



تأثير ارتفاع درجات الحرارة على الصخور الجيرية لتكوين فتحة في مدينة الموصل، شمال العراق

مريم يوسف أحمد¹، أسعد العمري^{2*}

^{1,2} قسم الهندسة المدنية، جامعة الموصل، الموصل، العراق.

ملخص	معلومات الارشفة
يتناول البحث الحالي دراسة تغير درجات الحرارة على الصخور الجيرية في مدينة الموصل واجراء العديد من الفحوصات الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية على العينات الصخرية. ولهذا الغرض تم تعريض العينات الصخرية لمدى واسع من الحرارة ابتداء من 100 درجة سيليزية وتدرجيا 200 و300 و400 و600 وحتى 800 درجة سيليزية على التوالي، والمقارنة مع العينات السليمة. لقد وجدت تغيرات لونية في المظهر الخارجي للعينات الصخرية عند درجات حرارة 300 و400 و600 و800 درجة سيليزية. بالإضافة الى ذلك لوحظ فقدان بالوزن ونقصان بالكثافة الظاهرية ومقاومة الانضغاط احادي المحور والسرعة الموجبة فوق الصوتية بشكل تدريجي عند درجات حرارة تتراوح من 100-400 درجة سيليزية. كما كشفت الدراسة ان المسامية الكلية وامتصاص الماء الاجباري وخاصة ارتفاع الماء الشعيري تزداد بشكل كبير عند 600-800 درجة سيليزية. فضلا عن ذلك فان نتائج الرقم الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية وكذلك الفحوصات المايكروية للنسيج الداخلي لعينات الشرائح الرقيقة اكدت نتائج الفحوصات المايكروية لخصائص العينات الصخرية الفيزيائية والميكانيكية. اظهرت فحوصات الاشعة السينية الحائدة تشابهاً في أنماط حيود الاشعة السينية للعينات الصخرية عند درجات الحرارة من 100-600 درجة سيليزية وبدون وجود تغيير بالتركيب المعدني. اخيراً، تبنت الدراسة الحالية تحديد درجة الحرارة الفعالة من خلال اجراء بعض الفحوصات الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية. حيث تمت ملاحظة ان سلوك العينات الصخرية كان معدوماً او قليل التأثير عند درجات حرارة تتراوح من 100-400 درجة سيليزية. بينما تأثيرها على سلوك العينات الصخرية عند درجات الحرارة التي تزيد عن 600-800 درجة سيليزية كان مؤثراً جداً.	تاريخ الاستلام: 12- أغسطس -2024 تاريخ المراجعة: 13- سبتمبر -2024 تاريخ القبول: 15- أكتوبر -2024 تاريخ النشر الالكتروني: 01- أكتوبر -2025 الكلمات المفتاحية: درجات الحرارة المرتفعة الحجر الجيري تكوين الفتحة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الفحوصات الإتلافية وغير الإتلافية المراسلة: الاسم: أسعد العمري Email: asaad.alomari@uomosul.edu.iq

The Effect of Temperature on Limestone of Fatha Formation from Mosul City, N-Iraq

Mariam Yousif Ahmed ¹ , Asaad Al-Omari ^{2*} 

^{1,2} Department of Civil Engineering, University of Mosul, Mosul, Iraq.

Article information

Received: 12- Aug-2024

Revised: 13- Sep-2024

Accepted: 15- Oct -2024

Available online: 01- Oct -2024

Keywords:

High temperature

Limestone

Fatha formation

Physico-mechanical properties

Destructive and non-destructive tests

ABSTRACT

In this study, limestone specimens of the Fatha Formation from Mosul City are subjected to a variety of physical, mechanical, and chemical testing to determine the effect of high temperatures on limestone. In order to compare with fresh specimens, limestone specimens were subjected to a wide range of temperatures, beginning at 100 °C and increasing gradually to 200 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C, and even 800 °C. At 300, 400, 600, and 800 °C. Color changes occurred in the limestone specimens' exterior appearance. At temperatures between 100 and 400 °C, the following parameters are steadily reduced: weight loss, apparent density, uniaxial compressive strength, and ultrasonic pulse velocity. This study also shows that at 600–800 °C, there is a considerable increase in total porosity, forced water absorption, and capillary water rise characteristic. Furthermore, the findings of macroscopic examinations of the physical and mechanical characteristics of the examined specimens are validated by pH, electrical conductivity, and even by the microscopic investigations of the internal structure of the thin-section, for the limestone specimens. The XRD analysis shows that no changes occurred in the mineral composition when the temperature varied between 100 and 600 °C, despite similarities in the X-ray diffraction patterns of the limestone specimens. At the end, the current study has used a variety of physical, mechanical, and chemical experiments to determine the effective fire temperature. Temperatures between 100 and 400 °C are found to have minimal effect on the behavior of the limestone specimens. On the other hand, the influence of temperatures higher than 600–800 °C on the behavior of the limestone specimens is significant.

DOI: [10.33899/earth.2024.152745.1333](https://doi.org/10.33899/earth.2024.152745.1333), ©Authors, 2025, College of Science, University of Mosul.

This is an open-access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

المقدمة

يوجد الحجر الجيري ضمن تكوين فتحة بعمر الميوسين الأوسط في أجزاء من مدينة الموصل بجانيها الأيمن والأيسر فضلاً عن وجوده شرقي مدينة الموصل في طية بعشيقية وعين الصفرة وكذلك في غربها في منطقة المحلبية وسد الموصل (Adeeb, 1988; Al-Jbouri, 1988). يتميز الحجر الجيري بمقاومة تحمل عالية وبمظهره واللونه المتعددة وسهولة تقطيعه وتشكيله، لذلك يستخدم في مجالات متعددة ومختلفة في البناء. إن فهم السلوك الهندسي للحجر الجيري عند تعرضه لظروف التعرية المختلفة بما فيها التعرض لدرجات الحرارة العالية أمر مهم من أجل الحفاظ على العديد من المباني سواء الحديثة أو المباني التاريخية المهمة. إن التغيرات الكبيرة في درجة الحرارة تؤثر بدرجة كبيرة في سلوك الهياكل الهندسية المبنية من الصخور من حيث السلامة والخواص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية. تشير الأبحاث السابقة إلى أن الحجر الجيري يتعرض لتغيير كبير في خصائصه الفيزيائية والميكانيكية نتيجة للصدمة الحرارية، حيث تحدث الصدمة الحرارية عندما يتعرض الحجر الجيري لدرجات حرارة عالية نتيجة الحرائق وتليها مباشرة عملية الإخماد بالماء وهي ما تعرف بعملية التبريد المفاجئ (Dong et al., 2023). كما أن درجة الحرارة تعتبر واحدة من أهم العوامل الفعالة التي تؤثر على البنية المجهرية للصخور.

اهتم الباحثان (Ozguven and Ozcelik, 2013) بالتحري عن تأثيرات ارتفاع درجات الحرارة المختلفة من درجة حرارة الغرفة حتى 1000 درجة سيليزية على الخصائص الفيزيائية لنوعية حجر الرخام وحجر الكلس. أظهرت نتائج هذه

