكل (8) شكل التحميل والتشوهات المقاسة بتأثير الحمولات المطبقة. في منتصف الجائز باستخدام مقاييس الاتصال الكهربائية بدقة 0.001mm. وقيست الإجهادات على طول ارتفاع منتصف الجائز، وحددت الشقوق ووضعت علامات على الشقوق بتأثير الحمولات المطبقة.

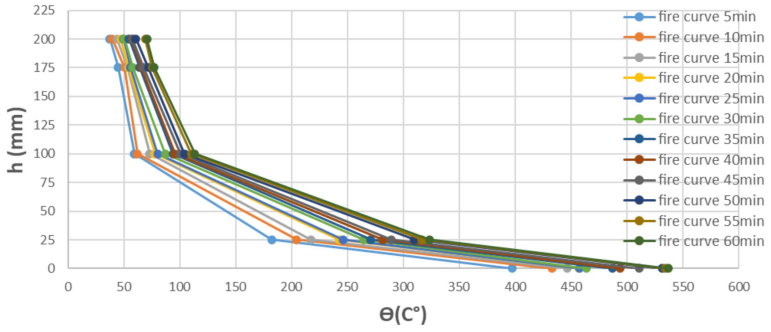
الشكل رقم (8): شكل التحميل للجوائز

4 – اختبار وتحليل النتائج:

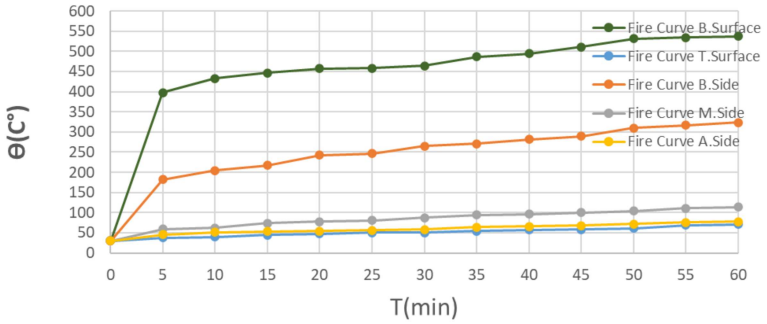
4-1-السجلات الأعظمية لمصادر اللهب للعلاقات ($T-\Theta_0$) و ($h-\Theta_0$) الخاصة بالجوائز:



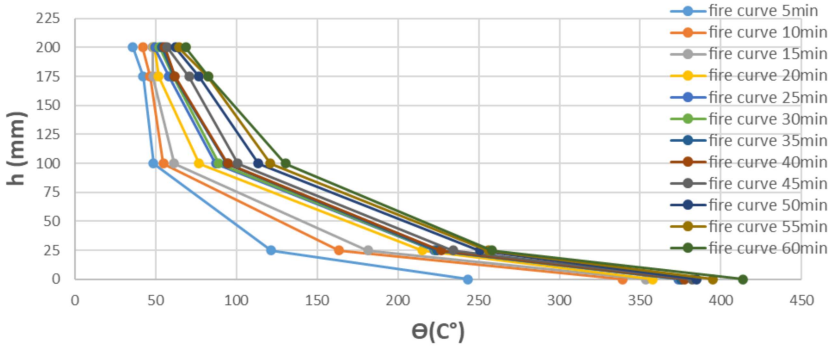
الشكل رقم (9): أماكن تطبيق نظام الحريق على الجوائز وأماكن قياس درجات الحرارة



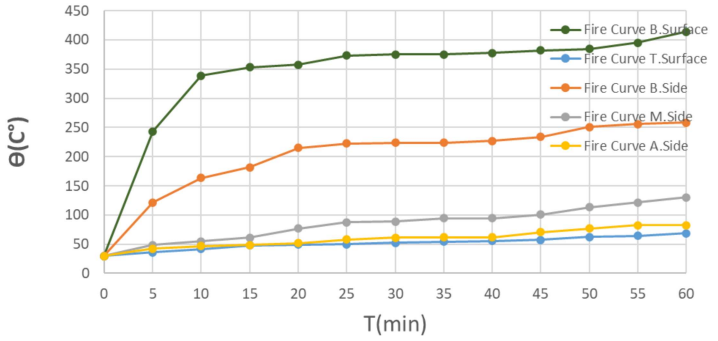
الشكل رقم (10): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الأول للعلاقات ($h-\Theta_0$) الخاصة بطبقة التغطية 25mm (المجموعة الثانية)



