دراسة سلوك المنشآت الفولاذية والمركبة تحت تأثير الحرائق وطرق حمايتها

حنان نوري العكاري [1] ، سالمة علي ابوكيل[2]
كلية الهندسة - جامعة الجفارة ، ليبيا
كلية الهندسة،جامعة طرابلس، ليبيا
hananakkary@aju.edu.ly

- **الملخص**

تبرز هذه الدراسة سلوك الفولاذ الإنشائي تحت ظروف الحريق ، مع تحليل تأثير درجات الحرارة العالية على خصائصه الحرارية والميكانكية،حيث توصل البحث إلى أن ارتفاع درجات الحرارة يتسبب في انخفاض كبير في مقاومة الفولاذ ومعامل المرونة ، مما يؤدي إلى ضعف قدرته على التحمل وانهيار الهيكل في حالات الحريق الشديد.أظهرت النتائج أن الطرق التقليدية للحماية، مثل الطلاءات العاكسة والعوازل،فعالة في تقليل الضرر وتأخير فقدان الخصائص الهيكلية، فيما أن الحلول الحديثة تساهم في تعزيزمقاومته وتحسين أدائه أثناء الطوارئ. كما أكد البحث على أهمية إدارة المخاطر وتصميم هياكل مقاومة للحريق لضمان سلامة الأرواح والممتلكات . استناداً إلى النماذج التجريبية والنماذج الرقمية التي أوصت الدراسة بتطوير تقنيات وقائية متكاملة لزيادة مقاومة الفولاذ للتعرض الطويل للحرارة، مع التركيز على تحقيق استدامة ومرونة عالية في المنشآت الهيكلية.

الكلمات المفتاحية: الفولاذ، الحريق، الخواص، الحماية.

A Study of the Behavior of Steel and Composite Structures under Fire Influence and Methods of Protecting Them

Hanan Nouri Al-Akkary [1], Salma Ali Abukil [2]
Faculty of Engineering,Al-Jafara University, Libya
Faculty of Engineering, University of Tripoli, Libya
hananakkary@aju.edu.ly

- **Abstract**

This study highlights the behavior of structural steel under fire conditions, analyzing the impact of temperatures on its mechanical and thermal properties. The research found that elevated temperatures significantly reduce steel's strength and modulus of elasticity, leading to compromised load-bearing capacity and potential structural failure in severe fires. The results demonstrate that traditional protective measures, such as reflective coatings and insulation, effectively minimize damage and delay the loss of structural integrity. Modern solutions further enhance steel's fire resistance and improve its performance during emergencies. The study emphasizes risk management and the design of fire-resistant structures to ensure the safety of occupants and property. Based on experimental and numerical models, the finding recommend the development of integrated protective technologies that increase the steel's resilience to prolonged heat exposure, fostering sustainability and flexibility in structural applications.

Keywords: Steel, fire, properties, protection.

المقدمة:

يُعد الفولاذ من المواد الأساسية التي تستخدم في تشييد الهياكل الإنشائية، لما يمتاز به من خصائص ميكانيكية عالية من حيث القوة والمتانة، مما يجعله خيارًا مثاليًا لبناء المنشآت ذات الأحمال الثقيلة والمعمارية المعقدة [1] . إلا أن تعرض هذه المواد لمخاطر الحريق يهدد سلامة واستقرار المباني، حيث إن ارتفاع درجات الحرارة يؤثر على خصائص الفولاذ، ويؤدي إلى تدهور سلوكه من حيث التشوهات وفقدان المقاومة، وبالتالي إمكانية انهيار الهيكل بشكل كارثي [2].

نظراً لأهمية توفير بيئة بناء آمنة ومستدامة، برزت الحاجة إلى تطوير أساليب وتقنيات حديثة لحماية هياكل الفولاذ من الحرائق، والتي تضمن تقليل الضرر وتأخير وقت الانهيار، وصولاً إلى منح الأفراد فرصة للهروب وتسهيل عمليات الإخلاء والإنقاذ [3]. تتنوع أساليب الحماية المستخدمة حالياً بين العزل الحراري، والتغطيات الواقية، وطرق التبريد المبتكرة، حيث أصبح الاعتماد على التقنيات الحديثة والكفاءات العلمية ضرورة ملحة في مجال تصميم أنظمة حماية الفولاذ من الحرائق [4] ، تتضمن الدراسة الحالية استعراضًا شاملاً للخصائص الحرارية والميكانيكية للفولاذ، مع تحليل استراتيجيات الحماية التقليدية والحديثة، مع التركيز على فعالية كل منها استنادًا إلى الأدلة العلمية المحدثة. كما تسلط الدراسة الضوء على التحديات التي تواجه تطبيق أنظمة الحماية في الظروف الحقيقية، وتُقترح حلول تتوافق مع معايير السلامة العالمية، بهدف تعزيز تصميم منشآت أكثر أمانًا ومرونة في مواجهة مخاطر الحرائق.

DOI: **10.5281/zenodo.17903269**

منهجية البحث:

تعتمد منهجية الورقة البحثية علي التعريف بالخواص الحرارية والميكانيكة للفولاذ وعلى اتباع المدخل النظري لمفردات البحث والمنهج التحليلي بالإستفادة من المراجع والدراسات المتوفرة في مجال البحث.

- **مشكلة البحث:**

تسليط الضوء على الطرق المتبعة لحماية الهياكل الفولاذية ،وقبل الخوض في معرفة طرق الحماية، يجب أن تفهم جيداً نقاط ضعف الفولاذ في وجود الحرارة واللهب. فليس من السهل تجاهل طرق حماية الفولاذ من الحرائق فبالرغم من متانته وصلابته، فإن الفولاذ البنيوي عرضة للحرارة الشديدة التي تولدها الحرائق ويرجع هذا الضعف إلى عدم قدرة الفولاذ على الحفاظ على سلامته البنيوية في درجات الحرارة الشديدة ، وعلى عكس المواد مثل الخشب، التي تحترق بشكل واضح، قد يبدو الفولاذ كما هو دون تغيير ولكنه قد يضعف بشكل كبير، مما يؤدي إلى انهيار هيكلي محتمل فيما بعد.

- **أهداف البحث:**

إن الهدف الرئيسي للبحث هو أن نفهم نقاط ضعف الفولاذ في وجود الحرارة واللهب.من خلال التعريف بخواصه ودراسة سلوكه تحت تأثير الحرارة العالية وبالتالي استعراض طرق الحماية الممكنة فإذا ظل الفولاذ غير محمي، فإنه سيبدأ في فقدان قدرته على تحمل الحمل عندما تصل درجة الحرارة إلى حوالي 400 درجة مئوية ،إذا كان الحريق شديدًا ومستمرًا، فإن الفولاذ الغير المحمي سوف يتشوه وينحني بسبب فقدانه للخواص الميكانيكية. وبالتالي، هناك حاجة لحماية الفولاذ الهيكلي من الحريق من خلال تطوير أنظمة مقاومة للحريق ، مما يسمح بزيادة وقت الإخلاء وبالتالي انقاذ أكبر مايمكن انقاذه من أرواح وممتلكات.

- **أهمية البحث:**

تكمن أهمية البحث في أن استخدام الفولاذ داخل المنشآت يجب أن يكون مصممًا لتحمل آثار الحريق. من أجل سلامة الأرواح وحماية الممتلكات، يجب أن يضمن هذا التصميم عدم وجود تهديد إضافي، ناتج عن الانهيار المحتمل للهيكل الفولاذي، إما للركاب الهاربين أو رجال الإطفاء. بالإضافة إلى ذلك، لا ينبغي أن يحدث أي ضرر غير متناسب للمبنى أثناء الحريق. من خلال طرق الحماية التي سيتم تعريفها والتي يتمحور حولها البحث حيث أن مستوى مقاومة الحريق الذي يتطلبه الهيكل من حيث الوقت لابد أن يدرج في لوائح البناء.

- ***خواص الفولاذ :***

الخواص الأساسية التي تؤثر على الفولاذ هي ارتفاع الحرارة وتوزيعها على العنصر والموصلية الحرارية له والحرارة النوعية والكثافة، والخواص الميكانيكية المؤثرة على سلوك العنصر الإنشائي للحريق هي المقاومة ومعامل المرونة ومعامل التمدد الحراري والزحف عند درجات الحرارة المرتفعة. فمقاومة الخضوع والمقاومة القصوى تنقص مع الحرارة وكذا معامل المرونة، فإذا كان الفولاذ عند درجة حرارة 550 C° فإن المقاومة الباقية تبلغ نصف قيمة المقاومة عند درجات الحرارة البيئية، وكما هو في الحال مع المقاومة فإن معامل المرونة ينقص إلى قيمة النصف تقريباً إذا كان الفولاذ عند درجة 550 C° عنه عند درجات الحرارة البيئية. بالإضافة إلى ذلك فإن الفولاذ يتمدد بزيادة درجة الحرارة وأن معامل التمدد الفولاذ الهيكلي تقريباً $(11\times10^{-6}\,mm/mm-c^{\circ})$ ، وبذلك فإن عنصر فولاذي بطول 20 م وغير مقيد يواجه زيادة في درجات الحرارة حتى 500 C° سيتمدد تقريباً 110 مم. وتكون درجة الانصهار للفولاذ تقريباً 1400 C°، وعلى أي حال فإنها تتفاوت من مكون لآخر حسب السبيكة الفولاذية المستعملة [5].

إن القيمة القياسية لدرجة الحرارة الحرجة (550) لاتعني الإنهيار عند هذا الحد مطلقا، بل هي قيمة مصممة على نسبة تحميل معينة للعنصر.لذا، فإن درجة الحرارة الحرجة الفعلية تعتمد بشكل مباشر على مستوى استغلال سعة العنصر الإنشائي (Load utilization of Structural member Capacity ratio)

- **درجة حرارة الفولاذ :**

القيمة القياسية لدرجة الحرارة الحرجة (550 درجة مئوية) ليست عتبة للانهيار المطلق، بل هي مؤشر ارتباطي (Correlative Benchmark)، والقيمة الفعلية للانهيار تعتمد بشكل أساسي على نسبة استغلال سعة العنصر الإنشائي (Load Utilization Ratio).

1. **التعريف الهندسي لدرجة الحرارة الحرجة** (Critical Temperatur)

درجة الحرارة الحرجة(T_{CR}) تعرف بأنها درجة الحرارة التي يفقد عندها العنصر الإنشائي الفولاذي قدرته على تحمل الأحمال المطبقة عليه عند مدة زمنية محددة [8].

إذا الفشل لا يحدث نتيجة لانصهار الفولاذ نفسه، بل بسبب التدهور السريع في الخصائص الميكانيكية للمواد مع ارتفاع الحرارة، وخصوصاً عند:

-الانخفاض الكبير في مقاومة الخضوع - (Yield Strength, f_y)

-الإنخفاض في معامل المرونة.(E, Modulus of Elasticity,)

2-الأساس التصميمي للقيمة القياسية (550 درجة مئوية) القيمة القياسية المعتمدة في معظم الأكواد التصميمية مثل الكود الأوروبي-1 EN 1993 (Eurocode 3) 2، والتي تبلغ 550درجة مئوية، هي قيمة مرجعية محافظة (Conservative Benchmark Value) [9].