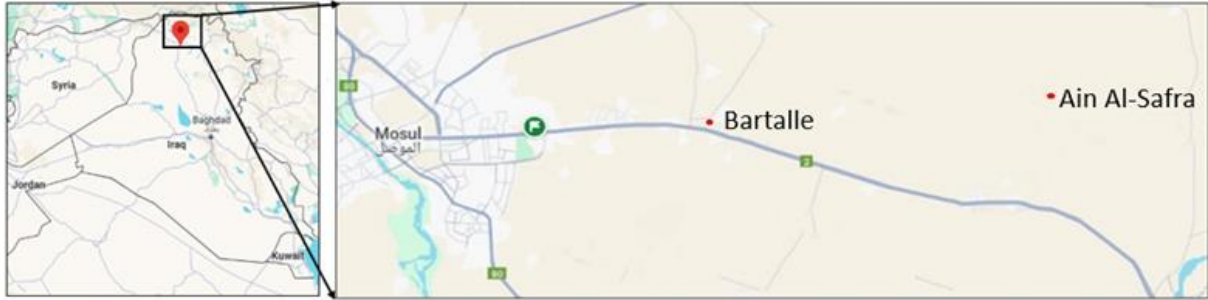
الدراسة بان التغيير في بعض الخصائص الفيزيائية مثل اللون والبياض، والتلميع، والتغير الفيزيائي، وتغيرات درجة الحموضة ودرجة الحرارة لمحلل التبريد الذي تم تحضيره من العينات التي يتم تسخينها عند 800 درجة سيليزية و 1000 درجة سيليزية. درس الباحثون (Brotóns et al., 2013) كيفية تأثير درجات الحرارة على سلوك الصخور المسامية مثل الكالكارينيت. ولاحظوا انخفاضاً في مقاومة الانضغاط احادي المحور يصل إلى 35% في العينات المبردة بالهواء و 50% في العينات المبردة بالماء عند تسخينها إلى 600 درجة سيليزية، وانخفاضاً في نسبة بواسون يصل إلى 44% للعينات المبردة بالهواء و 68% للعينات المبردة بالماء عند 600 درجة سيليزية. وفي دراسة أخرى لـ (Andriani and Germinario, 2014) لاحظ الباحثان تغيرات لونية في الحجرة بعد تعرضها لدرجات الحرارة، حيث تتغير الألوان من حالتها الطبيعية إلى البني المحمر، والرمادي المحمر، وفي النهاية الرمادي الفاتح أو الأبيض. كما درس (Zhang et al., 2017a) التغيرات في الخصائص الميكانيكية والفيزيائية عند تعرض النماذج الحجرية الى تغير في درجات الحرارة بين (25 – 900) درجة سيليزية. حيث تم اجراء اختبار حقن الزئبق (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP) والذي يقيس (المسامية، حجم المسام)، وأيضاً تم اجراء فحص مقاومة الانضغاط أحادية المحور، وتم إيجاد معاملات (قوة الانضغاط والانفعال ومعامل المرونة ونسبة بواسون). وفي فحص حقن الزئبق لوحظ بان هناك زيادة تدريجياً في حجم المسام مع زيادة درجة الحرارة. وفي العمل البحثي الذي نفذه الباحثون (Meng et al., 2020) تمت دراسة تأثير الخصائص الفيزيائية والهيكليّة الدقيقة للحجر الجيري بعد التعرض لدرجات حرارة عالية. كما تم اجراء اختبار سرعة الموجة فوق الصوتية على النماذج الجيرية والفحوصات المايكروية (SEM, XRD, XRF) وكذلك فحص حقن الزئبق. اشارت النتائج الى انخفاض السرعة الموجية مع زيادة درجة الحرارة، كما لوحظ من فحوصات (XRD and XRF) وجود انخفاض شديد في حيود الكالسييت الجزئي وتحلل الدولوميت تدريجياً للعينات المعرضة لدرجة الحرارة 500 درجة سيليزية. من جهة اخرى، تبين من فحص حقن الزئبق عندما تكون درجة الحرارة اقل من 200 درجة سيليزية تزداد المسامية قليلاً، ومع ارتفاع درجات الحرارة تزداد بشكل كبير. وجد الباحث (Martínez-Ibáñez et al., 2020a) انه عند تسخين العينات عند 400 درجة سيليزية يتم استحداث أنواع من الشقوق منها شظايا بارزة بسبب الكسر ومنها كسوراً في مستويات متعددة. أجرى الباحثون (Liu et al., 2021) دراسة على الخواص الميكانيكية الديناميكية للحجر الجيري تحت درجات حرارة وضغوط حصر مختلفة، فوجدوا أن درجة الحرارة تؤثر بشكل كبير على قوة الضغط الديناميكي للحجر الجيري، حيث تزداد قوة الضغط الديناميكية مع زيادة ضغوط الحصر، مما يدل على وجود علاقة إيجابية، وان نقطة التحول تبدأ عند 400 درجة سيليزية. أجرى الباحثون (Hou et al., 2022) دراسة على ثلاثة أنواع من الصخور (الحجر الرملي، الكرانيت، والحجر الجيري) عند درجات حرارة مختلفة (25, 300, 500) درجة سيليزية. فلاحظوا أن ارتفاع درجات الحرارة كان لها تأثير ضئيل على خصائص الميكانيكية في حالة الحجر الرملي. وبالنسبة للحجر الجيري لاحظوا انخفاضاً بالخصائص الميكانيكية، بينما يبقى الكرانيت مستقرًا نسبيًا. وفي دراسة أخرى اهتم (Jodry et al., 2023) بدراسة تأثير درجات الحرارة المرتفعة على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجر الجيري المسامي من باكو-أذربيجان. اظهرت نتائجهم أنه مع زيادة درجة الحرارة، تزداد المسامية والنفاذية للحجر الجيري. ولاحظوا أن سرعة الموجة فوق الصوتية، والتوصيل الحراري، والانتشار الحراري، والسعة الحرارية النوعية، وقوة الضغط أحادية المحور، ومعامل يونغ جميعها تتخفف مع ارتفاع درجات الحرارة، مما يشير إلى وجود علاقة عكسية بين الخواص الميكانيكية ودرجات الحرارة.

يتضح مما سبق بان العديد من الدراسات السابقة قد شخّصت السلوك الهندسي للعينات الصخرية عند تعرضها للحريق (درجات الحرارة العالية)، الا انها لم تحدد درجة الحرارة الفعالة التي تعتبر الحد الفاصل بين حالتين مختلفتين لدرجة تدهور العينات الصخرية هما: حالة العينات الصخرية المتدهورة بشدة عالية، وحالة العينات الصخرية المتدهورة بدرجة متوسطة او قليلة.

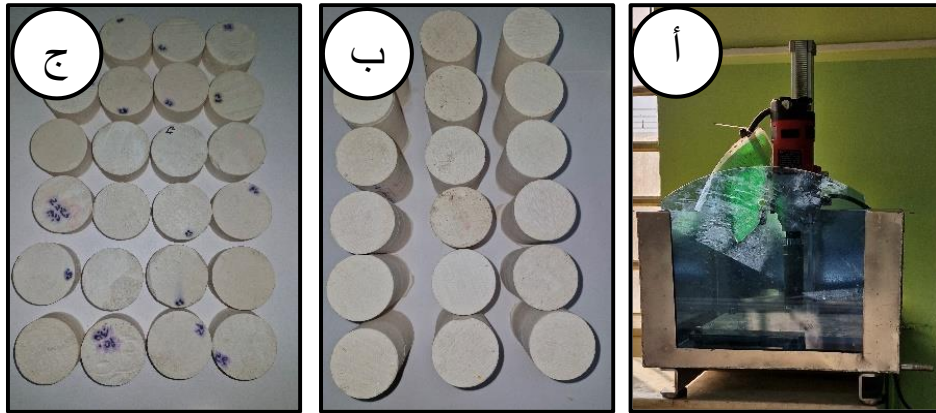
تهدف الدراسة الحالية الى تحديد درجة الحرارة الفعالة من خلال اجراء العديد من الفحوصات المختبرية بنوعيتها الفحوصات غير الإتلافية (فحوصات الخصائص الفيزيائية وفحوصات خصائص انتقال الماء وفحص السرعة فوق الصوتية) والفحوصات الإتلافية (فحص الانضغاط غير المحصور) على عينات الصخور الكلسية الموجودة بالقرب من مدينة الموصل لحالة العينات السليمة ومقارنتها بحالة العينات المتعرضة للحريق بمدى واسع من درجات الحرارة العالية (100 – 800) درجة سيليزية. كما ان هدف هذه الدراسة يتمحور في تمهيد الطريق لتحديد درجة الحرارة الحرجة للحريق كعامل تحكم في أضرار الحجر الجيري من مدينة الموصل.

موقع منطقة الدراسة ووصف العينات الصخرية

في هذه الدراسة تم احضار عينات الصخور الجيرية من تكوين فتحة (Fatha Formation) بعمر المايوسين الاوسط (Middle Miocene)، وبالتحديد من طية عين الصفرة المحدبة والتي تقع على بعد 6.9 كيلومتر شمال ناحية برطلة الواقعة شمال شرقي مدينة الموصل (الشكل 1). تم تقطيع العينات الصخرية بواسطة المنشار الكهربائي للحصول على نماذج جيرية منتظمة الشكل بأبعاد (80*300*300 ملم). في مختبر الجيوتكنك بجامعة الموصل. تم تقطيع النماذج الجيرية المنتظمة الشكل باستخدام جهاز اللباب الدوراني للحصول على نماذج اسطوانية الشكل وبواقع مجموعتين: نماذج المجموعة الأولى ذات قطر 40 ملم والطول 80 ملم ووفقاً للمواصفة (ISRM, 1979) ونماذج المجموعة الثانية قطرها 40 ملم والطول 20 ملم وفقاً للمواصفة (ISRM, 1978) (الشكل 2). استخدمت نماذج المجموعة الاولى في إجراء فحص السرعة فوق الصوتية وفحص الارتفاع الشعيري وفحص مقاومة الانضغاط غير المحصور. اما فحص الامتصاص الاجباري وفحص المسامية وفحص الكثافة الظاهرية وفحص مقاومة الشد البرازيلي فقد اجريت على نماذج المجموعة الثانية.



الشكل 1. موقع منطقة الدراسة.



الشكل 2. (أ) جهاز اللباب المستخدم في تقطيع النماذج الصخرية الاسطوانية، (ب) نماذج العينات الصخرية للمجموعة الاولى بسمك 80 ملم، (ج) نماذج العينات الصخرية للمجموعة الثانية بسمك 40 ملم.

العمل المختبري التجريبي

الفحوصات الفيزيائية

المظهر الخارجي وفقدان الوزن

تمت مراقبة المظهر الخارجي وقياس فقدان وزن للعينات الصخرية بعد تعرضها للتسخين ما بين (100-800) درجة سيليزية. تم اتباع نفس المنهجية في دراسة (Borg et al., 2013) في تقطيع العينات وتجفيفها بدرجة حرارة 60 درجة سيليزية لمدة 24 ساعة ووضعها داخل حاوية مغلقة وتركها لمدة ساعتين للوصول لدرجة حرارة المختبر. قبل الحرق تم النقاط الصور للسطح الخارجي للعينات الصخرية باستخدام كاميرا رقمية متطورة، ثم تم قياس وزن العينات باستخدام ميزان عالي الدقة (0.01 غرام). لاحقاً تم اخذ الصور والوزن لنفس العينات الصخرية ولكن بعد ساعتين من الحرق لمدى واسع من درجات الحرارة المرتفعة (100-800) درجة سيليزية، حيث تم تبريد العينات بالماء لمدة يوم كامل وتجفيفها بدرجة حرارة 60 درجة سيليزية لمدة 48 ساعة (Kara, 2021).