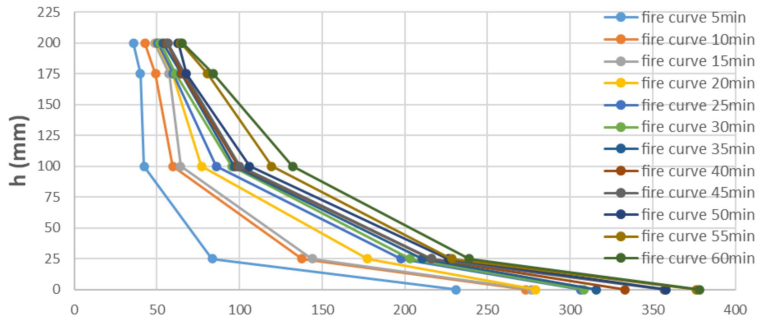
الشكل رقم(11): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الأول للعلاقات $(T-\Theta_0)$ الخاصة بطبقة التغطية 25mm (المجموعة الثانية)



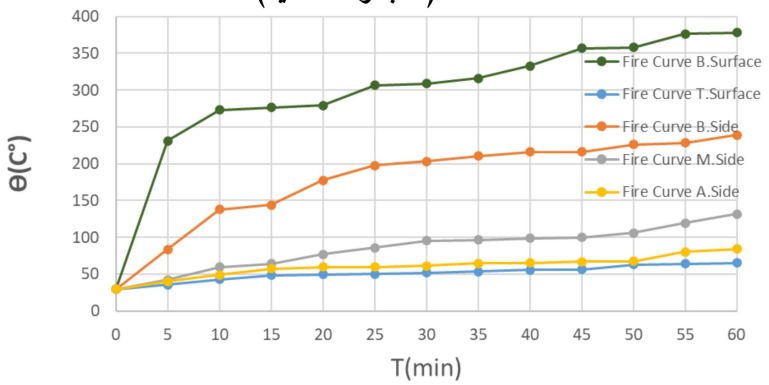
الشكل رقم (12): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الثاني للعلاقات $(h-\Theta_0)$ الخاصة بطبقة التغطية 25mm (المجموعة الثانية)



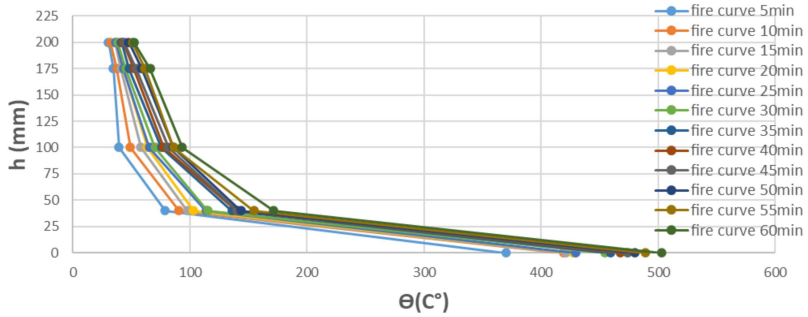
الشكل رقم(13): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الثاني للعلاقات $(T-\Theta_0)$ الخاصة بطبقة التغطية 25mm (المجموعة الثانية)