تم تبنيها بناءً على فرضيات تصميمية محددة.

- عند هذه الدرجة، يفقد الفولاذ حوالي 40% إلى 50% من مقاومته الأصلية (عند درجة حرارة الغرفة 20 درجة مئوية،و [8]. تعتمد النماذج التصميمية التقليدية على افتراض أن التصميم يُنفَّذ لتحمل الأحمال التشغيلية اليومية بنسب استغلال تتراوح (عادة بين 0.5 و 0.6) من السعة القصوى[6]

3 - **العلاقة الديناميكية بين التحميل ودرجة الحرارة الحرجة الفعلية (Load Utilization Ratio)**

مفهوم الانهيار يرتبط بمساواة الإجهادات الداخلية الناتجة عن الأحمال المطبقة مع المقاومة المتدهورة للمادة عند درجات حرارة مرتفعة. العلاقة بين درجة الحرارة الحرجة الفعلية ونسبة استغلال السعة(μ)تُعد علاقة عكسية[7,10] والتي يُعبَّر عنها:

$$\mu = \frac{Appleid\ load}{Capacity\ at\ 20\ c^{\circ}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

تعتمد درجة الحرارة الحرجة الفعلية ($T_{CR,actuale}$) تتأثر مباشرة بنسبة استغلال السعة كالتالي- :

نسبة استغلال منخفضة($\mu << 1$) عند الأحمال الخفيفة جداً، يستطيع العنصر تحمل درجات حرارة تفوق بكثير 550 درجة مئوية، وقد تصل إلى 650 أو حتى 700درجة مئوية قبل فقدان قدرته على مقاومة الأحمال . [10]

نسبة استغلال مرتفعة ($\mu \approx 1$) إذا كانت الأحمال قريبة جداً من الطاقة القصوى للعنصر، فقد ينهار النظام عند حرارة أقل من 550 درجة مئوية، وربما تصل إلى 450 درجة مئوية فقط، حيث تتساوى المقاومة المتبقية مع الإجهادات المطبقة [7]

إن درجة الحرارة الحرجة ليست صفة فيزيائية ثابتة للمادة، بل متغير ديناميكي يعتمد على ظروف تحميل العنصر .القيمة القياسية 550درجة مئوية هي مؤشر تقريبي يعتمد على طرق تصميم مبسطة .لتقييم مقاومة الحريق بشكل أكثر دقة، تُستخدم أساليب تعتمد على الأداء (Performance-Based Structural Fire Engineering)، حيث يتم تحليل كل عنصر بناءً على نسبة استغلاله الفعلية لتحديد درجة الحرارة الحرجة والمدة الزمنية اللازمة للانهيار بدقة أعلى.

وبالتالي فإن درجة الحرارة الحرجة ترجع في أغلب الأحيان إلى سلامة العنصر المحمل بالكامل، وبالتالي فدرجة الحرارة الحرجة للعنصر لفولاذي

اتتفاوت حسب نوعه. ولقد صنفت درجة حرارة الفولاذ الحرجة حتى فترة قريبة (550 C°) للأعمدة كدرجة حرارة حرجة وأما الكمرات كانت (C° 620)، والتي صنفت كحد أعلى لدرجات الحرارة الفولاذية في الحريق. وقد وجد في اختبار (ASTME119) لعمود فولاذي (I) وعمود صندوقي محمي وغير محمي، أن النوع الأول يبقي لمدة 15-18 دقيقة بينما النوع الثاني يبقى لمدة 6-7 دقائق ثم تنهار العينة، بينما عندما تكون محمية فإنها تقاوم الحريق لمدة ساعتين[14] . فالفولاذ يفقد 40% من قوته في درجة حرارة الغرفة عندما تصل درجة حرارته إلى 550 C°، لهذا

DOI: 10.5281/zenodo.17903269

السبب تطبق الحماية لتقليل معدل التسخين للفولاذ حتى تبقى له مقاومة كافية وصلابةخلال زمن مقاومة الحريق [11,12].

- **حرارة الفولاذ المتوقعة** [13] :

معدل التسخين لمقطع يعتمد على شكل وحجم وموقع العنصر في المنشأ وسمك وطبيعة الحماية المطبقة عليه.ويتم تقدير حرارة العنصر الفولاذي باستخدام طريقة الجدولة وهي طريقة لتوقع درجات حرارة الفولاذ باستخدام مبادئ نظرية نقل الحرارة لتقدير الطاقة المحولة للفولاذ، وهناك صيغ مختلفة تستعمل تأثير الحماية على نسبة تسخين الفولاذ.

- **الخواص الحرارية للفولاذ:-**

أ- **الكثافة:-**

إن كثافة الفولاذ تبقى ثابتة مع الحرارة وتفرض أنها 7850 كجم/م3[14] .

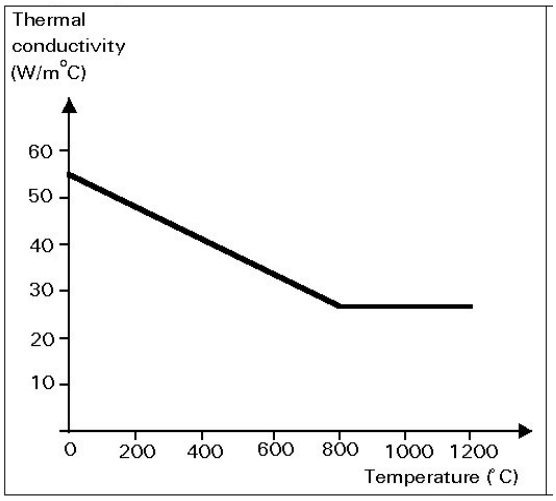
ب- **الموصلية الحرارية:-**

يعتمد التوصيل الحراري للفولاذ بشكل رئيسي على تركيبة المادة والمعالجة الحرارية، وينقص بزيادة درجة الحرارة. والتي تكون عالية للفولاذ بما يكفي للسماح بفرضية انتظام الحرارة في مقطع الحجم العادي للفولاذ. وطبقاً للكود الاوروبى فالموصلية الحرارية تحسب من المعادلة التالية :-

$$\lambda_a = 54 - 3.33.10^{-2}T \quad \left(\frac{W}{mk}\right) \qquad 20c^{\circ} < T < 800c^{\circ} \quad (2-a)$$

$$\lambda_a = 27 \qquad \left(\frac{W}{mk}\right) \qquad 800c^{\circ} < T < 1200c^{\circ} \quad (2-b)$$

إن الموصلية الحرارية للفولاذ لم تعرف بعد درجة حرارة 1200 C°، لأن أغلب العناصر الإنشائية الفولاذية لا تنجو بعد هذه الدرجة [16,15]، وكما هو موضح في الشكل (1).



الشكل (1) الموصلية الحرارية للفولاذ.[8]

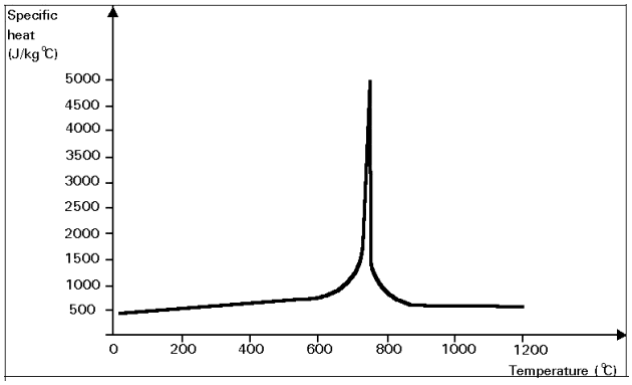
ج- **الحرارة النوعية :-**

تعتمد الحرارة النوعية على تركيبة الفولاذ، وهى تختلف مع الحرارة كما في الشكل (2). وتكون أقصى حرارة نوعية عند درجة حرارة 730° C ناتجة عن التغير المعدني، وطبقاً للكود الاوروبى يمكن أن تعرف الحرارة النوعية حسب المعادلات التالية[17]:-

$$c_p = 425 + 0.773.T - 1.69.10^{-3}.T + 2.22.10^{-6}.T^3$$

$$\begin{aligned} &20c^{\circ} < T < 600c^{\circ} \\ c_p &= 666 + 13002/(738 - T) \qquad 600c^{\circ} < T < 735c^{\circ} \\ c_p &= 545 + 17820/(T - 731) \qquad 735c^{\circ} < T < 900c^{\circ} \\ c_p &= 650 \qquad 900c^{\circ} < T < 1200c^{\circ} \qquad (3) \end{aligned}$$

في نماذج الحسابات البسيطة يمكن أن تؤخذ الحرارة النوعية للفولاذ ($600J/kg$) اعتماداً على حرارة الفولاذ والحرارة أعلى من 1200 C° يمكن أن تؤخذ الحرارة النوعية ($650J/kg$).



الشكل (2) الحرارة النوعية للفولاذ مع اختلاف درجة الحرارة [4].

د- **التمدد الحراري:-**

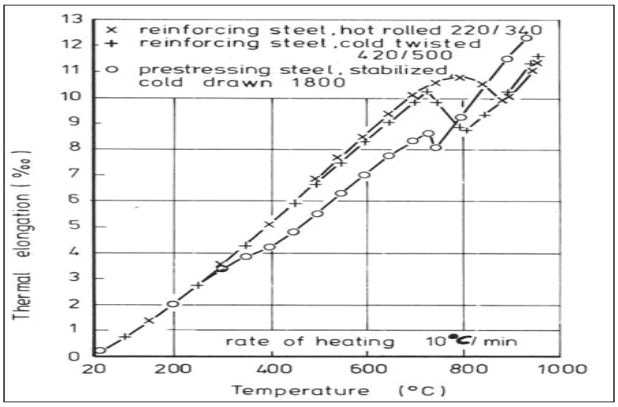
يعتمد التمدد الحراري لسبائك الفولاذ المنخفضة وذات الكربون المختلف على محتوى الكربون والمعالجة الحرارية .فالتمدد الحراري أثناء التسخين دالة بسيطة من درجة الحرارة ويمكن أن تحصل عليه مباشرة من الاختبارات، والشكل (3) يظهر العلاقة بين التمدد الحراري وحرارة أنواع مختلفة من فولاذ التسليح ، ومعامل التمدد الحراري ليس ثابتاً مع الحرارة ولكنه يزداد بعض الشئ مع زيادة الحرارة، والإطالة الحرارية للفولاذ طبقاً للكود الاوروبى من المعادلات التالية[15]:

$$\frac{\Delta L}{L_S} = (-2.416.10^{-4}) + (1.2.10^{-5}.T) + (0.4.10^{-8}T^2)$$

$$20c^{\circ} < T < 750c^{\circ}$$

$$\frac{\Delta L}{L_S} = 11.10^{-3} \qquad 750c^{\circ} < T < 860c^{\circ} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta L}{L_S} = (-6.2.10^{-3}) + (2.10^{-5}.T) \qquad T > 860c^{\circ}$$



الشكل (3) التمدد الحراري لأنواع مختلفة من الفولاذ.[11]

هـ- **الإطالة الحرارية :**

في نماذج الحسابات البسيطة يفرض أن الإطالة الحرارية لها علاقة ثابتة مع حرارة الفولاذ وهذه العلاقة هي[8]:-

$$\frac{\Delta L}{L} = 14X10^{-6}(T_S - 20) \qquad (5)$$

- **الخواص الميكانيكية للفولاذ** :-

1) الانفعال هو قياس إطالة العنصر نسبة إلى الطول الأصلي، والانفعال الكلى للفولاذ يمكن أن يحسب كمجموع لثلاث مركبات للانفعال مشابهة لمركبات الانفعال لدى الخرسانة، وفي مقطع الفولاذ تعتبر الحرارة خلال هذا المقطع منتظمة. وعلاقة الانفعال مع الحرارة معرفة كالتالي [17]:

DOI: 10.5281/zenodo.17903269

$$\varepsilon = \varepsilon_{tn}T + \varepsilon_{cr}\sigma T + \varepsilon_{cr}(\sigma, T, t) \quad (6)$$

حيث أن :-

ε = الانفعال الكلى.