الكثافة والمسامية

تم قياس العديد من الخصائص الفيزيائية (المسامية الكلية والكثافة الحقيقية والكثافة الظاهرية وامتصاص الماء الاجباري) للنماذج الجيرية من خلال الفحص الذي يعتمد على مبدأ أرخميدس للتشبع والطفو (Abdulkareem et al., 2022). في هذا الفحص تم استخدام نماذج المجموعة الاولى بأبعاد القطر 40 ملم والسمك 20 ملم. في البداية تم تجفيف العينات عند 60 درجة سيليزية لمدة 24 ساعة واخذ وزنها وهي جافة (M_s). المرحلة الثانية تم وضع العينات في مجففة (dissector) وسحب الهواء بواسطة جهاز الطارد للهواء (Vacuum machine) لمدة 24 ساعة أخرى وتحت ضغط ثابت مقداره واحد بار. المرحلة الثالثة لهذا الفحص تضمن عملية تشبع النماذج بالماء المقطر لمدة 24 ساعة اضافية. في المرحلة الرابعة والاخيرة تم وزن العينات بحالتين: حالة النماذج المشبعة بالماء (M_{sat}) وحالة النماذج المشبعة والمغمورة بالماء (M_{sub}). (الشكل 3). يتم حساب المسامية الكلية (total porosity) والكثافة الحقيقية او ما تسمى بكثافة المادة الصلبة (solid density) والكثافة الظاهرية (bulk density) حسب المعادلات التالية (RILEM, 1984):

$$Total\ porosity\ (P) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100\% \quad 1$$

$$Solid\ density(\rho_s) = \frac{M_s}{M_s - M_{sub}} \times \rho_w \quad 2$$

$$Apparent\ density\ (\rho_a) = \frac{M_s}{M_{sat} - M_{sub}} \times \rho_w \quad 3$$



الشكل 3. (أ) وضع العينات في المجففة وسحب الهواء في المرحلة الثانية، (ب) غمر النماذج بالماء المقطر تحت ضغط واحد بار لمدة 24 ساعة في المرحلة الثالثة، (ج) اخذ الالوزان للنماذج بحالتها المشبعة والمغمورة في الماء في المرحلة الرابعة.

فحص الارتفاع الشعيري وفحص امتصاص الماء الاجباري

يتم اجراء فحص الارتفاع الشعيري على العينات الصخرية التي يبلغ طولها 80 ملم وقطرها 40 ملم وفقاً للمواصفة NF EN1925 B10-613. يتم وضع العينات في حوض يحتوي على قطعة قماش مبللة ومستوى معين من الماء بحيث يبقى النموذج في حالة تماس مباشر مع الماء (الشكل 4). اثناء الفحص يتم قياس ارتفاع عمود الماء على السطح الخارجي للنموذج مع تسجيل الوقت المستغرق. تتم هذه العملية لعدة مرات لحين وصول الماء الى كامل ارتفاع النموذج الحجري. في هذا الفحص يمكن الحصول على معامل ارتفاع الماء الشعيري (Water up-take coefficient). اما فحص امتصاص الماء الاجباري فيتم اجراؤه ضمن تجربة مبدأ ارخميدس السابق ذكرها اعلاه، ويتم احتساب نسبة الامتصاص الاجباري وفقاً للمعادلة التالية (RILEM, 1984):

$$\text{Forced water absorption (FWA)} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100\% \quad 4$$



الشكل 4. النماذج الصخرية في فحص الارتفاع الشعيري.

الفحوصات الميكانيكية

من اجل متابعة الاختلاف في السلوك الميكانيكي للنماذج الصخرية عند درجات الحرارة المختلفة تم اجراء نوعين من الفحوصات الميكانيكية على العينات الصخرية السليمة ومقارنتها مع مثيلاتها المتعرضة الى درجات الحرارة العالية: فحص السرعة فوق الصوتية وفحص الانضغاط غير المحصور. في هذه الفحوصات تم استخدام نماذج العينات الصخرية للمجموعة الثانية بقطر 40 ملم وبسمك 80 ملم. ولان فحص السرعة فوق الصوتية يعتبر من الفحوصات غير الاتلافية حيث تم اجراء هذا الفحص اولاً ثم اجراء فحص الانضغاط غير المحصور على نفس العينات.

فيما يتعلق بفحص السرعة الموجية فوق الصوتية، استخدم جهاز (Pundit Plus) والذي يعمل على التردد 54 kHz (الشكل 5 أ). يتكون الجهاز من نابض وجهاز استقبال موجات كهروضغطية حيث يتم إرسال الموجة من جانب واحد من العينة (المرسل) التي تصل الى الجانب الآخر من العينة (المستقبل) (Bodare, 2017). تم حساب السرعة الموجية والتي تمثل النسبة بين المسافة التي تقطعها الموجة فوق الصوتية (طول العينة) إلى زمن وصول تلك الموجة.

الفحص الثاني من الفحوصات الميكانيكية هو فحص مقاومة الانضغاط غير المحصور، حيث تم اجراء الفحص باستخدام جهاز الانضغاط الهايدروليكي (ELE-DIGITAL ELECT 2000) بمعدل سرعة التحميل (1.0 mm/min) (الشكل 5 ب). تم اجراء الفحص وفقاً للمواصفة القياسية (ISRM, 1979). اثناء الفحص يتم تعريض النماذج الجيرية لقوة ضغط موازية لمحور العينة الراسي ولحين فشل النموذج خلال 5-15 دقيقة.



الشكل 5. الأجهزة المستخدمة في الفحوصات الميكانيكية (أ) فحص السرعة الموجية (Ultrasonic pulse velocity)، (ب) فحص مقاومة الانضغاط غير المحصور (Uniaxial compressive strength).

الفحوصات المايكروية

من اجل دعم النتائج الماكروية (Macro tests) المذكورة في اعلاه، والمتمثلة بالخصائص الفيزيائية والميكانيكية للنماذج الصخرية، عادة ما يلجأ الى اجراء مجموعة من الفحوصات المايكروية الدقيقة (Micro observations)، حيث تساهم هذه الفحوصات الاخيرة في تفسير ومناقشة النتائج. في هذه الدراسة تم اجراء عدة فحوصات مايكروية: فحص الشرائح الرقيقة (Thin section) وفحوصات خاصة بتحديد التركيب المعدني للعينات الصخرية (X-Ray diffraction, XRD) وبالإضافة الى فحص الرقم الهيدروجيني (pH) والتوصيلية الكهربائية (EC).

بخصوص فحص الشرائح الرقيقة، تم تحضير الشرائح في جامعة زانكو في محافظة أربيل. وتم فحص الشرائح باستخدام المجهر المستقطب (SWIT) في مختبرات قسم علوم الارض، كلية العلوم في جامعة الموصل. من خلال هذا الفحص تم تحليل النسيج والتركيب الداخلي للعينات السليمة وكذلك للعينات المتعرضة للتسخين وبمستوى التكبير *10. لأجراء فحص (XRD) تم طحن العينات الصخرية في حالتها السليمة وكذلك لحالة العينات المعرضة للتسخين ونخلها باستخدام منخل (No. 200). تم اجراء فحص (XRD) في جامعة سوران في محافظة أربيل وللمدى (5° – 70°) من زاوية الانعكاس، وفي هذا الفحص تم استخدام جهاز (XRDML). يتميز هذا الفحص بتحديد اهم المعادن المكونة للعينات الصخرية.

تم قياس كل من الرقم الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية في مختبر البيئة التابع لقسم هندسة البيئة، كلية الهندسة في جامعة الموصل. تم اجراء الفحص على العينات الصخرية السليمة والمعرضة للحرق عند درجات حرارة مختلفة.

التجفيف والحرق

اشارت الدراسات السابقة بأن حرق النماذج الحجرية عادة ما يتم باستخدام الفرن وبمعدل تسخين منخفض بمقدار (5.0–10.0 °C/min) وصولاً الى درجة الحرارة المطلوب الحرق عندها (Ugur et Ozguven and Ozcelik, 2013; Martínez-Ibáñez et al., al., 2014; Zhang et al., 2017a; Liu et al., 2021; Meng et al., 2020; 2020b). في هذه الدراسة تم حرق العينات باستخدام الفرن (Carbolite Furnace) ذات حجرة ابعادها (210 x 300 x 205 mm) حيث يتراوح مدى حرارة الفرن من 100–1200 درجة سيليزية. تم اختيار معدل التسخين المنخفض بمقدار (7.5 °C/min) لضمان انتقال الحرارة من الفرن الى النماذج الجيرية بصورة تدريجية. تم تقسيم الاجراء التجريبي في هذه