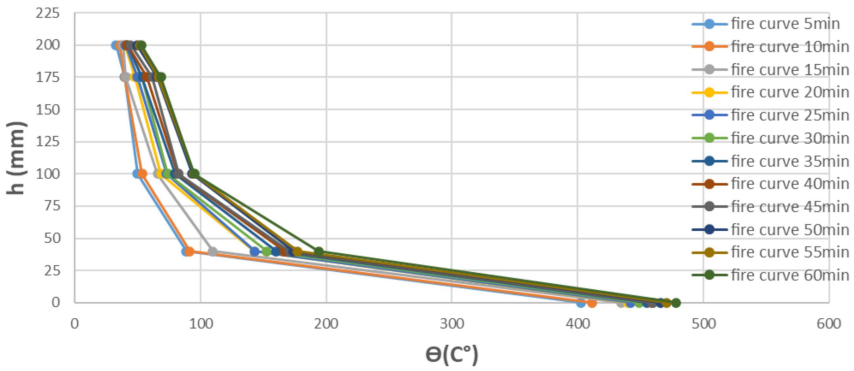
الشكل رقم (14): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الثالث للعلاقات ($h-\Theta_0$) الخاصة بطبقة التغطية 25mm (المجموعة الثانية)



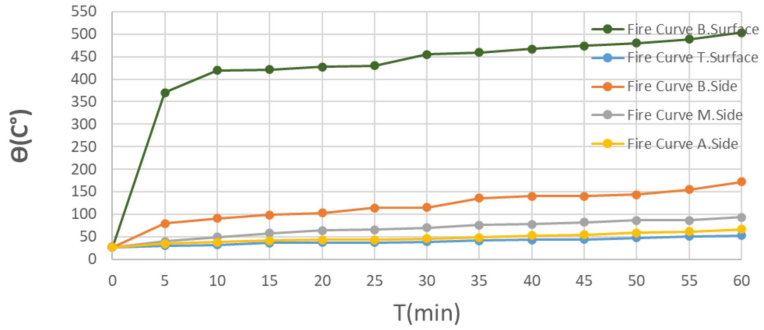
الشكل رقم (15): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الثالث للعلاقات ($T-\Theta_0$) الخاصة بطبقة التغطية 25mm (المجموعة الثانية)



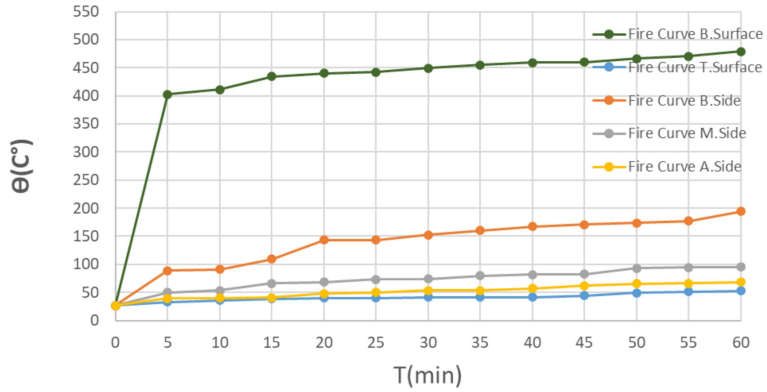
الشكل رقم (16): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الأول للعلاقات ($h-\Theta_0$) الخاصة بطبقة التغطية 40mm (المجموعة الثالثة)



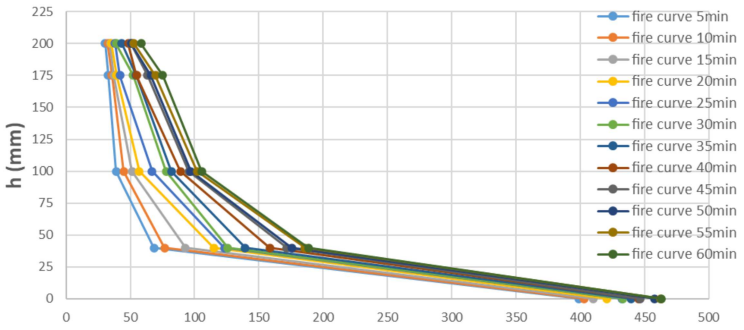
الشكل رقم (17): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الأول للعلاقات $(T-\Theta_0)$ الخاصة بطبقة التغطية 40mm (المجموعة الثالثة)