ε_{th} = الانفعال الحراري.

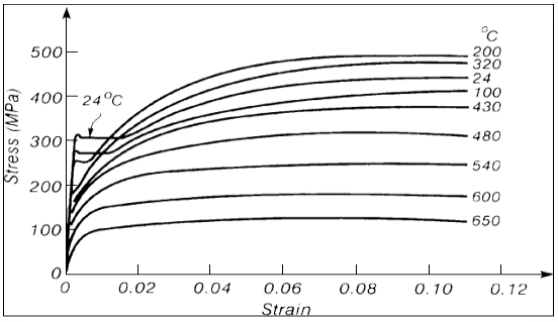
T = الحرارة.

ε_{σ} = الانفعال الناتج عن الإجهاد.

σ = الإجهاد.

ε_{cr} = انفعال الزحف.

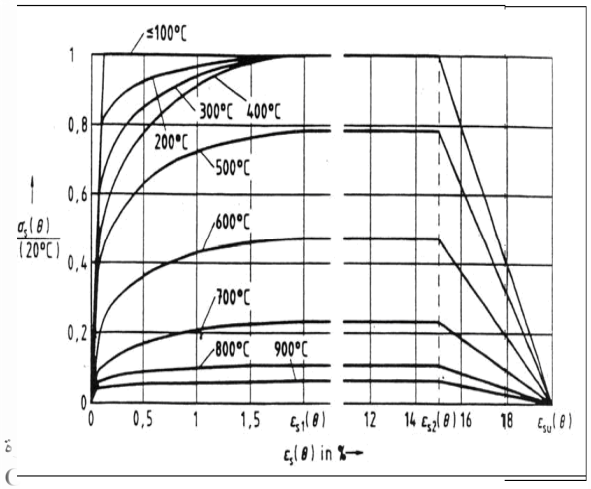
الشكل (4) يوضح منحنيات الإجهاد والانفعال لعناصر الفولاذ الإنشائية في درجات الحرارة المرتفعة، ويمكن أن يرى أن نقطة الخضـــوع لا يمكن أن تلاحظ مع ارتفاع درجة الحرارة، وتختفي في درجة حرارة حوالي 300° C.أما المقاومة القصوى فتزداد بعض الشيء عند درجات الحرارة المعتدلة قبل انخفاضها عندما ترتفع الحرارة.



الشكل (4) علاقة الإجهاد-الانفعال للفولاذ عند درجات الحرارة المرتفعة.[17]

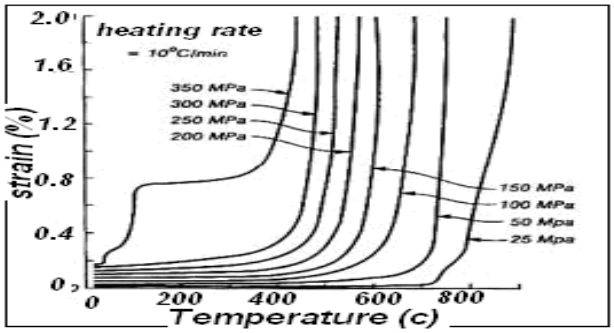
أ. علاقة الإجهاد والانفعال :

إن المقاومة القصوى للفولاذ تزداد في مدى درجات حرارة حوالي 180 C°- 370 C° وعند درجات الحرارة الأعلى فإن مقاومة الخضوع للفولاذ تهبط بثبات. إن منحنيات الإجهاد والانفعال للفولاذ (hot-rolled) عند درجات الحرارة المرتفعة موضحة في الشكل (5)، وهي تظهر أن إجهاد الخضوع أقل وضوحاً مع ارتفاع درجة الحرارة ويختفي في النهاية وأن إجهاد الخضوع يزداد عند بداية ارتفاع الحرارة ثم يتناقص تدريجياً



الشكل (5) علاقة الإجهاد – الانفعال للفولاذ[15]

وهو يعتمد على درجة الحرارة ومستوى الإجهاد المطبق وكما في الشكل (6) فإن منحنى انفعال الزحف يصبح رأسياً غالباً، عندها إذا وصل العنصر الفولاذي إلى مستوى إجهاد معين في درجة حرارة معينة يفشل العنصر فشلاً منفلتاً (runaway). وبالتالي فانفعال الزحف ليس مشكلة في الحالات البيئية لكنه يصبح حاسماً جداً في درجات الحرارة الأعلى من 400 C°.



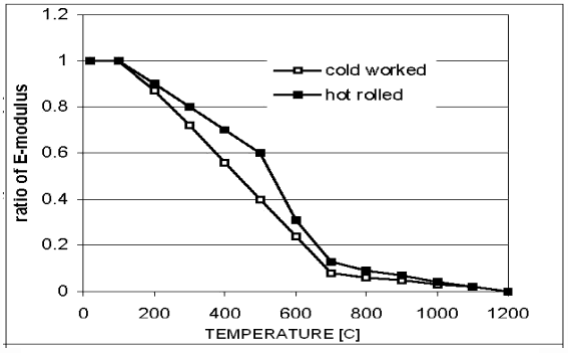
الشكل (6) منحنى انفعال الزحف للفولاذ [17] .

ج- **الانفعال الحراري**:-

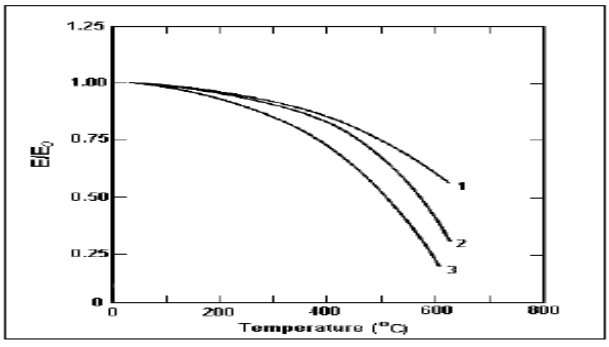
الانفعال الحراري هو إطالة المادة الناتج عن الحرارة وهو يشير غالباً إلى التمدد الحراري وهو مهم وخصوصاً في المنشآت الكبيرة.

1) معامل المرونة :-

هذا المعامل ينقص بزيادة الحرارة، وفى الشكل (7) تظهر العلاقة بين الحرارة ومعامل المرونة وذلك للفولاذ المصنع على الساخن وعلى البارد طبقاً للكود الاوروبى، وكذلك الشكل(8) يظهر انخفاض معامل المرونة لأنواع الفولاذ (الفولاذ الانشائى والفولاذ سابق الإجهاد و فولاذ التسليح)، ومن الواضح أنه بزيادة الحرارة فإن الفولاذ الإنشائي يميل لإبقاء مرونة أكثر من المنحنيين الآخرين خصوصاً في درجات الحرارة المرتفعة .والشكل (9) يظهر الانخفاض في معامل المرونة مقارنة مع الانخفاض في مقاومة الخضوع للفولاذ. وكذالك معامل التخفيض نسبة إلى القيمة الملائمة في الشروط البيئية لعلاقة الإجهاد الانفعال للفولاذ طبقا للكود الأوروبي، ويمكن في هذا المنحنى استخدام طريقة الزيادة الخطية بين درجات الحرارة الوسطى.

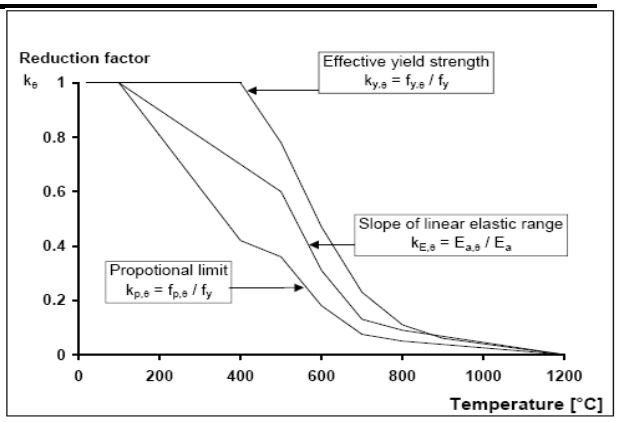


الشكل (7) معامل المرونة للفولاذ المجلفن على الساخن والبارد [15] .



الشكل (8) معامل المرونة للفولاذ 1 الإنشائي ، 2 للفولاذ سابق الشد، 3 لفولاذ التسليح.[17]

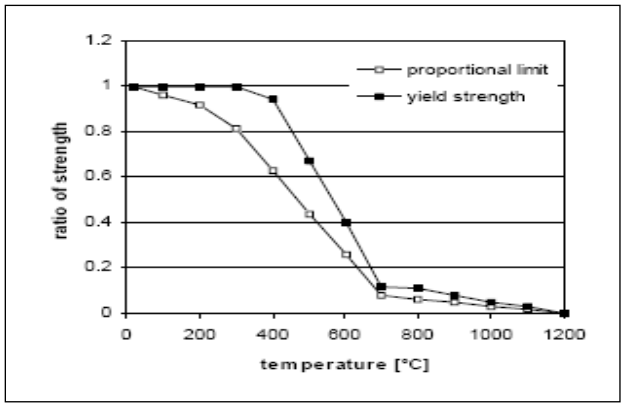
DOI: 10.5281/zenodo.17903269



الشكل (9) معامل التخفيض لكل من معامل المرونة ومقاومة الخضوع للفولاذ عند درجات الحرارة المرتفعة.[18]

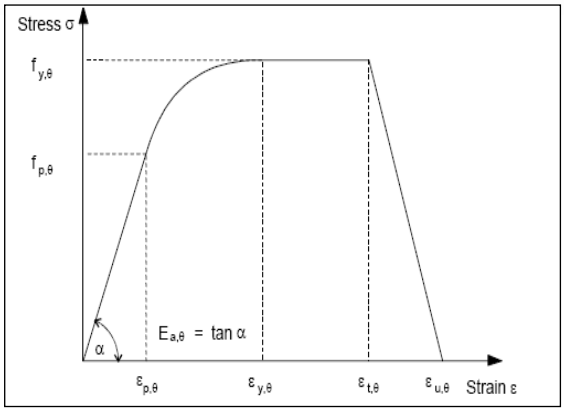
3) مقاومة الخضوع والمقاومة القصوى :-

أغلب الفولاذ لـه مقاومة خضـــوع جيدة جداً عند درجات الحرارة العادية ، وعلى أية حال فنقطة الخضـــوع تختفي في درجات الحرارة المرتفعة ، والشكل (10) يوضح التخفيض في المقاومة القصوى ومقاومة الخضوع للتسليح البارد، وحيث أن إجهاد الخضوع المخفض عند درجات الحرارة المرتفعة ليس واضـــحاً لذا تقترح البحوث المختلفة قيماً مختلفة وذلك لعدم وضوح تعريف مقاومة الخضوع[17].