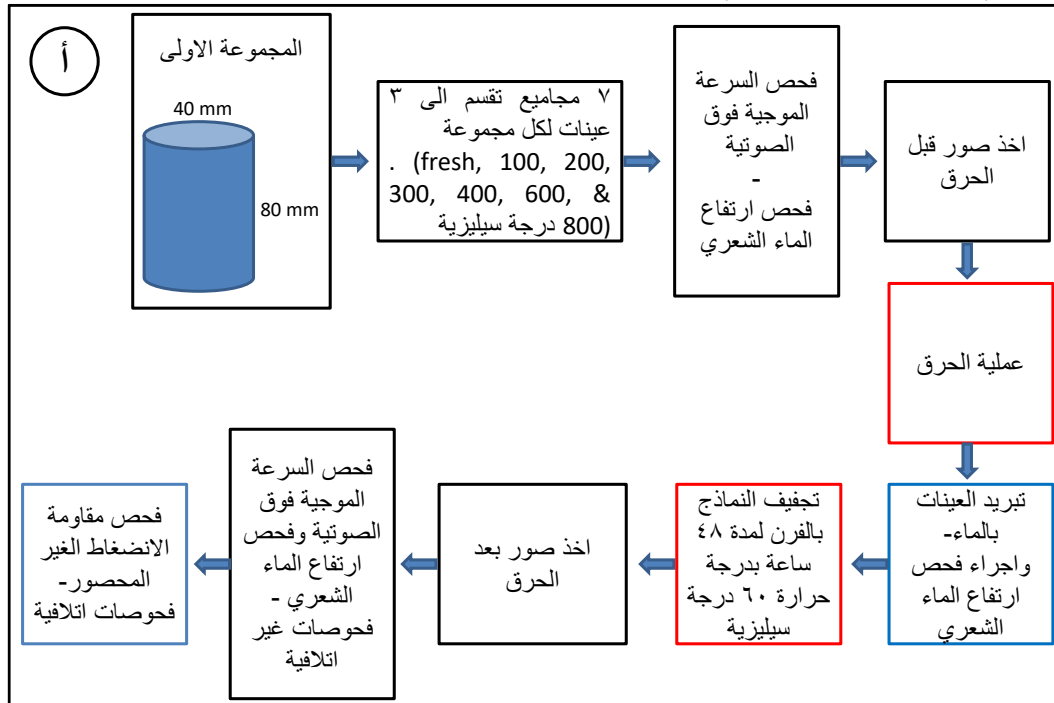
الدراسة الى عدة مراحل. في المرحلة الأولى تم تجفيف جميع العينات عند 60 درجة سيليزية لمدة 48 ساعة، بعدها تم تبريد العينات داخل المجفف وصولاً الى درجة حرارة الغرفة. في المرحلة الاولى تم اخضاع العينات السليمة الى مجموعة من الفحوصات الإتلافية (فحص الانضغاط غير المحصور) والفحوصات غير الإتلافية (فحص المظهر وفحص فقدان الوزن وفحص السرعة الموجة فوق الصوتية وفحص المسامية الكلية والكثافة الظاهرية وفحص الارتفاع الشعري وفحص امتصاص الماء الاجباري). في المرحلة الثانية تم حرق العينات الصخرية بواقع سبع مجموعات (ثلاث عينات لكل مجموعة لاحتساب المعدل للناتج) عند درجات حرارة مختلفة (100-200-300-400-600-800) درجة سيليزية لمدة ساعتين لضمان تسخين كامل العينة. في هذه المرحلة وبعد اكتمال عملية الحرق تم تبريد العينات بغمرها بالماء لدراسة تأثير الصدمة الحرارية على العينات الصخرية. وأخيراً، في المرحلة الثالثة تم تجفيف العينات بالفرن عند درجة حرارة 60 درجة سيليزية لمدة 48 ساعة وأجراء نفس الفحوصات الاتلافية وغير الاتلافية التي تم اجراءها في المرحلة الاولى ولكن على عينات الصخور الجيرية المتعرضة لدرجات الحرارة المختلفة (Altered stone specimens). يوضح الشكل (6) كافة المراحل المتبعة في الجزء العملي لكل من المجموعتين الاولى والثانية للنماذج الجيرية.

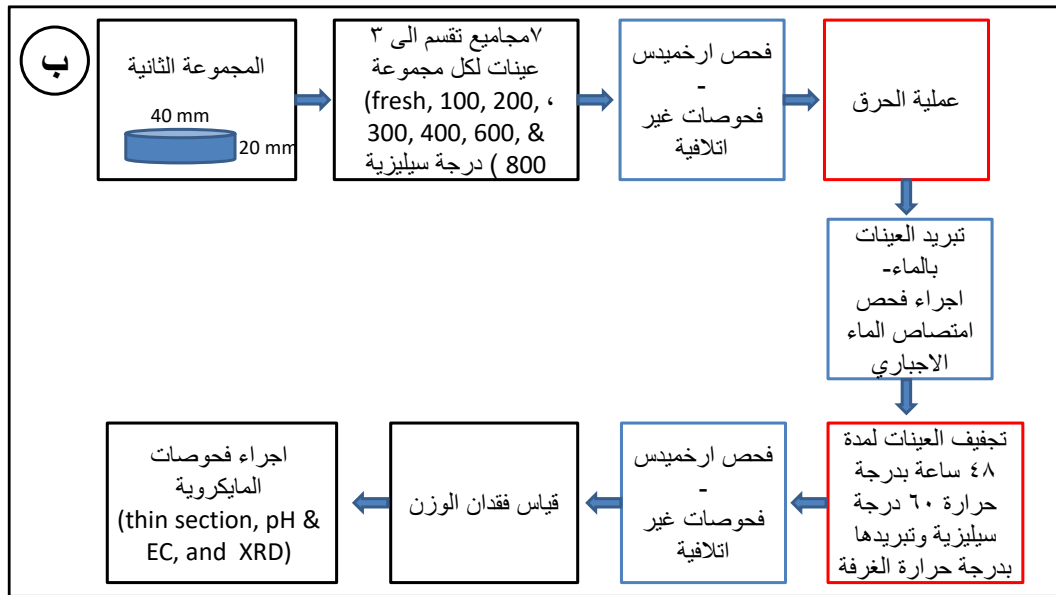
النتائج والمناقشة

الخواص الفيزيائية

المظهر الخارجي

يمكن مقارنة المظهر الخارجي للعينات الصخرية قبل وبعد الحرق من خلال التقاط الصور باستخدام الكاميرا الرقمية. عند حرق العينات عند مدى واسع لدرجات الحرارة (100-800) درجة سيليزية لوحظ وجود تغيرات لونية في المظهر الخارجي للعينات الصخرية كما في الشكل (7).





الشكل 6. مخطط المنهاج المتبع في الجزء العملي للدراسة الحالية، (أ) نماذج المجموعة الاولى، (ب) نماذج المجموعة الثانية.

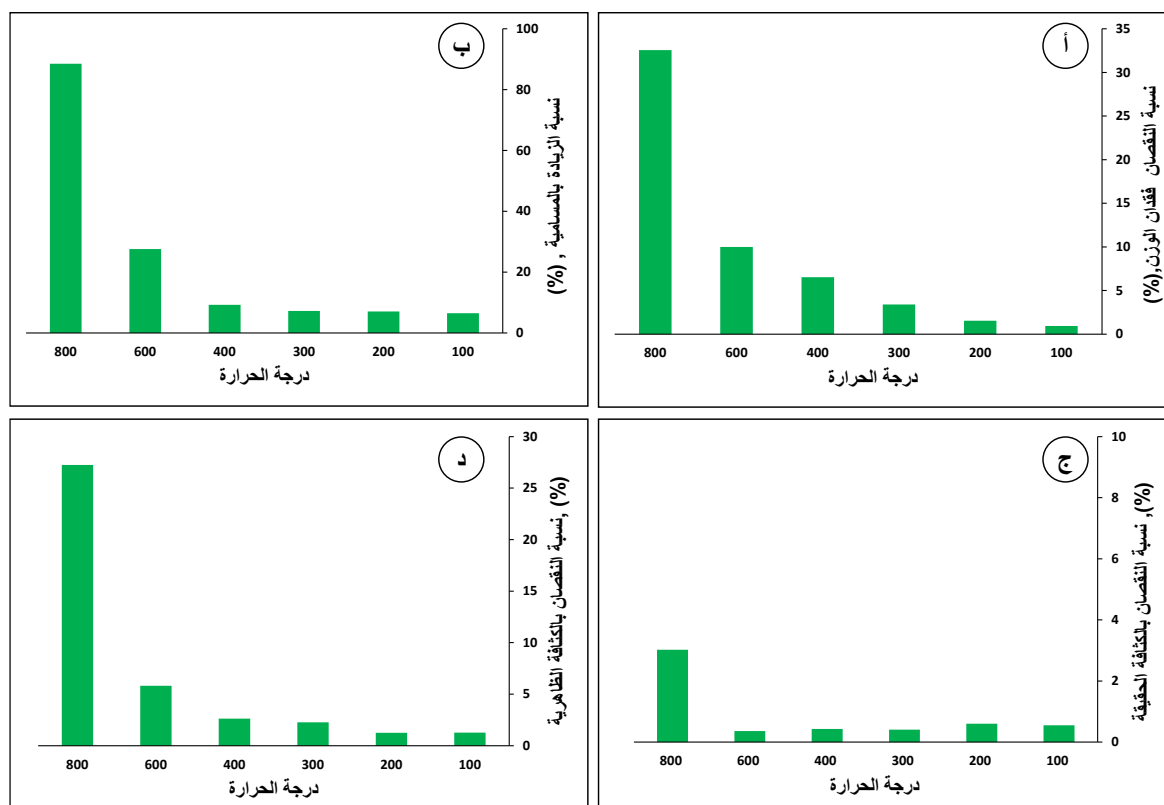
ان لون العينات الصخرية قبل الحرق (للعينات السليمة) هو لون الكريمي، يمكن ان نصف تغير لون العينات الصخرية وفقاً لتغير درجات الحرارة عند مراحل مختلفة، في المرحلة الأولى من 100-200 درجة سيليزية لم يلاحظ الا وجود تغيرات طفيفة جداً في اللون. اما في المرحلة الثانية من 200-300 درجة سيليزية اظهرت العينات الصخرية تغيرات واضحة في اللون حيث يصبح لون العينات الكريمي الباهت المحترق. في المرحلة الثالثة من 300-400 درجة سيليزية تغير لون العينات الى الرصاصي. في المرحلة الرابعة من 400-600 يزداد اللون الرمادي الداكن، وفي المرحلة الخامسة والأخيرة عند 800 درجة سيليزية يصبح لون العينات ابيضاً. يعود السبب لهذه التغيرات اللونية الى تحلل المعادن الموجودة داخل الصخرة او احتراق الشوائب الموجودة بنسب قليلة داخل التركيب المعدني للنماذج الصخرية. وهذه النتائج تتوافق مع نتائج الدراسات السابقة، حيث لاحظ الباحثون (Jodry et al., 2023) وجود تغيرات لونية عند تعرض الصخور الجيرية (باكو -اذريجان) الى درجات حرارة تصل الى 800 درجة سيليزية. لاحظ تغير اللون الكريمي الأصلي للحجر الجيري إلى اللون الأحمر عند 400 درجة سيليزية والرمادي عند 600 درجة سيليزية وعند 800 درجة سيليزية تحولت إلى اللون الأبيض. كما ذكر الباحثون (May-Crespo et al., 2021) سبب التغيرات اللونية الى وجود معادن الحديد بالإضافة الى ذلك تحول الجيوتايت الى الهيماتايت والثانية بسبب احتراق المواد العضوية التي تشكل الرماد.