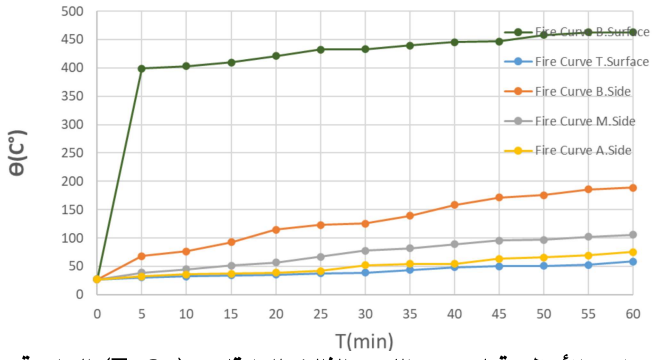
الشكل رقم(18) : السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الثاني للعلاقات $(h-\Theta_0)$ الخاصة بطبقة التغطية 40mm (المجموعة الثالثة)



ألشكل رقم (19): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الثاني للعلاقات $(T-\Theta_0)$ الخاصة بطبقة التغطية 40mm (المجموعة الثالثة)



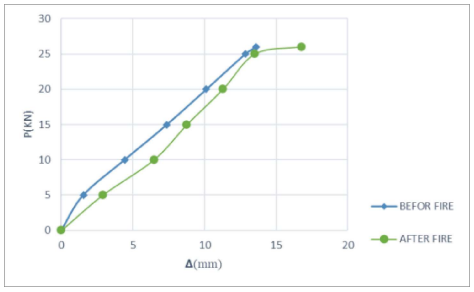
الشكل رقم (20): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الثالث للعلاقات ($h-\Theta_0$) الخاصة بطبقة التغطية 40mm (المجموعة الثالثة)



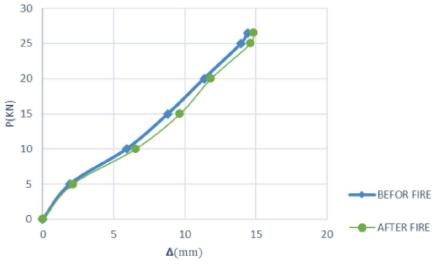
الشكل رقم (21): السجلات الأعظمية لمصدر اللهب الثالث للعلاقات ($T-\Theta_0$) الخاصة بطبقة التغطية 40mm (المجموعة الثالثة)

4-2- قيم منحني قوة–انتقال (P،Δ) في مرحلة الاستثمار قبل وبعد الحريق:

- الأشكال التالية توضح قيم منحني قوة–انتقال (P،Δ) لعينات المجموعتين الثانية والثالثة نتيجة التحميل الاستثماري قبل التعرض للهب النار وبعده:



الشكل رقم (22): منحني قوة–انتقال (Δ، P) لوسطي عينات المجموعة الثانية نتيجة التحميل الاستثماري قبل التعرض للهب النار وبعده



الشكل رقم(23): منحني قوة–انتقال (Δ، P) لوسطي عينات المجموعة الثالثة نتيجة التحميل الاستثماري قبل التعرض للهب النار وبعده

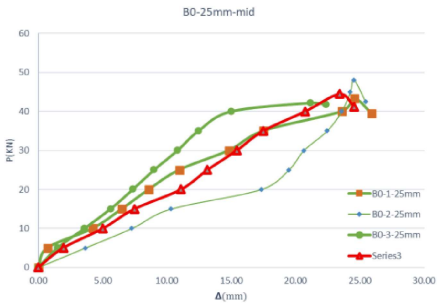
4-3- قيم منحني قوة–انتقال (P،Δ) حتى الانهيار:

يُظهر الجدول (4) القيم التجريبية لحمولات الانهيار والسهم الموافق لكل عينة من المجموعات الثلاث.