الشكل (10) معامل التخفيض في مقاومة الفولاذ والحد النسبي في درجات الحرارة المرتفعة [15] .

إن علاقة الإجهاد والانفعال المطبقة على الفولاذ في حالة الضـــغط والشـــد تحســب بأســلوب تقريبي تأثير زحف درجات الحرارة العالية، فهذه العلاقة بين الإجهاد والانفعال الموصوفة في الكود الأوروبي يفترض أنه في درجة



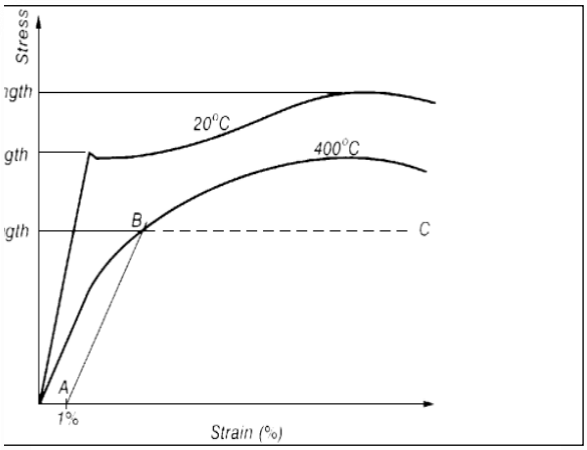
الشكل (11) علاقة الإجهاد –الانفعال للفولاذ طبقا للكود الأوروبي [18]

الحرارة العادية، فإن علاقة الإجهاد الانفعال تكون (bilinear)، والحد النسبي (Fp) والتي هي نقطة نهاية الجزء الخطى المرن من منحنى الإجهاد تكون مســـاوية لإجهاد الخضـــوع (Fy)، وهو أيضـــا يفترض عدم حدوث تصلب للانفعال.وأن عزم الخضوع الأول (My) يمكن أن يحسب كالتالي:

$$M_Y = F_P Z \quad \ldots\ldots (7)$$

حيث أن: S معامل المقطع اللدن .

وهناك قيمة تصـــحيحية 1% موصـــي بها لمقاومة الفولاذ المســـتخدمة في التصميم كما هو موضح في الشكل (12).



الشكل (12) معامل التصحيح في المقاومة للفولاذ[2].

إن الهدف الحديث لحماية المنشـــآت من الحريق قد تحول من مجرد تلبية متطلبات إلى تطبيق التصـــميم المعتمد على الأداء (Performance-based design)

- ***حماية الفولاذ من الحريق:-***

إن حماية الفولاذ يمكن أن تنجز بثلاث طرق وهي عزل العنصر بمادة الرذاذ أو التغطية بواسطة الألواح.أو بملء المقاطع المجوفة بالخرسانة أو بسائل لتشكيل مغسلة حرارية.

- **المواد التقليدية للحماية من الحريق :**

تضمنت المواد التقليدية للحماية من الحريق استخدام البلوكات الخرسانية أو الألواح الجبسية حتى أواخر السبعينات. فالخرسانة تمثل أغلب أشكال الحماية الشائعة من الحريق بالنسبة للفولاذ، ولكن من عيوبها الرئيسية التكلفة والزيادة في وزن المنشأ وطول الوقت الذي يؤخذ لتطبيقها في الموقع.

- **المواد الحديثة للحماية من الحريق :-**

تعزل مواد الحماية المنشأ عن درجات الحرارة العالية أثناء الحريق. ومواد العزل يمكن أن تصنف إلى مواد غير تفاعلية (الرشاشات والألواح)، أو مواد تفاعلية (كالطلاء الانتفاخي أو التورمي)، حيث أن الأعمدة عادة ما تحمى باستخدام الألواح التي تثبت جافة، أما الكمرات فتحمى بالمواد المرشوشة أكثر من غيرها.

- **تقنية حماية الفولاذ من الحريق :**

هناك تخفيض كبير في الخواص الميكانيكية للفولاذ في درجة حرارة 540 C°، حيث أن العناصـــر الفولاذية المفردة وغير المحمية التي أخضعت لاختبار حرارة قياسي، استطاعت البقاء بسلامة إنشائية لمدة 10-20 دقيقة فقط معتمدة على الكتلة وحجم العنصـــر الإنشـــائي. وهناك طرق عديدة للحد من ارتفاع درجة حرارة العناصـــر الفولاذية بما في ذلك طريقة العزل والطريقة السعوية (Capacitive).

أ- طريقة العزل :

وهي العزل بمواد عن طريق الرذاذ(رشـــاش) أو بالألواح أو تغطية السطح الخارجي للعنصر الفولاذي، وهناك تشكيلة من المواد والتي اســـتعملت للحماية بما في ذلك (الليف المعدني، مواد رش إســـمنتية، لوحة حائط جبســـية، الاســـبســـتوس، الطلاء التورمي، خرســـانة الاســـمنت البورتلاندي، والبلاط الخزفي). والعزل قد يرش مباشرة على العنصر كما

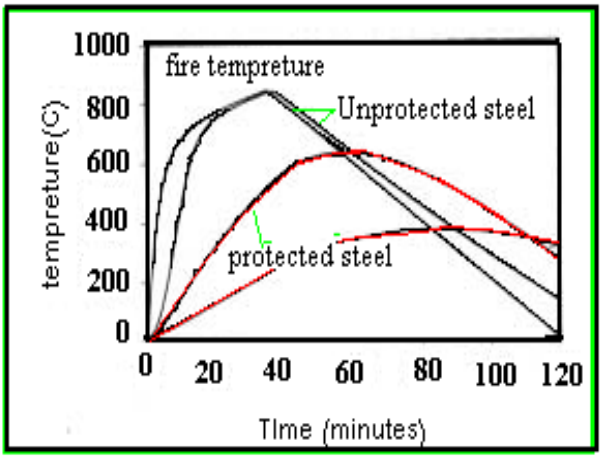
DOI: 10.5281/zenodo.17903269

في(الأعمدة والكمرات)، وبدلاً عن ذلك فالعزل قد يستعمل لتشكيل "غشاء" حول العنصر كما في حالة السقف المعلق وعلماً بأن بعض العينات فقط من السقف المعلق لها هذه القابلية.

ب- **الطريقة السعوية (capacitive):**-تستند هذه الطريقة على مبدأ استعمال مادة لها قدرة وقائية لامتصاص الحرارة، فتمتص المادة الحرارة بينما تدخل الفولاذ وتعمل كمغسلة حرارة (Sink)، والأمثلة الشائعة مثل الأعمدة الفولاذية المجوفة المملوءة بالخرسانة أو المملوءة بالماء [5].

- **طرق الحماية :**

الفولاذ ضعيف أثناء التعرض للحريق، ولكن المنشآت الفولاذية قد تنجو من الحريق بسبب إعادة توزيع الأحمال إلى الأجزاء المحيطة الأكثر برودة، ولكن الفشل الموضعي يمكن أن يكون كارثي بالنسبة لكامل المنشأ. فالفولاذ المحمي له درجة حرارة أقل إلى حد كبير ونسبة تسخين أبطأ من الفولاذ غير المحمى بالرغم من أن الفولاذ المحمى يحتاج لوقت أطول لكي يبرد. إن المنحنى العلوي في الشكل (13) هو حرارة حريق بارامتري تليه مباشرة حرارة الفولاذ غير المحمي، أما المنحنيان السفليان فيظهران حرارة الفولاذ المحمي مع سمك حماية 15، 50 ملم على التوالي.



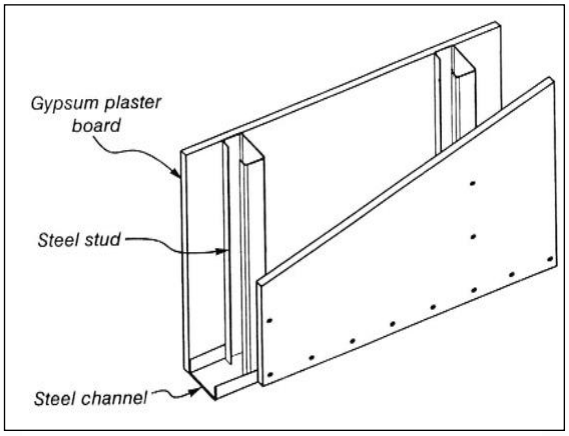
الشكل (13) حرارة الفولاذ غير المحمي والفولاذ المحمي.[13]

وهناك عدة أنواع من الحماية السالبة والتي لها استعمال واسع لحماية العناصر الفولاذية لتفادي زيادة سريعة في درجة حرارة الفولاذ وبعض هذه الطرق كالتالي:

أ. **نظام اللوحة (Board system):-**

يستعمل هذا النظام عموماً كمادة مبطنة لحائط المنشآت الإطارية ذات الفولاذ الخفيف، ومعظم هذه الألواح مصنوعة من سليكات الكالسيوم أو المونة الجبسية (Gypsum plaster). إن سليكات الكالسيوم تنتج في بعض البلدان فقط، لذا فهي باهظة الثمن في بلدان أخرى. وتصمم اللوحة كمادة خامدة لتبقى ذات مفعول بدون ضرر خلال الحريق، وبالنسبة للوحة الجبس فإن أداءها الجيد بسبب الماء والذي سوف يطرد أثناء الحرارة، وتعطي عملية التجفيف هذه تأخيراً حوالي 100 °C، لكن قوة اللوحة بعد التعرض للحريق يخفض بشكل ملحوظ جداً.