الشكل 7. عينات الصخور بعد التعرض لدرجات الحرارة العالية.

فقدان الوزن

ان قيم فقدان في وزن العينات الجيرية مدرجة في الجدول (1). يبين تحليل النتائج بان التعرض لدرجات الحرارة العالية يؤدي الى فقدان في وزن العينات الصخرية بصورة متفاوتة. تم حساب نسبة النقصان في الوزن لهذه العينات وكما هو موضح في الشكل (8 أ). نلاحظ قيم فقدان في الوزن عند درجات حرارة تتراوح من 100-200 درجة سيليزية تكون ضئيلة بنسبة (0.94%-1.53%) ومع زيادة درجات الحرارة من 300-400 نلاحظ زيادة فقدان بالوزن بنسبة (3.36%-6.52%) وهذا يشير الى حدوث ضرر قليل عند درجات حرارة من 100-400 درجة سيليزية. بينما عند درجات الحرارة العالية 600-800 درجة سيليزية لوحظ بان فقدان بالوزن يكون بشكل كبير بنسبة (10.00%-32.57%) ويعود ذلك بسبب الصدمة الحرارية الناتجة من التبريد المفاجئ للنماذج بالماء بعد الحرق مباشرة وتمدد المعادن المكونة للعينات الصخرية بشكل كبير في مرحلة التسخين ومن ثم انكماشها في مرحلة التبريد. وهذا بدوره يسبب ظهور تشققات في السطح الخارجي للعينات الصخرية وأحيانا يحدث بعض الكسور في السطوح الخارجية للعينات. عندما تتعرض نماذج الحجر الجيري لدرجات الحرارة العالية تفقد جزءا من وزنها بسبب التغيير في التركيب المعدني لتلك النماذج. كما ان الدراسات السابقة تؤكد حصول تغيير في التركيب المعدني والذي يصاحبه فقدان بالوزن للنماذج الحجر الجيري بعد تعرضه لدرجات الحرارة العالية. ان هذه النتائج متطابقة مع نتائج الباحثين السابقين (Zhang et al., 2017b; Meng et al., 2020; Zhang et al., 2020; Kara, 2021; Guibaud et al., 2024). ان التغيرات في التركيب المعدني للنماذج الصخرية المتعرضة لدرجات الحرارة العالية سيتم مناقشتها لاحقا في الجزء الخاص بفحوصات حيود الاشعة السينية.



الشكل 8. (أ) التغير في نسبة فقدان بالوزن للعينات الصخرية بعد الحرق. (ب) التغير في نسبة الزيادة بالمسامية نتيجة الحرق بدرجات الحرارة المختلفة. (ج) التغير في نسبة النقصان في الكثافة الحقيقية للعينات الجيرية نتيجة الحرق بدرجات الحرارة المختلفة. (د) التغير في نسبة النقصان في الكثافة الظاهرية نتيجة الحرق بدرجات الحرارة المختلفة.

جدول 1: نتائج الخواص الفيزيائية والميكانيكية للعينات الصخور الجيرية قبل وبعد الحرق.

الخصائص	الحالة	درجة الحرارة (درجة سيليزية)					
		800	600	400	300	200	100
معدل الوزن (g) $\pm$ الانحراف المعياري	قبل الحرق	237.31 $\pm$ 0.46	236.99 $\pm$ 0.40	238.02 $\pm$ 0.55	234.90 $\pm$ 4.69	236.21 $\pm$ 0.86	235.50 $\pm$ 1.22
	بعد الحرق	160.02 $\pm$ 21.94	213.29 $\pm$ 2.25	222.50 $\pm$ 1.44	227.0 $\pm$ 10.03	232.60 $\pm$ 1.63	233.29 $\pm$ 1.75
معدل المسامية (%) $\pm$ الانحراف المعياري	قبل الحرق	21.58 $\pm$ 0.36	21.36 $\pm$ 0.11	21.31 $\pm$ 0.24	20.77 $\pm$ 0.39	20.95 $\pm$ 0.38	21.41 $\pm$ 0.20
	بعد الحرق	40.68 $\pm$ 2.33	27.24 $\pm$ 2.35	23.27 $\pm$ 0.16	22.28 $\pm$ 0.51	22.42 $\pm$ 0.31	22.80 $\pm$ 0.31
معدل الكثافة الحقيقية (g/cm ³) $\pm$ الانحراف المعياري	قبل الحرق	2.76 $\pm$ 0.03	2.75 $\pm$ 0.02	2.75 $\pm$ 0.01	2.75 $\pm$ 0.01	2.75 $\pm$ 0.01	2.76 $\pm$ 0.01
	بعد الحرق	2.67 $\pm$ 0.04	2.74 $\pm$ 0.01	2.74 $\pm$ 0.01	2.74 $\pm$ 0.01	2.74 $\pm$ 0.01	2.74 $\pm$ 0.02
معدل الكثافة الظاهرية (g/cm ³) $\pm$ الانحراف المعياري	قبل الحرق	2.18 $\pm$ 0.04	2.15 $\pm$ 0.01	2.17 $\pm$ 0.01	2.17 $\pm$ 0.01	2.16 $\pm$ 0.01	2.15 $\pm$ 0.02
	بعد الحرق	1.58 $\pm$ 0.04	2.02 $\pm$ 0.01	2.11 $\pm$ 0.01	2.12 $\pm$ 0.01	2.13 $\pm$ 0.01	2.12 $\pm$ 0.01
معدل امتصاص الماء الاجباري، (%) $\pm$ الانحراف المعياري	قبل الحرق	9.42 $\pm$ 0.94	9.92 $\pm$ 0.05	9.76 $\pm$ 0.07	9.82 $\pm$ 0.09	9.74 $\pm$ 0.20	9.97 $\pm$ 0.03
	بعد الحرق	25.72 $\pm$ 2.12	13.47 $\pm$ 1.09	11.07 $\pm$ 0.08	10.25 $\pm$ 0.96	10.53 $\pm$ 0.19	10.42 $\pm$ 0.45
معدل ارتفاع الماء الشعيري (cm/min ²) $\pm$ الانحراف المعياري	قبل الحرق	0.58 $\pm$ 0.07	0.61 $\pm$ 0.02	0.53 $\pm$ 0.03	0.54 $\pm$ 0.08	0.54 $\pm$ 0.09	0.54 $\pm$ 0.04
	بعد الحرق	0.85 $\pm$ 0.10	0.78 $\pm$ 0.19	0.66 $\pm$ 0.01	0.63 $\pm$ 0.05	0.60 $\pm$ 0.12	0.55 $\pm$ 0.04
معدل السرعة الموجية (km/sec) $\pm$ الانحراف المعياري	قبل الحرق	3.43 $\pm$ 0.07	3.40 $\pm$ 0.12	3.50 $\pm$ 0.03	3.42 $\pm$ 0.09	3.40 $\pm$ 0.06	3.42 $\pm$ 0.02
	بعد الحرق	2.02 $\pm$ 0.19	2.96 $\pm$ 0.02	3.26 $\pm$ 0.12	3.28 $\pm$ 0.09	3.34 $\pm$ 0.06	3.38 $\pm$ 0.02
معدل مقاومة الانضغاط (MPa) $\pm$ الانحراف المعياري	قبل الحرق	13.35 $\pm$ 0.40					
	بعد الحرق	4.14 $\pm$ 0.34	8.01 $\pm$ 0.80	10.20 $\pm$ 0.25	11.10 $\pm$ 0.18	11.88 $\pm$ 0.95	13.31 $\pm$ 0.02

المسامية والكثافة الحقيقية والظاهرية

تعتبر فحوصات المسامية والكثافة الحقيقية والكثافة الظاهرية من نوع الفحوصات غير الإتلافية حيث يمكن اجراء الفحص على العينات الصخرية قبل وبعد الحرق. تم حساب قيم المسامية الكلية والكثافة الحقيقية والكثافة الظاهرية (حساب المعدل لثلاث فحوصات والانحراف المعياري) باستخدام المعادلات 1 و 2 و 3 على التوالي (RILEM, 1984) ، وتم سرد قيم المعدل لهذه الخصائص الثلاثة في الجدول (1).

تشير النتائج الى ان قيم المسامية للنماذج قبل الحرق تتراوح بين (20.39 % الى 21.79 %) وهي قيم متوسطة المسامية لنوع الحجارة الجيرية التابعة للعصر الجيولوجي لتكوين فتحة وبالتحديد في منطقة عين الصفرة لموقع الدراسة الحالية. وهنا يمكن القول بان العينات الصخرية السليمة تمتاز بوجود المسامات المفتوحة والمستمرة مع وجود تماسك جيد للحبيبات والمعادن التكوينية. بعد التعرض لمدى واسع من درجات الحرارة (100 – 800) درجة سيليزية، كشف تحليل النتائج بان نسب الزيادة في المسامية الكلية للعينات الصخرية تكون في ثلاث حالات مختلفة وكما مبينة في الشكل (8 ب). في الحالة الأولى عندما تتراوح درجات الحرارة من 100-200 درجة سيليزية تزداد المسامية بشكل طفيف بنسبة (6.49% ، 7.02%). في المرحلة الثانية عندما تتراوح درجات الحرارة ما بين 300-400 درجة سيليزية تزداد المسامية بشكل ملحوظ بنسبة (7.27% ، 9.20%) ويعود السبب الى التوسع الحجمي والصدمة الحرارية التي تتعرض لها العينة اثناء التبريد. في المرحلة الثالثة لدرجات الحرارة بحدود 600-800 درجة سيليزية تزداد المسامية بشكل كبير بنسبة (27.53% ، 88.51%)، وتسبب اضراراً مدمرةً لعينات الحجارة حيث يلاحظ تشكل الكسور والشقوق الواسعة في العينات الجيرية.