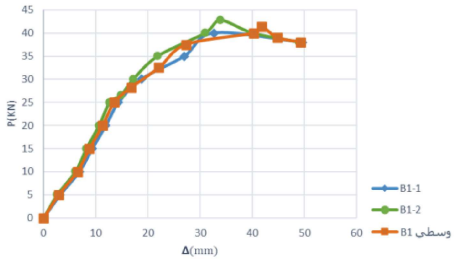
الجدول رقم (4): حمولات الانهيار والسهم الأقصى للجوائز قبل وبعد الحريق

تعرض الجائز للحريق	عدد العينات	طبقة التغطية	رمز الجائز	Pmax(Kn)	Δmax(mm)
بدون حريق	3	25	B1	44.51	24.57
مع حريق	2	25	B2	41.375	49.302
مع حريق	2	40	B3	43.4	26.545

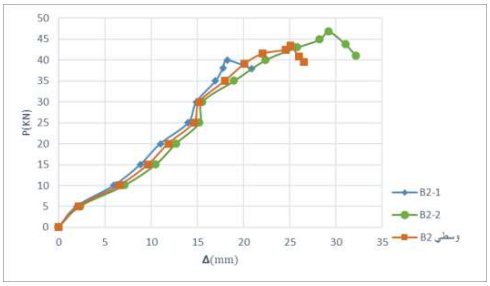
- الأشكال التالية توضح قيم منحني قوة–انتقال (Δ، P) لعينات المجموعة الأولى المرجعية بدون حريق والمجموعتين الثانية والثالثة نتيجة التحميل النهائي بعد التعرض للهب النار:



الشكل رقم (24): منحني قوة–انتقال (Δ، P) لعينات المجموعة الأولى (B0) المرجعية نتيجة التحميل



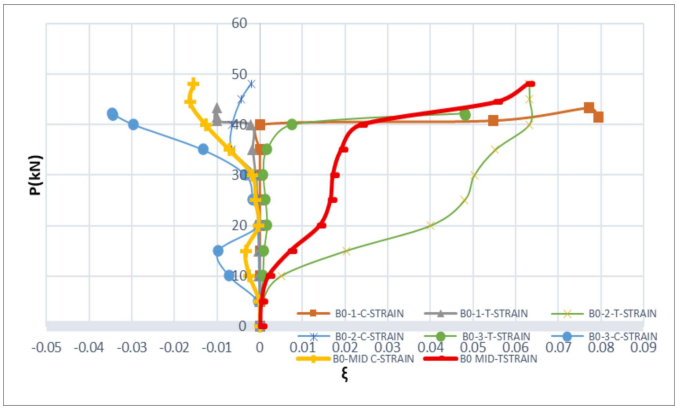
الشكل رقم(25): منحني قوة–انتقال (Δ، P) لعينات المجموعة الثانية (B1) نتيجة التحميل بعد التعرض للهب النار



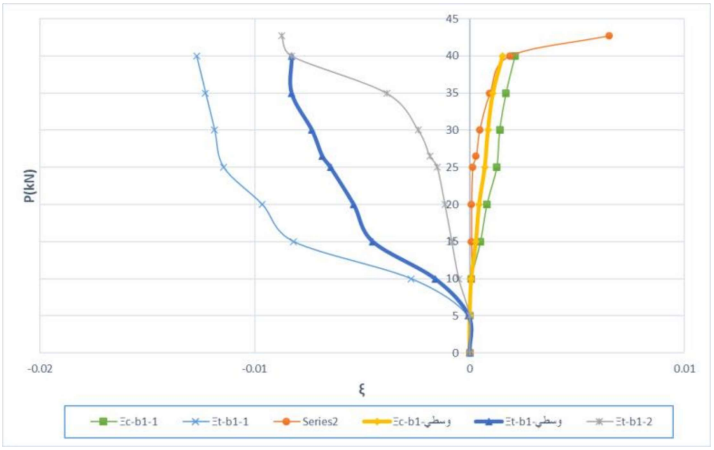
الشكل رقم (26) منحني قوة–انتقال (Δ، P) لعينات المجموعة الثالثة (B2) نتيجة التحميل بعد التعرض للهب النار