تتوفر هذه الألواح في الأسواق بأنواع عديدة وهي بشكل عام تؤمن زمن حريق يتراوح من 2/1 إلى 4 ساعات.أما كيفية تثبيت هذه الألواح على العناصر الفولاذية فتتم إما باستخدام الطرق الميكانيكية (براغي أو زوايا مجلفنة) أو باستخدام مواد لاصقة مع البراشيم. وغالبا ما يتم تصنيع هذه الألواح خارج موقع العمل ثم تنقل وتركب فيه.وتشكل هذه الألواح صندوقا مغلقا يحيط بالعناصر الفولاذية المراد حمايتها وذلك للمقاطع الفولاذية صغيرة الحجم، أما المقاطع العميقة (800 مم فما فوق) فيفضل أن تتماشى هذه الألواح مع الشكل الخارجي للمقطع، وتتراوح سماكة هذه الألواح بين 6 مم و80 مم وغالبا ما تصنع من الألياف المعدنية، أو صفائح الميكا والمادة ديدانية المظهر الفيرموكليت، وترتبط هذه الألياف أو الصفائح فيما بينها بملاط غالبا ما يكون من الاسمنت و/ أو السليكات. إن نظام اللوحة يستعمل غالباً في العناصر الإنشائية الواضحة كالعمود المقام للأسباب الجمالية، حيث ينتج سطوحاً مشطبة ملساء لا تحتاج لمعالجة كبيرة أثناء عمليات الديكور. ويطبق هذا النظام بشكل جاف على العناصر وهذا ما يكسبه مرونة كبيرة في الأعمال التجارية من بيع وتسويق ونقل، أما تكلفته فهي متوسطة إلى مرتفعة إذ تبلغ ضعف تكلفة نظام الرش[19,20]، والشكل (14) يظهر هذا النوع من طرق الحماية.



الشكل (14) نظام الألواح الخفيفة لحماية الفولاذ [17]

ب. **نظام الرش :**

يعرف نظام الرش بنظام الرذاذ وهو عادة أرخص أنواع الحماية بالنسبة للعناصر الفولاذية، وهو يصنع من مادة متماسكة أساسها الاسمنت مع بعض أنواع الزجاج أو تسليح الألياف، وتتواجد مواد الرش خفيفة الوزن في نوعين رئيسيين :أولاً مواد ديدانية المظهر تدعى الفيرموكليت مع ملاط رابط غالبا ما يكون الاسمنت، وثانياً مواد تعتمد في تركيبها بشكل رئيسي على الألياف المعدنية مع ملاط رابط. ويطبق هذا النظام من الحماية بشكل رطب ومباشرة على السطح ، وإن معظم المواد المتوفرة في الأسواق مخصصة للاستخدام الداخلي (داخل المنشآت) حيث تطبق مباشرة على الفولاذ غير المطلي، إلا أن هناك أنواعاً أخرى من هذه المواد مقاومة للعوامل الجوية الخارجية، وبالتالي يمكن استخدامها لحماية العناصر الواقعة خارج المنشأ. وفي هذه الحالة يجب أن يعالج الفولاذ أولا بمواد مانعة للصدأ ثم تتبعها عملية الرش بمواد الحماية، وتعطي أغلب مواد الحماية بالرش زمن حريق يصل إلى أربع ساعات.

يستخدم هذا النظام لحماية الكمرات المخفية بأسقف مستعارة أو للعناصر الفولاذية المستخدمة في الأقبية. إذ يعتبر هذا النظام من أرخص وأسرع نظم الحماية من الحريق للمنشآت الفولاذية حيث تصل تكلفته إلى حوالي 15 % من كلفة الهيكل الفولاذي. ولكن من سيئات هذا النظام الضرر اللاحق بعامل الرش نتيجة الرش المتكرر، ويمكن التغلب على هذه السيئة باستخدام أقنعة واقية أثناء عملية الرش. إن حماية الرش تكون مطبقة عادة على الكمرات أو العناصر الفولاذية غير المرئية أو التي تستعمل لأغراض تجميلية، والعيوب الأخرى للنظام هي أن العملية غير منتظمة والمنتج الناعم قد يتطلب حماية إذا وضع في المواقع الضعيفة، ولكن من ميزاتها أنها تصل إلى تفاصيل معقدة بسهولة[21].

ج. **نظام الأغطية مسبقة الصنع:-**

يتوفر هذا النظام على شكل رقائق فولاذية (steel sheet) أو طينة ديدانية المظهر (vermiculite plaster)، حيث يقاوم هذا النظام حريقا يصل زمنه حتى 4 ساعات. وتبطن الرقائق الفولاذية داخليا بالمواد المقاومة للحريق المستخدمة في نظام الألواح .أثناء تعيين سماكة هذه الأغطية مسبقة الصنع والتي تتحدد وفقا لزمن الحريق المعطى بتعليمات

DOI: 10.5281/zenodo.17903269

أنظمة البناء، يهمل وجود الرقائق الفولاذية المغلفة لمواد الحماية علماً بأن وجود هذه الرقائق قد يطيل من زمن صـــمود المنشـــأ في وجه الحريق . ويعتبر هذا النظام من وجهة نظر أعمال الديكور جميلاً جداً إذ يؤمن سطوح إنهاء ملساء ونظيفة، وهو غالبا ما يستخدم بشكل واسع لحماية الأعمدة فقط بالرغم من إمكانية استخدامه لحماية الكمرات . ويتمتع هذا النظام بالسرعة الكبيرة في تركيبه وديمومته، غير أنه ينبغي تصـــنيع هذه الأغطية بدقة كبيرة وذلك لتغطي كامل العنصـــر الفولاذي . وتحتاج منطقة اتصـــال الأغطية مسبقة الصنع الحامية لرأس الأعمدة مع الأغطية الحامية للكمرات إلى عناية خاصة أثناء التنفيذ، أما تكلفة هذا النظام فهي مرتفعة[20,21] .

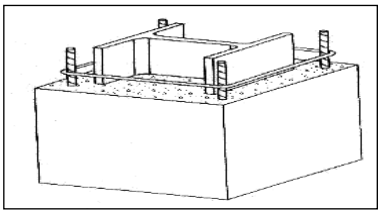
د. نظام الطلاء الانتفاخي (Intumescent Coating):-

هذه المادة خاصة وهي تشبه الطلاء الطبيعي وتبقى مستقرة عند درجات الحرارة المنخفضة و لكنها تنتفخ إلى كتلة سمكية عند درجة حرارة 200 C^{o}، وهي طبقة ذات توصيلية حرارية منخفضة. بالرغم من أنها مكلفة فهي أكثر استعمالا من نظام الرش ونظام اللوحة، فهي لا تأخذ فراغاً كبيراً ويجب أن تطبق بسرعة فيمكن تطبيق العديد من طبقات الطلاء إلى حين الحصول على السمك المطلوب ، وهذا النوع من الطلاء يمكن أن يستعمل في إطارات الأبواب وذلك لتزويد مانع من الحريق والدخان .

يصـــل زمن الحريق الذي يمكن أن تقاومه هذه المواد إلى ســـاعتين، إذ يختلف هذا النظام من الحماية عن الأنظمة الأخرى لأن طبقة الحماية تتشكل مباشرة عند نشوب الحريق، حيث تنتفخ الطبقة الرقيقة من هذه الدهانات أو الرغوة (mastic foam) تحت تأثير الحرارة واللهب لتتحول إلى طبقة عازلة تحيط بالعنصر الفولاذي، وتصل سماكة هذه الطبقة أحيانا إلى 50 مرة سماكة الطبقة الرقيقة الأصلية . وتتوفر هذه المواد من نوعين رئيسيين أولهما يعتمد في تركيبه على راتنجات الابوكسي أو الفينيل ويملك مقاومة حريق عالية تصل إلى ساعتين، وهو مقاوم للرطوبة بشكل جيد إلا أنه مرتفع الثمن (يكلف أربع مرات زيادة عن كلفة نظام الرش)، أما النوع الثاني فيعتمد في تركيبه على راتنجات متنوعة أخرى حيث يملك مقاومة حريق قصوى مقدارها ساعة واحدة وهو غير مقاوم للرطوبة، ولذا ينصـــح بعدم اســـتخدامه في الأجواء الرطبة مثل المنشـــآت الحاوية على حمامات ســـباحة، إلا أنه جيد في الأبنية ذات الجو الجاف، وتطبق هذه المواد على العناصـــر الفولاذية إما بالفرشـــاة أو الرش أو بالمســـطرين (trowel). ويستخدم هذا النظام بشكله الأمثل في الحالات التي يرغب فيها المهندس المعماري بإظهار العنصـــر الفولاذي على حاله، أو في حالة البنية القديمة، حيث يتم الإبقاء فيها على عناصـــر حديد الصـــب القديمة كما هي عليه بغية المحافظة على الطابع التراثي لهذا البناء. ويعتبر أن عدم اختبار درجة وثوقية هذه المواد بشـكل كبير يعد أحد عيوب هذا النظام والتي يجب أخذها بعين الاعتبار .أما الميزة الرئيسـية لهذا النظام فهي السـرعة الكبيرة لتطبيقه[20].

هـ. التغليف الخرساني :

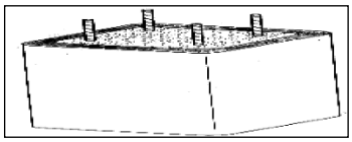
وهي طريقة تقليدية لحماية الفولاذ، وكما هو ظاهر في الشكل (15) يوفر هذا النظام حماية ممتازة ضد التآكل. وهذه التركيبة ضخمة ومكلفة واستهلاكها وقتي، وهي نظام مشترك مستعمل في اليابان ولكنه ليس كثير الاستعمال في أماكن أخرى [13].



الشكل (15) نظام الغلاف الخرساني[17].

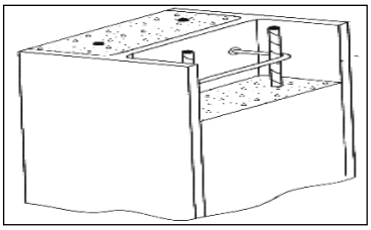
و. الحشو الخرساني :

بالمقارنة مع طريقة التغليف الخرســـاني يحمى هذا النظام أقســـام فولاذية مجوفة يملئها بالخرسانة كما في الشكل (16)، حيث أن الخرسانة يمكن أن تقلل درجة حرارة الفولاذ نتاجاً لامتصاص الحرارة العالية مع/أو عملها كجزء من المنشأ بتحملها لبعض الأحمال عندما يسخن الفولاذ.



الشكل (16) نظام الحشو الخرساني.[17]

يتفادى هذا النوع من الحماية وجود الخرسانة الخارجية الضخمة، فالفولاذ يمكن أن يشكل حاجزاً ممتازاً للخرسانة أثناء الحالات العادية أو تحت التحميل الزلزالي، ولكن وجود فتحات التنفس ضرورية لمنع الفولاذ من الانفجار بسبب ضغط البخار المفرط من الخرسانة أثناء الحريق.والعناصر ذات المقطع (I) يمكن أن يتم حمايتها بوضع الخرسانة بين الحافات كما هو مبين في الشكل (17) مع تسليح فولاذي بإبقاء الخرسانة في مكانها [17]



الشكل (17) الحشو الخرساني مع وجود تسليح فولاذي[17].