يعرض الشكل (8 ج) نسبة النقصان في الكثافة الحقيقية للنماذج الجيرية نتيجة التعرض لدرجات الحرارة العالية. إذ لم يلاحظ وجود اختلافات كبيرة في العينات المفحوصة عند درجات الحرارة العالية وحتى درجة الحرارة 600 مما يشير الى عدم تغيير المعادن المكونة للنماذج نتيجة التعرض للحرارة فضلاً عن حقيقة ان التغيرات في المسامية او استحداث الشقوق للنماذج الجيرية نتيجة الحرارة العالية لن يؤثر على قيم الكثافة الحقيقية. من جهة اخرى لوحظ وجود نقصان في الكثافة الحقيقية و بحدود 3.02 % عند درجات الحرارة 800 درجة سيليزية. ويعود السبب في ذلك الى التغيير الحاصل للتركيب

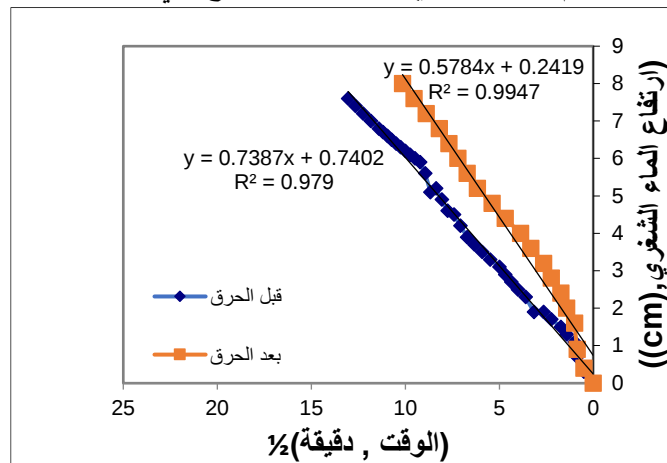
المعدني للعينات الجيرية عند درجات الحرارة العالية 800 درجة سيليزية، وكما سيتم الإشارة الى ذلك في تحليل نتائج فحص حيود الاشعة السينية (XRD test). ذكر (Ozguven and Ozcelik, 2014) ان قيم الكثافة الحقيقية تتعرض الى تغيرات طفيفة جدا بعد التسخين، وعندما تكون درجات حرارة التسخين اقل من درجة تفكك الكربونات (900 درجة سيليزية) لا تحدث تغيرات في قيم الكثافة الحقيقية بحيث تتكون الصخور الجيرية بشكل أساس من كربونات الكالسيوم النقية مع نسب قليلة من المغنسيوم.

يعرض الشكل (8 د) نسبة النقصان في الكثافة الظاهرية للنماذج الجيرية نتيجة التعرض لدرجات الحرارة العالية. تشير النتائج الى ان الكثافة الظاهرية تتأثر بشكل طفيف جدا عندما تتعرض النماذج لدرجات الحرارة بحدود 100-200 درجة سيليزية. في حين نلاحظ عند المستويات الاعلى لدرجات الحرارة بحدود 300-400 درجة سيليزية بان نسبة النقصان في الكثافة الظاهرية تزداد قليلا حيث تصل الى 2% و 3% تقريبا لدرجة الحرارة 300-400 على التوالي. وعندما تكون درجة الحرارة بحدود 600-800 درجة سيليزية نلاحظ نقصاناً بالكثافة الظاهرية بصورة واضحة وخاصة عند درجة الحرارة 800 درجة سيليزية. ويعود السبب في ذلك الى تحول الفراغات المسبقة الوجود الى فراغات اكبر او شقوق مستمرة (كما سيتم الإشارة الى هذه الشقوق في الفحوصات المجهرية المايكروية للشرائح الرقيقة)، وهنا يمكن القول بان الحرارة العالية تتسبب في تمدد بلورات معدن الكاليسيت مما يتسبب في استحداث الشقوق وهذا ما اشارت اليه الدراسة السابقة لـ (Ugur et al., 2014). كما ان السبب في ذلك يعود الى تأثير الصدمة الحرارية التي تتعرض لها العينات المبردة بالماء.

فحص امتصاص الماء الاجباري وفحص ارتفاع الماء الشعيري

تم قياس قيم الامتصاص الاجباري وفقاً للمواصفة NF EN1925 B10-613، كما تم قياس قيم معامل ارتفاع الماء الشعيري وفقاً للمواصفة (RILEM, 1984)، وذلك لكل من العينات السليمة والعيّنات التي تم تسخينها لمدى واسع من درجات الحرارة (800-100) درجة سيليزية، وقيم هذه الخصائص مدرجة في الجدول (1).

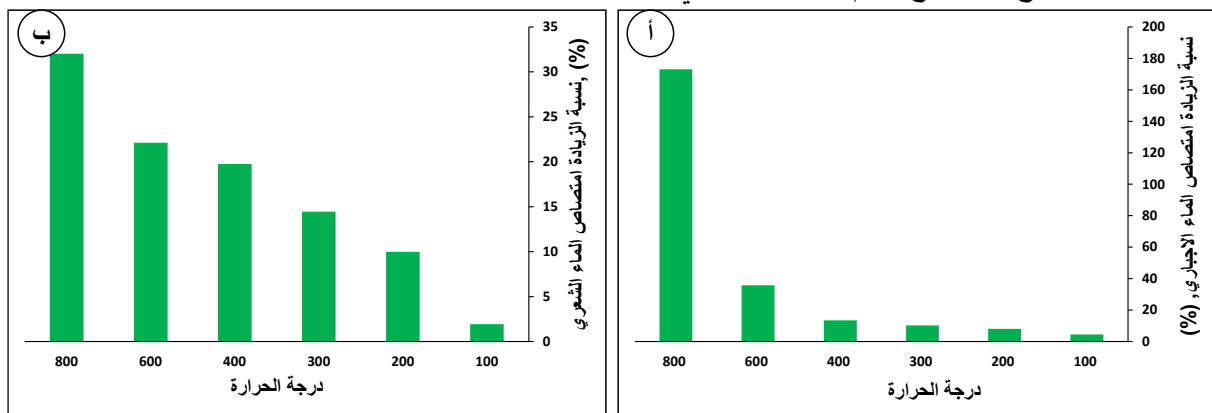
في فحص مبدا ارخميدس وباستخدام المعادلة (4) تم حساب قيم معامل الامتصاص الاجباري، بينما قيم معامل ارتفاع الماء الشعيري فيمكن الحصول عليها من فحص ارتفاع الماء الشعيري. ان معامل ارتفاع الماء الشعيري يمثل ميل الخط المستقيم الذي يربط العلاقة بين ارتفاع الماء الشعيري والجذر التربيعي للوقت وكما مبين في الشكل (9). وتجدر الإشارة الى ان قيم ارتفاع الماء الشعيري تم قياسها مختبرياً وعلى طول النموذج وفي اوقات مختلفة اثناء الفحص.



الشكل 9. نتائج فحص ارتفاع الماء الشعيري للعيّنات السليمة قبل الحرق وبعد الحرق بدرجة حرارة 600 درجة سيليزية.

تشير النتائج الى ان قيم معامل امتصاص الماء الاجباري وقيم معامل ارتفاع الماء الشعيري للعينات السليمة تتراوح ما بين (8.39 الى 10.22) % و (0.44 الى 0.64) $\text{cm/min}^{0.5}$ على التوالي. وهذه القيم تشير الى ان العينات الصخرية في هذه الدراسة تمتلك قابلية امتصاص متوسطة الى عالية. وهنا يمكن القول بان العينات الصخرية السليمة تمتاز بوجود

المسامات المفتوحة والمستمرة مع وجود تماسك جيد للحبيبات والمعادن التكوينية. عند تعريض العينات الصخرية للحرق فإن كلا من قيم امتصاص الماء الاجباري وقيم معامل ارتفاع الماء الشعيري تزداد بالمقارنة مع العينات الصخرية السليمة قبل الحرق. ان نسبة الزيادة في قيم امتصاص الماء لكلا الفحصين مبينة في الشكل (10). في المرحلة الأولى عندما تتراوح درجة الحرارة من 100-200 يزداد امتصاص الماء بشكل قليل جدا وفي المرحلة الثانية عندما تتراوح درجة الحرارة من 300-400 يزداد امتصاص الماء بشكل أكبر مقارنة مع درجات الحرارة 200 و100. ويعود السبب الى التوسع الحجمي للعينات الصخرية وزيادة الشقوق المسبقة الوجود واستحداث الشقوق الجديدة بعد الحرق. في المرحلة الثالثة عندما تتراوح درجات الحرارة من 600-800 يزداد امتصاص الماء بشكل كبير بسبب زيادة حجم الشقوق وحدث بعض التكسرات في العينات اثناء الحرق. اشار الباحثان (Ozguven and Ozcelik, 2014) الى ان قيم كل من فحص الامتصاص الحر (امتصاص الماء تحت ظروف الضغط الجوي) وفحص الارتفاع الشعيري لا تتغير كثيرا بعد حرق العينات الصخرية الجيرية بدرجات الحرارة من 100-200 درجة سيليزية ويكون التغيير واضحا في حالة حرق العينات بدرجات الحرارة الاعلى، وهذه النتائج تتوافق مع ما تم التوصل اليها في هذه الدراسة.