4-4- قيم منحني قوة-تشوه (P،ξ) حتى الانهيار بعد عملية الحريق:

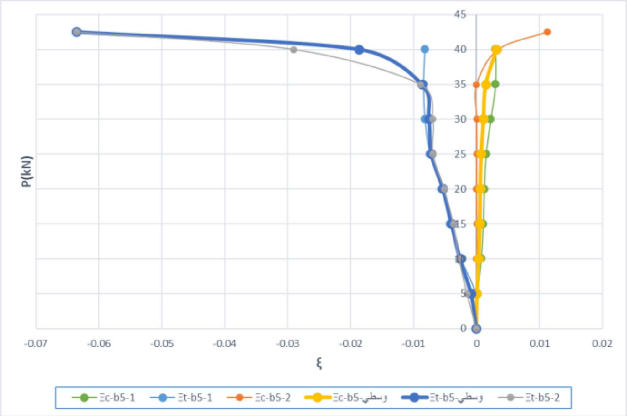
- الأشكال التالية(26-27-28) توضح قيم منحني قوة-تشوه (ξ، P) لعينات المجموعة الأولى المرجعية بدون حريق والمجموعتين الثانية والثالثة نتيجة التحميل النهائي بعد التعرض للهب النار:



الشكل رقم (27): منحني قوة-تشوه (ξ، P) لعينات المجموعة الأولى (B0) المرجعية نتيجة التحميل



الشكل رقم (28): منحني قوة-تشوه (ξ، P) لعينات المجموعة الثانية (B1) نتيجة التحميل بعد التعرض للهب النار



الشكل رقم (29): منحني قوة–تشوه (ξ، P) لعينات المجموعة الثالثة (B2) نتيجة التحميل بعد التعرض للهب النار

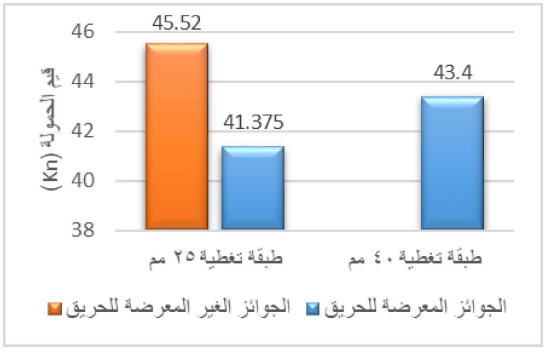
4-5-مناقشة النتائج

4-5-1- تأثير الحريق على حمولة الانهيار:

نلاحظ أن الجوائز المعرضة للحريق تسجل انخفاضًا في حمولة الانهيار مقارنة بتلك غير المعرضة. فعند طبقة تغطية بسماكة 25mm، انخفضت القوة من (45.52 KN) إلى (41.375 Kn)، أي بنسبة تقارب 9.1% هذا الانخفاض يعكس تأثر الخصائص الإنشائية للجوائز بفعل درجات الحرارة المرتفعة، مما قد يحدّ من قدرتها على تحمل الأحمال في ظروف الطوارئ

4-5-2- تأثير سماكة طبقة التغطية على حمولة الانهيار:

عند زيادة طبقة تغطية إلى سماكة 40mm مما تؤثر على الارتفاع الفعال للمقطع وبالتالي على قدرة التحمل، حيث سُجلت حمولة الانهيار لوسطي قيم جوائز المجموعة الأولى المعرضة للحريق بقيمة 43.4 Kn ، وهي أعلى من نظيرتها لوسطي قيم جوائز المجموعة الثانية ذات السماكة 25mm بمقدار 2.025 Kn. هذا يعادل زيادة نسبية تقارب 4.9%، مما يشير إلى أن زيادة سماكة طبقة التغطية قد ساهمت في تحسين مقاومة الجائز للانهيار تحت تأثير الحريق.