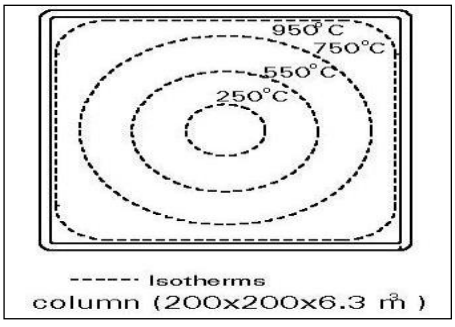
ز. الحشو المائي :

هذه الطريقة مكلفة وتستعمل فقط في منشآت خاصة، فالمقطع الفولاذي المجوف مملوء بالماء وعملياً يمنع ارتفاع الحرارة السريع. ولكنه يتطلب وجود نظام شبكات المياه وكذلك الإضافات في الماء لمنع التجمد في الشروط البيئية وتآكل الفولاذ، وهو ضروري لضمان بأنه ليس هناك ضغطاً مفرطاً عندما ترتفع درجة حرارة الماء [17].

- **سلوك الأعمدة المركبة في الحريق:-**

المقطع الإنشائي المجوف الفولاذي للعمود ، له استعمالات واسعة في المنشآت الإطارية للمباني الصناعية. وقد تم اختبار هذا النوع من العناصر لأهميته فقد فوجد أن هناك زيادة في مقاومة الأحمال ومقاومة الحريق مع التقليل من التكلفة اللازمة للحماية. وهي تقلل من حجم العمود مما يعطي المهندس المعماري راحة أكبر في استعمال المساحات وخصوصا في المباني العالية.وأيضا تقلل من تكلفة الإنشاء، لأنها تنشأ في أي طقس كان. ويمكن أن تحمي طريقة التعبئة بالخرسانة العمود لعدة ساعات من الحريق معتمدة في ذلك على الحمل وحجم مقطع العمود [18]، فعند التعرض للحريق طبقاً للأيزو على كل أوجه العمود فمن المفترض وجود توزيع

منتظم على طول ارتفاع العمود، وهناك توزيع غير منتظم للحرارة في الخرسانة التي تملأ العمود كما في الشكل (18) .إن هذا الحساب للحرارة لا يمكن فعله إلا بالحاسوب [13]



شكل (18) توزيع الحرارة داخل عمود فولاذي معبأ بالخرسانة معرض للحريق من 4 جهات لمدة 90 دقيقة.[13]

DOI: 10.5281/zenodo.17903269

- **العوامل التي تؤثر في مقاومة العمود للحريق**[23]:
  - شدة الحمل.
  - مساحة المقطع العرضي.
  - طول العمود .
  - نوع الخرسانة المستعملة كتعبئة.
  - حديد التسليح في الخرسانة.

عند درجة حرارة الغرفة فإن كلا من الخرسانة والفولاذ تتحملان الأحمال، وعندما يتعرض العمود للحريق يحمل الفولاذ أغلب الحمل عند المراحل الأولى ، لأن مقطع الفولاذ يتمدد ويتمدد بسرعة أكبر من الجزء الخرسانى بالداخل، وعند درجات الحرارة العالية يحدث لمقطع الفولاذ خضوع وتنقص مقاومته، والعمود يتقلص عند بعض النقاط بين 20-30 دقيقة من التعرض للحريق، وعند هذه الحالة فإن الخرسانة ستبدأ بتحمل الأحمال أكثر وأكثر. لكن مقاومة الخرسانة تنقص مع الوقت .وأخيرا العمود لا يبقى صامداً ضد الحمل وينبعج ويفشل ضد الضغط[24].

الأعمدة المجوفة يمكن أن تكسب مقاومة حريق محسنة تصل إلى ساعتين، وذلك بحشوها بالخرسانة. فخلال الحريق تسري الحرارة من خلال الفولاذ إلى الخرسانة ذات الموصلية المنخفضة فعندما يفقد الفولاذ مقاومة الخضوع بارتفاع درجة الحرارة، فإن الحمل يحول إلى الخرسانة، وبإضافة الألياف أو تسليح الخرسانة يتم ضمان فترات أفضل من مقاومة الحريق. وأحيانا تملئ هذه المقاطع بالماء لتخفيض الحرارة أثناء الحريق، ولكن هذه الطريقة غالية ومستعملة بشكل نادر [25,26].

أ- الأعمدة المعبأة بالخرسانة العادية :

العمود غير المحمي بدون خرسانة لا يقاوم الحريق إلا 15 دقيقة، وهو زمن قليل مقارنة بالعمود المحمي. واقتصاديا تستعمل الخرسانة العادية كتعبئة، ولكن عند فقد الفولاذ مقاومته في درجات الحرارة العالية والخرسانة بدون تسليح ، وجد أنها سوف تتشقق مبكراً ويحصل الانهيار. وبالتالي فهي توفر مقاومة حريق لمدة ساعة إلى ساعتين فقط. ويحدث الفشل لأن التخفيض في مقاومة الضغط مع زيادة الحرارة سويا مع التشقق السريع للخرسانة ينتج فشلاً مبكراً لقلب الخرسانة، وإن مقاومة حريق أطول من ساعة يمكن الحصول عليها بتقليل مستوى التحميل وهي حساسة جدا للتحميل اللامركزي.[17,22]

ب- الأعمدة المعبأة بالخرسانة المسلحة بألياف:

وهي طريقة لمنع التشقق المبكر بإضافة كمية صغيرة من ألياف الفولاذ للخرسانة، (حوالي 2% بالوزن) وهي تعتبر إضافة في التكلفة والتي تقدر بقيمة هذه الألياف. ولكنها بالتالي تعطي مقاومة حريق لمدة تصل إلى (2-3 ساعات).إن مقاومة الحريق يمكن أن تحسن باستعمال هذه الخرسانة، ويمكن أن تصل إلى 3 ساعات بدون تخفيض في الأحمال، والنسبة 2 % من الوزن تخفض التشققات وتزيد من مقاومة الضغط عند درجات الحرارة العالية. وبالتالي فالأعمدة الفولاذية المعبأة بالخرسانة المسلحة بالألياف لها عدة مميزات:-

1. مقاومة شد منخفضة مضافة للأنظمة المركبة.
2. تشققات أقل تحت الشروط الخدمية.
3. مقاومة عالية للصدم والتعب والانكماش والإجهاد الحراري.
4. لا تنتج انهياراً مفاجئاً.
5. زيادة قدرة تحمل الحمل مقارنة مع الخرسانة العادية 10-20%.
6. زيادة مقاومة الحريق.
7. تقليل الانبعاج.
8. إمكانية استخدام أبعاد مختلفة للعمود.

ج- الأعمدة المعبأة بالخرسانة المسلحة بالقضبان:-

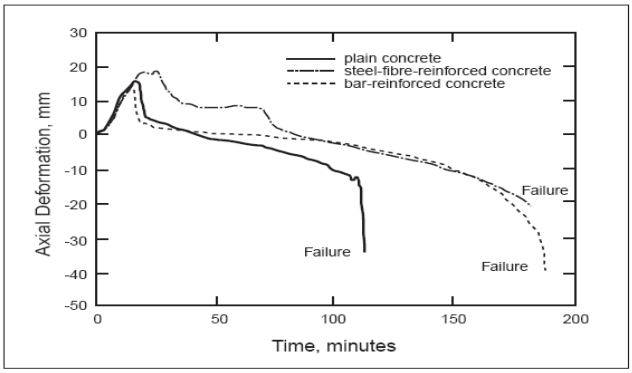
إن الزيادة الحقيقية في مقاومة الحريق تكون باستعمال الخرسانة المسلحة بالقضبان، وهذه الأعمدة سوف تصمد لمدة تتجاوز 3 ساعات. والتكلفة الإضافية هي تكلفة وضع القضبان داخل الأعمدة المفرغة. وبالتالي فهذا النوع له نفس مميزات النوع السابق ولكن تكلفة صنعه عالية[22].

إن تعبئة العمود الفولاذي المفرغ بالخرسانة ، هي طريق اقتصادية لجعل العمود ذو مقاومة عالية للحريق ، وقدرة تحمل أحمال عالية أيضاً .

إن مقاومة العمود المفرغ بأنواع التعبئة المختلفة موضحة في الشكل (19) والجدول (1).

جدول (1) زمن مقاومة الحريق للأعمدة المعبأة وغير المعبأة بالخرسانة [22]

زمن مقاومة الحريق (ساعة)	التعبئة
0.2-0.3	بدون
1.0-2.0	خرسانة عادية
2.0-3.0	خرسانة مسلحة بألياف معدنية
> 3.0	خرسانة مسلحة بالقضبان المعدنية



الشكل (19) التشوه المحوري للأعمدة باختلاف نوع التعبئة [24].

إن زيادة درجة حرارة الفولاذ والخرسانة في العناصر الفولاذية الخرسانية المركبة يؤدي إلى نقصان الخواص الميكانيكية مثل إجهاد الخضوع ومعامل المرونة ومقاومة الضغط القصوى للخرسانة. وعندما يعرض الفولاذ أو المنشأ المركب لفعل الحريق فإن مقاومته لتحمل الحمل تقل، وإذا كانت مدة وشدة الحريق كبيرة كفاية، فإن مقاومة تحمل الحمل سوف تنخفض إلى مستوى يسبب الحمل المطبق فيه انهياراً في المنشأ [13].

- **تأثير الحرائق على سلوك الوصلات والعقد الإنشائية (Connections)**

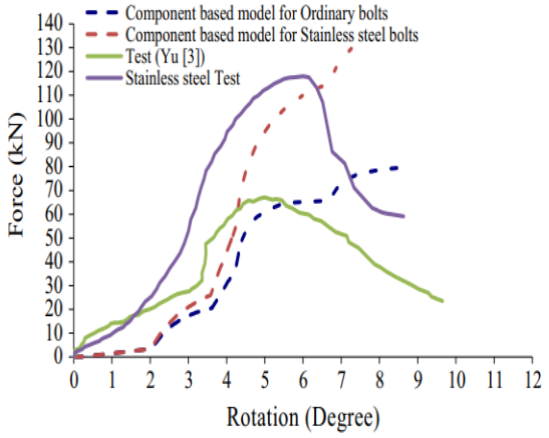
يعد سلوك الوصلات والعقد الإنشائية بين الأعضاء الفولاذية نقطة محورية في استجابة المنشأ للحريق، قد تكون هذه الروابط نقطة الضعف أو التقييد ، وبالتالي يجب أن تضمن ضمن تحليل سلوك المنشأ الكلي تحت تأثير الحرارة ،وليس فقط الأعضاء المفردة، فمن خلال الدراسة التي تم اجراؤها لمعرفة سلوك fin plate connection and web cleat باستخدام مسامير من الفولاذ المقاوم للصدأ لتحسين المتانة في حالات الحريق، وذلك باستخدام اختبارات تجريبية وتحليل نموذج قائم على المكونات. أظهرت النتائج التجريبية للباحثين أن أقصى حمل فشل لوصلات مسامير الفولاذ المقاوم للصدأ أعلى من الوصلات ذات المسامير العادية عالية القوة (8.8)، الشكل (20-21) والتي تعطي نموذج فكرة جيدة عن كيفية أداء التوصيل عند استخدام مسامير 8.8 أو مسامير من الفولاذ المقاوم للصدأالجدول (2) والجدول (3).