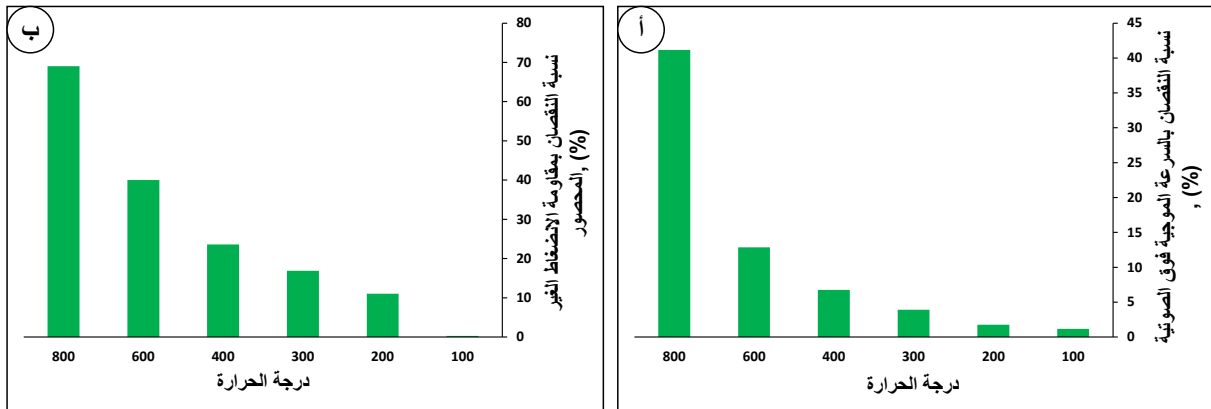
الشكل 10. (أ) التغير في نسب الزيادة في امتصاص الماء الاجباري، (ب) التغير في نسب الزيادة في معامل ارتفاع الماء الشعيري للعينات الصخرية بعد التعرض للحرق.

الخصائص الميكانيكية

اشارت الفقرات السابقة الى حدوث العديد من التغيرات في الخصائص الفيزيائية للعينات الصخرية عند مستويات مختلفة بعد تعرضها للحرق، ومما لا شك ان ذلك سيؤدي الى الكثير من التغيرات في الخصائص الميكانيكية للعينات الصخرية أيضاً. ونتيجة لتعرض العينات الصخرية للحرق فإن قيم خاصية السرعة الموجية فوق الصوتية تقل بالمقارنة مع العينات الصخرية السليمة قبل الحرق، تم سرد النتائج في جدول (1). إن النقصان في خاصية السرعة فوق الصوتية للعينات الصخرية المتعرضة لدرجات الحرارة العالية يسلط الضوء على دور المسامية في تحديد الخواص الميكانيكية للعينات الصخرية. تشير سرعات الموجة فوق الصوتية المنخفضة في العينات الصخرية المتعرضة للحرق إلى وجود نسبة عالية من المسام داخل النسيج الداخلي لتلك العينات، مما قد يؤثر على متانته وديمومته للحرق. تم حساب نسبة النقصان لخاصية الموجة فوق الصوتية للعينات الصخرية المحترقة بمدى واسع لدرجات الحرارة العالية كما في الشكل (11). في المرحلة الأولى عندما تتراوح درجات الحرارة من 100-200 درجة سيليزية نلاحظ وجود تغيرات طفيفة في السرعة الموجية. وفي المرحلة الثانية عندما تزداد درجة الحرارة من 300-400 درجة سيليزية تقل السرعة الموجية بشكل ملحوظ بسبب زيادة الشقوق الموجودة في الصخور نتيجة الحرارة. في المرحلة الثالثة عند زيادة درجة الحرارة من 600-800 درجة سيليزية تقل السرعة الموجية بشكل كبير. ان اعلى انخفاض يسجل عند 800 درجة سيليزية حيث تصل نسبة الانخفاض الى (41.17)%. ويعود السبب في ذلك الى زيادة نسبة المسامات في النماذج بعد الحرق وكذلك استحداث الشقوق الجديدة وزيادة حجم الشقوق المايكروية المسبقة الوجود، وهذا بدوره يؤدي الى استحداث وسط فراغي في النماذج مما يقلل من

السرعة فوق الصوتية. وهذه النتائج تتفق مع الباحثين السابقين (Andriani and Martínez-Ibáñez et al., 2020 b). (Germinario, 2014;).

فيما يتعلق بفحص مقاومة الانضغاط غير المحصور (Unconfined compressive strength, UCS)، فإن هذا الفحص يعتبر من الفحوصات الإتلافية ولا يمكن إجراؤه على نفس العينات قبل وبعد الحرق. في هذه الحالة تم قياس مقاومة الانضغاط غير المحصور للعينات السليمة ومقارنتها مع العينات بعد الحرق بمدى واسع لدرجات الحرارة العالية (100-800) درجة سيليزية، ونتائج هذا الفحص مدرجة في الجدول (1). من مقارنة القيم لمقاومة الانضغاط غير المحصور للعينات المحترقة مع العينات السليمة يتبين بأن هناك فرق واضح في تأثير الحرق. يبين الشكل (12) نسبة النقصان في مقاومة الانضغاط غير المحصور للعينات الصخرية بعد الحرق عند درجات الحرارة العالية. ان نسبة النقصان في مقاومة الانضغاط غير المحصور للعينات المحترقة عند 100 درجة سيليزية تكون قليلة جدا بحدود (0.29 %)، بينما للعينات المحترقة بدرجة حرارة 200، 300، 400 درجة سيليزية فتكون نسبة النقصان (11.03 %، 16.89 %، 23.61 %) على التوالي. أما قيم درجات الحرارة العالية فتكون نسبة النقصان فيها كبيرة جدا تقريبا بمقدار (40.01 %) و (69.01 %) عند درجة حرارة 600 و 800 درجة سيليزية على التوالي. يمكن تعليل هذه النتائج الى ان ارتفاع درجات الحرارة الذي يؤدي الى استحداث الشقوق الجديدة وتوسيع الشقوق الأولية، كما ان التبريد المائي المفاجئ يولد شقوقاً اضافية تؤثر على العينة بأكملها مما يؤدي الى انخفاض مقاومة الانضغاط. بالإضافة إلى ذلك، فإن الفقد التدريجي للمياه الداخلية المرفقة والمياه المرتبطة بالمعادن والانتقال المرحلي وتحلل بعض المعادن يؤدي إلى زيادة المسامية وبالتالي الى نقصان مقاومة الانضغاط.



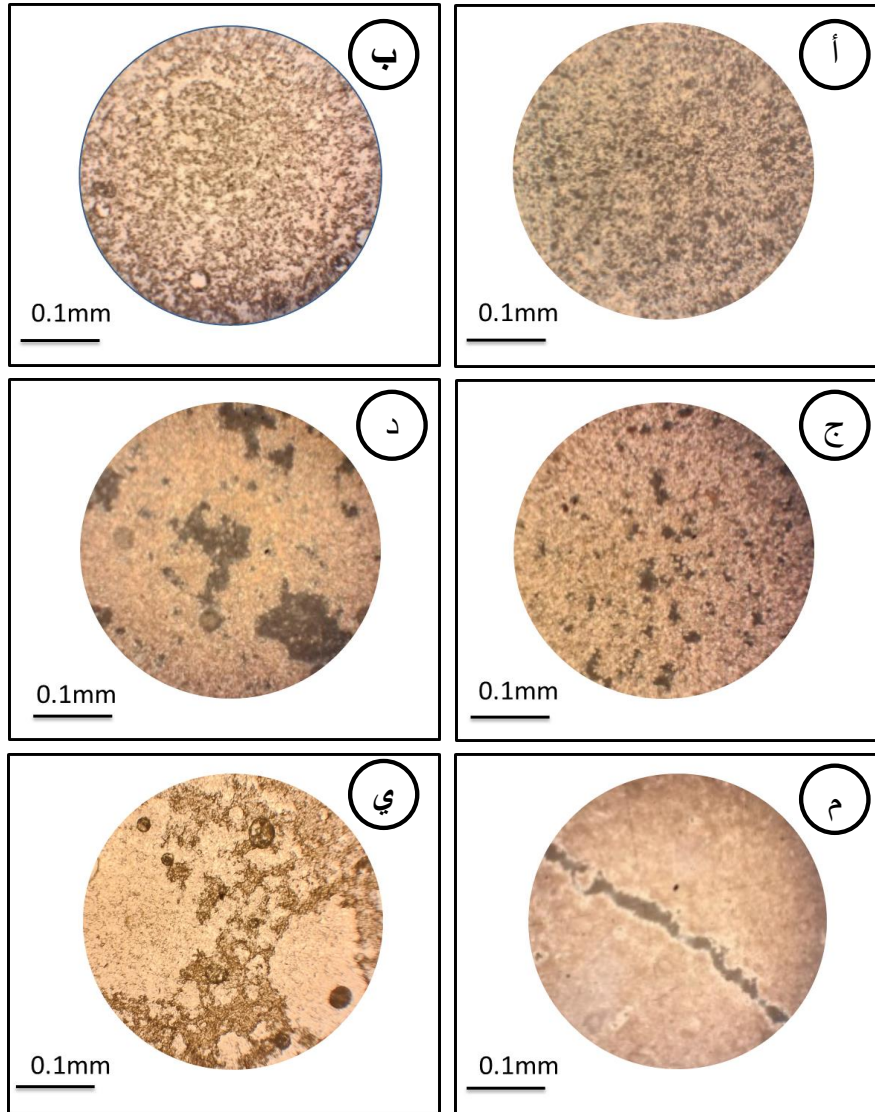
الشكل 11. (أ) التغيرات في نسب النقصان في السرعة فوق الصوتية للعينات الصخرية بعد التعرض للحرق، (ب) التغيرات في نسبة النقصان بمقاومة الانضغاط للعينات الصخرية بعد الحرق.