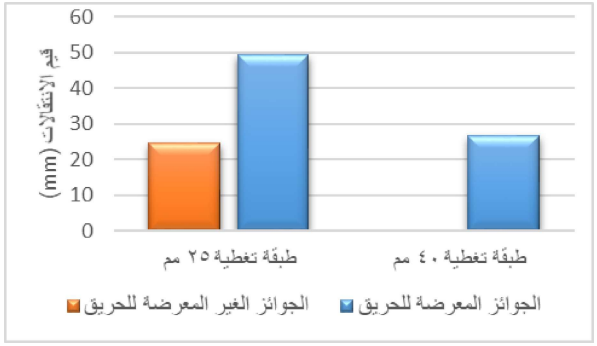
الشكل رقم (30): قيم حمولة الانهيار للجوائز المختبرة

4-5-3- تأثير الحريق على قيمة الانتقال:

- سجلت الطبقة ذات السماكة 25mm زيادة كبيرة في كمية الانتقال عند التعرض للحريق، حيث ارتفعت من 24.57mm إلى 49.302mm، أي بنسبة تقارب 100.7%. هذا يشير إلى أن الحريق أدى إلى ضعف في البنية الداخلية للجوائز، مما سمح بقيم انتقالات بشكل أكبر.

4-5-4- تأثير سماكة طبقة التغطية قيم الانتقالات:

عند طبقة تغطية بسماكة 25mm ، سُجلت قيمة الانتقالات لوسطي قيم جوائز المجموعة الأولى المعرضة للحريق بقيمة 49.302، وهي أعلى من نظيرتها لوسطي قيم جوائز المجموعة الثانية ذات السماكة 40mm بمقدار 22.757mm. هذا يعادل زيادة نسبية بقيم الانتقالات تقارب 85.73%، مما يشير إلى أن زيادة سماكة طبقة التغطية قد ساهمت في زيادة الانتقالات للجوائز المعرضة للحريق.



الشكل رقم (31): قيم الانتقالات للجوائز المختبرة

4-5-5-مقارنة النتائج التجريبية مع متطلبات الكود الأوروبي EN 1992-1-2 :

أظهرت النتائج أن الجوائز ذات سماكة تغطية 40mm حافظت على خصائص ميكانيكية أفضل بعد التعرض للحريق مقارنةً بالجوائز ذات تغطية 25mm.

هذا يتوافق مع متطلبات الكود الأوروبي EN 1992-1-2 ، الذي يوصي بزيادة سماكة التغطية لتحقيق مقاومة حريق أعلى، حيث أن التغطية تعمل كحاجز حراري يبطئ انتقال الحرارة إلى التسليح.

- يُعد عدد العينات في هذه الدراسة محدودًا (عينتان لكل مجموعة)، وهو عدد لا يسمح بإجراء تحليل إحصائي كامل أو استخلاص علاقات كمية دقيقة بين المتغيرات. وقد فُرض هذا القيد بسبب الإمكانات المخبرية المتاحة وكلفة تنفيذ

العينات. لذلك تُعد النتائج مؤشّرات تجريبية أولية، ويُوصى بزيادة عدد العينات إلى ثلاث عينات على الأقل لكل مجموعة في الدراسات المستقبلية لضمان موثوقية أعلى وإمكانية إجراء تحليل إحصائي شامل.

5- النتائج والتوصيات:

5-1-النتائج المستخرجة من البحث:

1. - يُلاحظ تغير في الخواص الفيزيائية والتركيب الجزيئي لمادة البيتون عند تعرضها للهب النار المباشر، يتمثل ذلك بظاهرة نتح المياه من داخل العنصر، وما يرافقها من أثر مستمر على سطحه الخارجي.
2. يؤدي التعرض للحرارة المباشرة إلى تشكل شقوق حرارية دقيقة على سطح العينة، نتيجة للإجهادات الحرارية الإضافية المتولدة ضمن المقطع البيتوني، مما يساهم في توسّع عرض الشقوق الاستثمارية الموجودة مسبقاً.
3. انخفاض في قدرة التحمل على الانعطاف للجوائز البيتونية المسلحة ذات سماكة طبقة تغطية 25mm بنسبة 9.1% بعد تعرضها للحريق.
4. الزيادة بسماكة طبقة التغطية من 25mm إلى 40mm رفعت حمولة الانهيار بنسبة 4.9% بعد الحريق.
5. الانتقالات تضاعفت بنسبة 100.7% بعد الحريق لعناصر بغطاء خرساني 25mm، مما يدل على ضعف البنية الداخلية.
6. الزيادة بسماكة طبقة التغطية من 25mm إلى 40mm خفّضت الانتقالات بعد الحريق بنسبة 85.73%.

5-2-التوصيات:

1. تحليل تأثير أنواع مختلفة من الخرسانة: يُوصى بدراسة تأثير الحريق على خرسانة ذات إضافات معدّلة أو مقاومة حرارية، ومقارنتها بالخرسانة التقليدية.
2. تقييم الأداء طويل الأمد بعد الحريق: يُنصح بإجراء اختبارات لاحقة للعناصر المتعرضة للحريق لتقييم التغيرات الزمنية في الخواص الميكانيكية والفيزيائية.
3. دراسة تأثير التسلّح وتوزيعه: يُستحسن تحليل تأثير توزيع قضبان التسليح وقطرها في مقاومة الجوائز للانهيار تحت تأثير الحريق.
4. يُوصى باعتماد سماكة تغطية لا تقل عن 40mm في العناصر المعرضة لاحتمال الحريق، تماشياً مع متطلبات الكود الأوروبي EN 1992-1-2 لمقاومة حريق لمدة ساعة واحدة، وذلك لضمان حماية كافية للتسليح وتقليل فقدان المقاومة.

6-المراجع المستخدمة في البحث:

1. Tawashi, A. “Structural Performance of Self-Compacting Reinforced Concrete Beams (SCC) Subjected to Fire Flame,” Master’s thesis, Homs University, 2023.
2. - Gales, T. Parker, D. Cree, and M. Green, “Fire performance of sustainable recycled concrete aggregates: Mechanical properties at elevated temperatures and current research needs,” Materials and Structures, accepted May 18, 2015

3. - European Committee for Standardization (CEN), EN 1992-1-2: Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004.
4. Sanjayan G., Stocks , L.J. Spalling of high strength silica fume concrete in fire. ACI Materials Journal , V. 90, No. 2 , March – April 1993, pp. 170-173.
5. Shirley, S. T. , Burg, R.G. and Fiorato, A. E., Fire Endurance of high strength concrete slabs. ACI Materials Journal, V. 85, No. 2 , March – April 1988, pp. 102-108.
6. Kodur, V. K. R., & Banerji, S. (2024). Comparative Fire Behavior of Reinforced Concrete Beams Made of Different Concrete Strengths. *Fire Technology, 60*, 3117–3146. https://doi.org/10.1007/s10694-023-01375-x
7. **Elshorbagy, M., Abdel-Mooty, M., & others. (2020).** The coupled thermal-structural response of RC beams during fire events based on nonlinear numerical simulation. *Engineering Failure Analysis, 109*, 104297.
8. **Alis, B., Yazici, C., & Ozkal, F. M. (2022).** Investigation of Fire Effects on Reinforced Concrete Members via Finite Element Analysis. *ACS Omega, 7*, 26881–26893.
9. **Naser, M. Z., et al. (2022).** Enhancing Fire Resistance of Reinforced Concrete Beams through Sacrificial Reinforcement. *ResearchGate preprint.*
10. **Liu, C., Wu, X., & Du, J. (2026).** Fire Resistance of Steel-Reinforced Concrete Columns: A Review of Ordinary to Ultra-High Performance Concrete. *Buildings, 16(1)*, 24.
11. **Zhang, H., & Kodur, V. (2021).** Modeling the Fire Resistance of Reinforced Concrete Beams Exposed to Standard Fire. *Fire Safety Journal, 122*, 103324.