وأشارت الدراسة إلى أن استخدام وصلات مسامير من الفولاذ المقاوم للصدأ يُمكن أن يُحسّن متانة fin plate connection and web cleat في حالات الحريق [28]

وبالتالي لتحسين أداء التوصيلات الفولاذية التقليدية، علينا أن نعتمد على مسامير الفولاذ المقاوم للصدأ. هذا سيساعدنا في تجنب مشكلة فشل قص المسامير وبغير طريقة الفشل لتكون أكثر اعتمادًا على web Bearing. أي ينبغي تصميم The fin plate connection باستخدام مسامير

DOI: 10.5281/zenodo.17903269

مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ، وذلك لتجنب حدوث أشكال فشل هشة عند التعرض لدرجات حرارة مرتفعة، مثل كسر اللحام.



الشكل (20) مقارنة العلاقة بين القوة والدوران للنموذج القائم على المكونات لاتصال صفيحة الزعانف عند 550 درجة مئوية [28]

Table 2 The prediction of maximum load for fin plate connection at temperature 550 °C

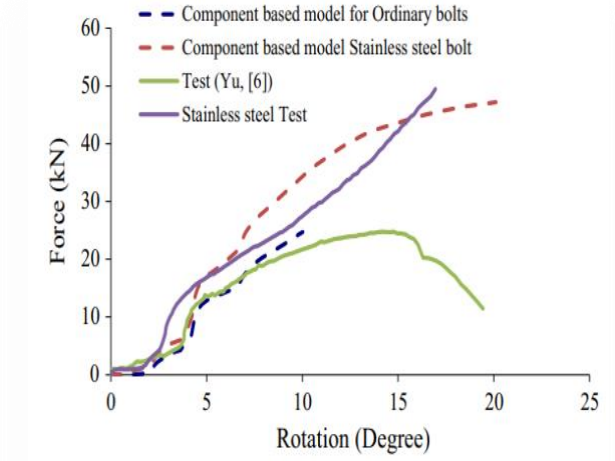
Fin plate, double line of bolts				
150 × 10 mm fin plate in S275				
Beam size (UB, S275)	Bolt rows, n	$F_{8.8}$ (kN)	F_{ss} (kN)	L_F (mm)
406 × 178 × 54	4	125.19	250.26	260
457 × 152 × 52	5	168.94	325.03	320
533 × 210 × 82	6	229.42	437.95	380

ومن ناحية أخرى يعتبر أداء البراغي في مقاومة الحريق قضية معقدة نظرًا لوجود إرشادات رسمية محدودة في القوانين والمعايير البريطانية والأوروبية) مثل المعيار الأوروبي 3 الجزء 1.8). هذه الإرشادات تقدم عوامل تخفيض بسيطة تعتمد على درجة الحرارة، لكنها لا تأخذ بعين الاعتبار أنماط الفشل المختلفة .علاوة على ذلك، هناك أنواع خاصة من

البراغي، مثل البراغي عالية المقاومة، بالإضافة إلى مواد مثل الفولاذ المقاوم للصدأ، مصممة للإستخدام في درجات الحرارة العادية.

هناك نوعان رئيسيان لفشل الوصلات الملولبة عند درجات الحرارة المرتفعة: التآكل والتضيق. يُعتبر فشل التضيق نمطًا مرنًا للفشل ويمثل خيارًا مفضلًا في هذه الحالات، حيث يضمن تكوين وصلة قوية وقادرة على تحمل قوى الشد التي تنتج عن دور العوارض كسلاسل خلال الحرائق الشكل (22) والشكل (23). [30,29]

تُعد البراغي ذات السن الجزئي أقل عرضة لفشل التآكل مقارنةً بالبراغي ذات السن الكامل، مما يجعلها أكثر ملاءمة في البيئات الحرارية العالية. ومع ذلك، ينبغي توخي الحذر عند اختيار البراغي المطلية، مثل تلك المغطاة بطبقة الزنك، خصوصًا في المناطق الحساسة للحرائق ضمن المباني، حيث قد تؤثر هذه الطلاءات على الأداء في ظروف الحرارة المرتفعة.[29]

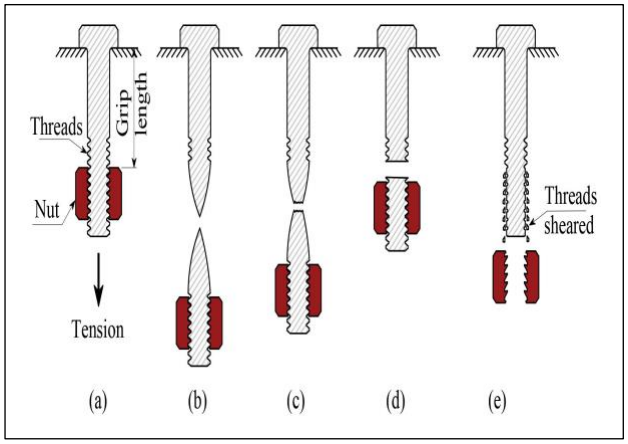


الشكل (21) مقارنة العلاقة بين القوة والدوران للنموذج القائم على المكونات لاتصال صفيحة الزعانف عند 650 درجة مئوية [28]

Table 3 The prediction of maximum load for web cleat connection at temperature 650 °C

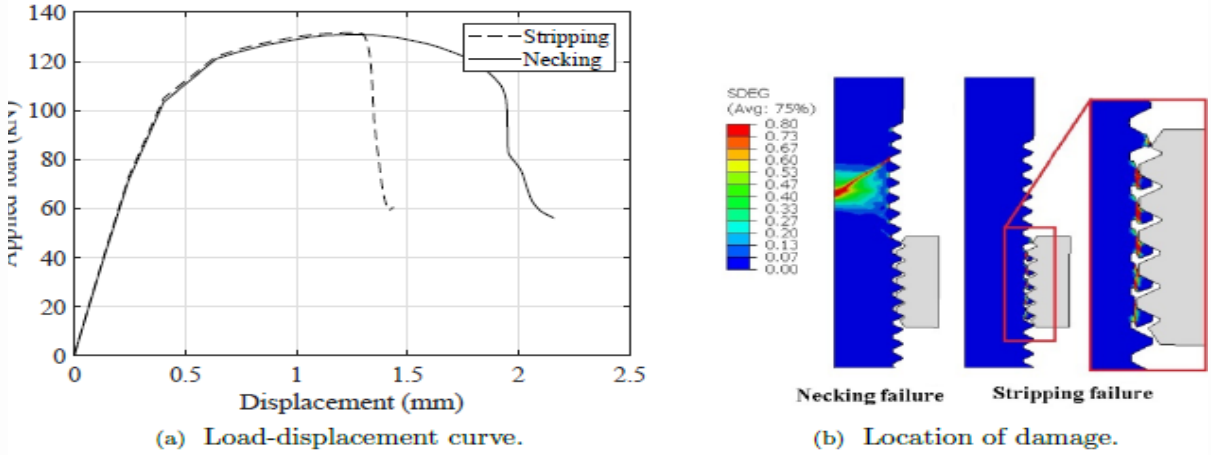
Double angle cleat, single line of bolts				
2 No. 90 × 90 × 8 mm equal angle in S275				
Beam size (UB, S275)	Bolt rows, n	$F_{8.8}$ (kN)	F_{ss} (kN)	l_a (mm)
305 × 165 × 40		24.74	47.22	200
406 × 178 × 54	4	36.80	65.89	260
457 × 152 × 52	5	37.79	84.13	320
533 × 210 × 82	6	62.84	121.68	380

$F_{8.8}$ maximum force in ordinary bolt connection
F_{ss} maximum force in stainless steel bolt connection
l_F fin plate length
l_a angle cleat length



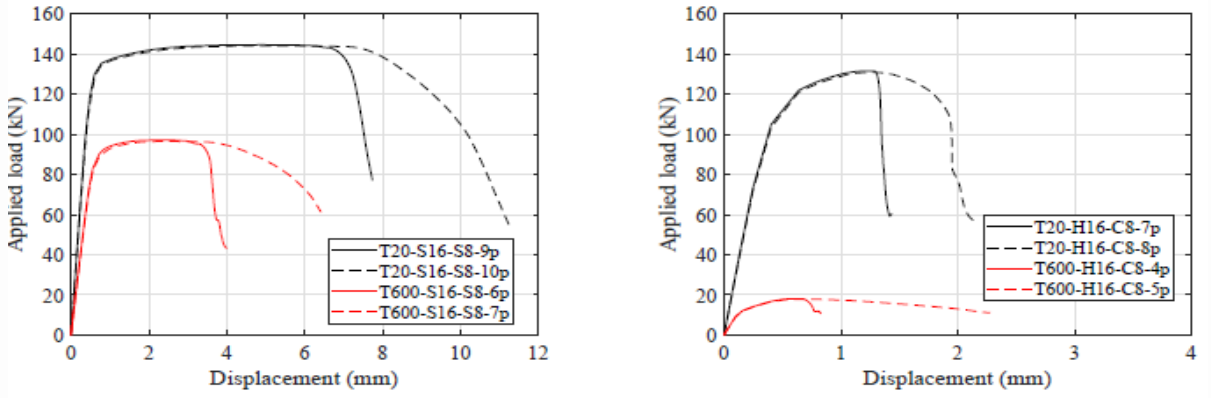
الشكل (22): فشل البراغي تحت تأثير قوة الشد: (أ) المصطلحاتterminology؛ (ب) مطيلية عالية؛ (ج) مطيلية متوسطة؛ (د) كسر هش؛ (ه) فشل التعريةstripping failure [24]

DOI: 10.5281/zenodo.17903269



(a) Load-displacement curve. (b) Location of damage.

الشكل (23) سلوك مجموعات البراغي مع أنماط الفشل المختلفة.[30]



(a) Stainless steel bolt assemblies. (b) High strength bolt assemblies.

الشكل (24) يوضح مرونة البراغي عند درجات الحرارة المرتفعة مع مراعاة أنماط الفشل المختلفة، فشل التخصر (خط متقطع) وفشل التعرية (خط متصل).[30]

بعد انتهاء الحريق، قد تتراجع خصائص البرغي بحيث لا تعادل خواص المادة الأصلية في حالتها الأولى. إضافة إلى ذلك، قد تبقى داخل الوصلة إجهادات كبيرة ناتجة عن التشوهات الدائمة التي تحدث في العناصر الإنشائية المتصلة،الشكل (24) مما يتطلب فحصًا دقيقًا وإجراءات تعديل عند الضرورة.[29]

فعندما ترتفع درجة الحرارة، تتغير خصائص الفولاذ بشكل كبير، وهذا يؤثر مباشرة على البراغي والوصلات. تصبح هذه القطع أقل صلابة وأضعف، خصوصًا إذا تجاوزت الحرارة 400 درجة مئوية. عند 550 درجة مئوية تقريبًا، يفقد الفولاذ نصف قوته تقريبًا، وهذا يعني أن البراغي والوصلات قد تبدأ بالانحناء أو التشوه حتى تحت أوزان عادية. هذه التغيرات تشكل خطرًا حقيقيًا على ثبات الهيكل كله [23]والتالي يمكن تلخيص سلوك الوصلات والبراغي تحت تأثير الحرائق من خلال مجموعة من العوامل التي يجب أخذها في الإعتباركالتالي.

1. التمدد الحراري :عند تعرض الفولاذ للحرارة، يتوسع حجمه بشكل طبيعي، ما يسبب قوى ضغط أو شد إضافية داخل الوصلات .إذا لم يتم تصميم الوصلات لتحمل هذه الضغوط عند درجات الحرارة العالية، فقد تتعرض للإجهاد أو الانهيار المبكر نتيجة التمدد المقيد .
2. التغيرات في البنية المجهرية (Microstructure Changes): إذا: تعرض الفولاذ لدرجات حرارة شديدة بين 704و438 درجة مئوية –وهي نطاق حساس لمعظم أنواع الفولاذ الإنشائي –ثم تم تبريده فجأة) مثلاً بواسطة الماء أثناء عمليات الإطفاء)، قد تتغير بنيته المجهرية إلى طور هش يُسمى" المارتنزيت ".هذا التحول يجعل البراغي والوصلات أكثر عرضة للكسر الهش على الرغم من أنها قد تبدو قوية ظاهرياً .

3- العوامل الخاصة بالبراغي عالية القوة :تشير الدراسات إلى أن البراغي ذات القوة العالية تكون أكثر قابلية للتعرض لما يسمى بـ "التقصف

DOI: 10.5281/zenodo.17903269

3. الهيدروجيني" (Hydrogen Embrittlement ")، وهي ظاهرة تزداد خطورتها مع ارتفاع درجات الحرارة، مما يضعف بشكل كبير مقاومة البرغي للسحب ويقلل مرونته
4. .السلوك الإنشائي للوصلات أثناء الحريق (Progressive Collapse)تمثل الوصلات الفولاذية عنصراً ضعيفاً نسبياً في المباني المقاومة للحريق .حيث يتسم سلوكها أثناء الحريق بالتعقيد نتيجة للقوى المتنوعة وغير المتوقعة التي تنشأ، مثل قوى العمل الناتجة عن حصر التمدد الحراري أو "تأثير القوس ."قد تكون هذه التأثيرات غير مدمجة في اعتبارات التصميم عند درجات الحرارة الطبيعية، مما يزيد من احتماليات الإخفاق في إحدى الوصلات، وما يترتب على ذلك من انهيار تدريجي لأي هيكل مترابط.[28]

- **.التوصيات الهندسية للتقليل من مخاطر تأثير الحرائق والحفاظ على سلامة المنشآت:**

يُوصى باتباع الآتي :

1. تطبيق الحماية الحرارية للوصلات :يجب تغليف البراغي والوصلات بمواد عازلة مثل الجص المقاوم للحريق لتقييد معدل ارتفاع درجة الحرارة أثناء الحرائق .
2. تبني التصميم المقاوم للحريق :يجب دمج مفاهيم التصميم المقاومة للحرائق في مرحلة التصميم الأولية، مع مراعاة سلوك المواد الهيكلية عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة .
3. .إجراء الاختبارات والتقييم الدوري :بعد أي حادث حريق، يصبح من الضروري تنفيذ فحوصات دقيقة على المنشآت القائمة باستخدام تقنيات مثل اختبار الموجات فوق الصوتية لتحديد الأضرار وضمان السلامة الإنشائية للهيكل.

- **الخلاصـــــة**

يتطلب الاستخدام الناجح لوسائل الحماية للهياكل الفولاذية والمركبة في المنشآت فهما للسلوك الأساسي للخواص الحرارية والميكانيكية، والحكم الهندسي الجيد على الوضع الإنشائي ،ومعرفة تأثير درجات الحرارة العالية على هذه الخواص،بشكل عام ، الهياكل الفولاذية غير المحمية مقاومة للحرارة، الحد الأعلى هو حوالي 15 دقيقة. ويرتبط طول هذا الوقت بالسرعة التي يمتص بها المكون الحرارة، ولهذا ، فإن المقاومة غير النارية هي عيب رئيسي في الهياكل الفولاذية. بمجرد حدوث حريق ، سيتسبب في خسائر كبيرة في الممتلكات والأرواح. لذلك ، تعد إجراءات الوقاية من الحرائق للهياكل الفولاذية جزءًا مهمًا في سياسة بناء الهياكل الفولاذية. فباختلاف كل الطرق التي تم عرضها في هذه الورقة، والتي تنوعت من حيث تكلفتها ودرجة موثوقيتها وسرعة انجازها وغيرها من العوامل التي تحتاج إلى دقة ومهارة في الاستخدام نصل لمعلومة مهمة مفادها : يرتبط وقت مقاومة الحريق بسرعة امتصاص الحرارة لمكون الفولاذ. وبالتالي ضرورة تنفيذ علاج الوقاية من الحرائق. بغرض زيادة حد مقاومة الحريق للهياكل الفولاذية إلى النطاق المحدد في كود التصميم. كما أن هناك تدابير مختلفة لمنع الهيكل الفولاذي من الانبعاج والتشوه بسرعة أثناء الحريق. المفتاح هو اعتماد طرق متنوعة وفقًا للمواقف المختلفة تسمح بتأخير ارتفاع درجة حرارة الهيكل الفولاذي ووقت فشل المنشأ.

- الشكر والتقدير :

نتوجه نحن الباحثون بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى كل من ساهم في إنجاح هذا العمل البحثي.
نخص بالشكر السادة أعضاء لجنة الإشراف والتقييم الموقرة على توجيهاتهم القيمة وملاحظاتهم البناءة التي ساهمت في إثراء البحث وتقويمه ونخص بالذكر الدكتور المحترم أ.د.محمد الرويمي وأ.د.ميلود الغبار .
كما نتقدم بخالص التقدير إلى المؤسسات كجامعة الجفارة وجامعة طرابلس والأكاديمية الليبية جنزور ، التي قدمت الدعم اللازم لإتمام هذا البحث.

ولا يفوتنا أن نشكر الزملاء المستشارين والخبراء الذين قدموا لنا العون والمشورة طوال مراحل البحث.
والشكر موصول لكافة الجهات التي قدمت الدعم والمساعدة.

- **References:**

1-Zhou, M., Wang, L., & Chen, Y. (2021). Thermal behavior of steel in fire conditions: Recent developments Fire Safety Journal, 95, 102-116
2- 2E86C1;" Li, H., & Zhang, Q. (2022). Impact of high temperature on steel structural integrity: A comprehensive study. Materials Science and Engineering, 12(3), 97-115
3- Ahmed, S , & Kumar, R. (2023). Advances in fire protection systems for steel structures: A review. Journal of Structural Engineering Research, 45(2), 112-128
4- Johnson, P., Lee, J., & Smith, A. (2023). Modern approaches to fire resistance in steel frameworks. International Journal of Fire Safety, 18(4), 245-
5. .Appendix of the Federal Emergency Management Agency (FEMA) ,World trade center report :overview of fire protection of buildings,2002.
6. European Committee for Standardization (CEN). EN 1993-1-2: Euro code 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels; 2005.
7. Kodur, V. K. R., and Agrawal, A. "Critical temperature for fire resistance design of steel columns." Engineering Journal, AISC, 2016, 53(1), pp. 31-48.
8. Buchanan, A. H. Structural Design for Fire Safety. 2nd ed. Chi Chester, UK: John Wiley & Sons; 2017.
9. Wald, F. "Structural behavior of steel frames in fire." CTU Reports, Czech Technical University in Prague, 2005
10. Newman, G. M. "Fire resistance of steel structures: Review of design methods." *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(3), pp. 459-470..
11. [5] Newman, G. M. "Fire resistance of steel structures: Review of design methods." Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(3), pp. 459-470.
12. Susan Lamont "The Behavior of Multi-Story Composite Steel Framed Structures In Response

DOI: **10.5281/zenodo.17903269**

To Compartment Fires, University of Edinburgh), 2001.

14. م.غسان محمد موسى ، وقاية المنشآت الفولاذية من الحريق، مجلة المهندس الاردني، نقابة المهندسين الاردنيين، العدد 69، يوليو 2000، ص22−25.
15. http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/Teaching/master/wg04b/l0400.htm.
16. Kathryn R. Lewis "Fire Design of Steel Members" University of Canterbury ,Christchurch, New Zealand. February 2000.
17. Daniela Bern hart "The Effect of Support Conditions on the Fire Resistance of a Reinforced Concrete Beam", Fire Engineering Research Report 04/5,University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, August 2004 .http://www.civil.canterbury.ac.nz.html.
18. Euro code 4, Design of composite Steel and Concrete Structures prEN1994-1-2, Part 1.2 , Structural Rules - Structural Fire Design. European Committee for Standardization, Brussels, 2001.
19. Jenny Seputro ,"Effect of Support Conditions on Steel Beams Exposed of Fire", Department of Civil Engineering, University of Canterbury ,Christchurch, New Zealand.2001
20. Euro code 3, Design of steel structures , prEN 1993-1-2, Part 1.2 : General rules ,Structural fire design ,European Committee for Standardization . Brussels, 2002
21. Zhongcheng Ma and Pentti Mäkeläinen "Behavior Of Composite Slim Floor Structures In Fire" journal of structural engineering, ASCE,Vol.126, no.7, pp.830-837, July 2000.
22. د غياث الحلاق،"حماية المنشآت الفولاذية من الحرائق باستخدام مواد حماية خفيفة الوزن"، المهندسون جمعية المهندسين الكويتية, العدد60 ,ابريل 1998 ، ص24−30.
23. Bailey, C. G. and Moore, D. B.: 'Structural fire design: Core or specialist subject, Part 2: design', The Structural Engineer, 4 May 2004, p32 – 38
24. T.T. Lie and M. Chabot "Concrete Filling: Fire Protection for Steel Columns", Canadian Consulting Engineer, May/June 1990, p. 39-40
25. The behavior of multi-story steel framed building in fire", British steel plc/swinden technology centre-1999.UK.
26. V.K.R. Kodur "Fire Resistance of Concrete-Filled Steel Columns", National Research Council of Canada, ISSN 1206-1220,May 1997.
27. Faris A. Ali "Rotationally Restraint Steel Columns In Fire" University of Ulster ,The third part (phase 3) of the restraint test program , May 1998.
28. Clayton Wastney ,"Performance of unprotected steel and composite steel frames exposed to fire", Department of Civil Engineering ,University of Canterbury ,Christchurch, New Zealand ,February, 2002 .
29. I.W. Burgess, Z. Huang and R.J. Plank "Non-Linear Modelling Of Steel And Composite Structures In Fire", Department of Civil & Structural Engineering, University of Sheffield, S1 3JD, UK.2003.

29- Shaheen, Mohamed & Foster, Andrew & Cunningham, Lee & Afshan, Sheida. (2020). "Behaviour of stainless and high strength steel bolt assemblies at elevated temperatures — A review. Fire Safety Journal. 113 . 10297510.1016/j.firesaf..2020.102975.

30- Shaheen, Mohamed & Foster, Andrew & Cunningham, Lee & Afshan, Sheida. (2020). A numerical investigation into stripping failure of bolt assemblies at elevated temperatures. Structures . 27. 10.1016/j.istruc.2020.07.042..

DOI: **10.5281/zenodo.17903269**