الخصائص المعدنية والنسيج

يعتبر تحليل نتائج الشرائح الرقيقة (Thin section) أمراً مفيداً، حيث يبين تأثير عمليات الحرق على التركيب الداخلي وتشكيل وتوزيع المسامات واستحداث الشقوق الجديدة او توسع الشقوق المسبقة الوجود في عينات الصخور المحترقة. الشكل (13) يعرض صوراً للتركيب الداخلي للعينات المعرضة للحرق في هذه الدراسة والتي تم التقاطها باستخدام المجهر الضوئي المستقطب.

تؤكد نتائج هذا الفحص تفسير نتائج الفحوصات السابقة للخصائص الفيزيائية والميكانيكية والتي تمت الإشارة إليها في الفقرات في اعلاه. يمكن وصف توزيع المسامات وانتشار الشقوق في العينات الصخرية المحترقة بمدى واسع لدرجات الحرارة (100 - 800) درجة سيليزية في ثلاث مراحل مختلفة: في المرحلة الأولى عند درجة حرارة 100-200 درجة سيليزية نلاحظ وجود مسام منتظمة الحجم وغير متأثرة كثيراً بعملية الحرق. في المرحلة الثانية، عندما تتراوح درجة الحرارة

بين 300 و 400 درجة سيليزية تبدأ المسامات الشكلية في الظهور، وهناك ارتفاع ملحوظ في كل كمية المسام داخل الصخرة. وفي المرحلة الثالثة، التي تقع بين 600 و 800 درجة سيليزية، يبدأ هيكل العينة والنسيج الداخلي في التدهور في الوقت الذي تتشكل فيه المسامات والتكسرات في التركيب الداخلي للعينات الصخرية. تتوافق النتائج في هذه الدراسة تماماً مع ما ذكره الباحثون (Meng et al., 2020) في دراستهم بأن كسور الشد شائعة في عينة الصخر عند درجات حرارة منخفضة، بينما كسور القص تبدأ في الظهور وتزداد سوءاً تدريجياً عندما تصل درجة الحرارة إلى 600-800 درجة سيليزية. وأن الاختراق والانتشار الجزئيين الصغيرين للشقوق ملحوظان بدرجة أكبر بكثير في درجات الحرارة العالية مما هي عليه في درجات الحرارة المنخفضة.



شكل 13. التركيب الداخلي للعينات الصخرية بعد الحرق - فحص المجهر الضوئي المستقطب (thin section): (أ) 100 درجة سيليزية، (ب) 200 درجة سيليزية، (ج) 300 درجة سيليزية، (د) 400 درجة سيليزية، (م) 600 درجة سيليزية، (ي) 800 درجة سيليزية.

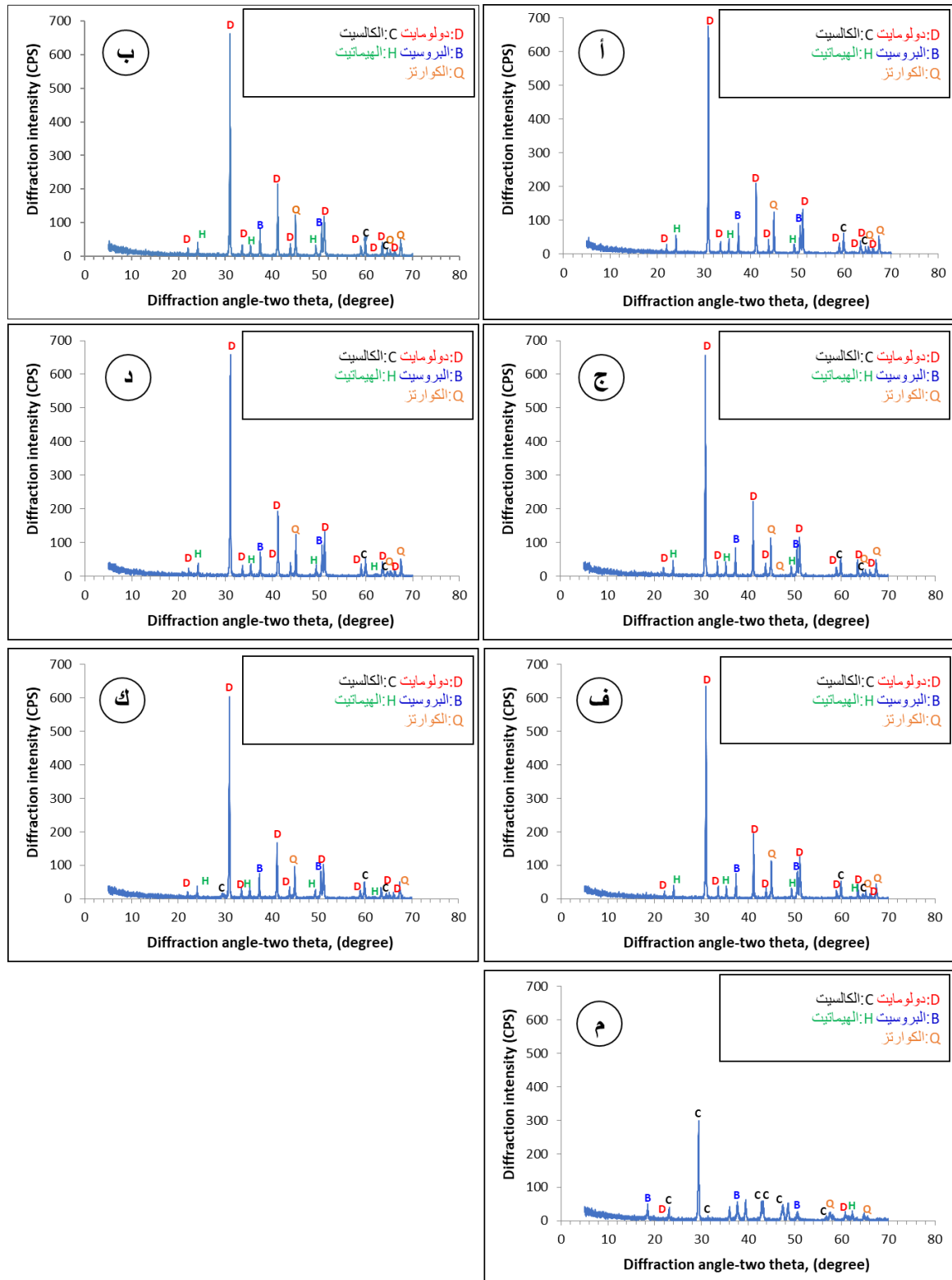
كما يعتبر فحص الـ XRD من الفحوصات المايكروية والتي تعزز تفسير النتائج المستحصلة من فحص الشرائح الرقيقة. في هذه الدراسة تم اجراء فحص حيود الاشعة السينية XRD لكل من العينات الصخرية السليمة والعينات المعرضة للحرق لمدى واسع لدرجات الحرارة (100-800) درجة سيليزية. بينت النتائج ان العينات الصخرية بصورة عامة هي من نوع الحجر الجيري الدولومايتي $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. ان حيود الاشعة السينية لمجموعة من العينات الصخرية السليمة وللعينات المعرضة للحرق مبينة في الشكل (14). يلاحظ بأنه مع ارتفاع درجات الحرارة فان التركيب المعدني الرئيس وزاوية الحيود وشدة الحيود متشابهة نسبياً ولغاية درجة حرارة الحرق 600 درجة سيليزية. ان المكونات المعدنية للحجر

الجيري (الدولومايت والكالسيت) تشير إلى أن التركيب الكيميائي للحجر الجيري والبلورة لا يتغيران بشكل كبير مع ارتفاع درجات الحرارة، ان المعادن المكونة للعينات الصخرية مدرجة في الجدول (2). تشير هذه النتائج الى تشابه أنماط حيود الاشعة السينية للعينات الصخرية عندما تكون درجة الحرارة من 100-600 درجة سيليزية مع عدم وجود تغيير ملحوظ في التركيب المعدني. عند 800 درجة سيليزية لوحظ نقصان واضح في معدن الدولومايت $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ نتيجة تحول جزء كبير منه الى الكالسايت CaCO_3 ونقصان نسبي في معدن الهيماتايت. ويمكن القول بان التغير في التركيب المعدني يبدأ عند 800 درجة سيليزية حيث يتحول الدولومايت الى الكالسايت وتزداد نسبة الاخير (اي الكالسايت) بدرجة كبيرة. تتوافق هذه النتائج مع نتائج الدراسة التجريبية لـ (Meng et al., 2020; Zhang and Lv, 2020) ، حيث تمت الاشارة الى ان الدولومايت يتحلل بصورة تدريجية الى الكالسايت CaCO_3 والى المغنيسايت MgCO_3 عند درجة حرارة بين 700 - 800 درجة سيليزية. كما ان المغنيسايت يتحلل الى MgO و CO_2 مما يؤدي الى نقصان حاد في وزن العينات المحترقة بدرجة الحرارة والى حد 800 درجة سيليزية.

الرقم الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية

من المهم قياس الرقم الهيدروجيني (pH) والتوصيلية الكهربائية (EC) لكل من العينات الجيرية السليمة والمتعرضة لدرجات الحرارة العالية. تشير قيم pH إلى تركيز أيونات الهيدروجين، ويشير قياس التوصيلية الكهربائية الى العدد الإجمالي للأيونات الموجودة في العينة.

يشير الجدول (3) الى القيم المقاسة للرقم الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية للعينات الصخرية قبل وبعد الحرق. في المرحلة الأولى عند درجات حرارة تتراوح ما بين 100-200 درجة سيليزية تكون نسبة الزيادة في الرقم الهيدروجيني قليلة جدا تتراوح ما بين 0.41% و 1.76%. في المرحلة الثانية عند درجات حرارة بين 300-400 درجة سيليزية تكون نسبة الزيادة متوسطة 4.14% و 4.95%. وأخيرا، في المرحلة الثالثة عند درجات حرارة بين 600-800 درجة تكون نسبة الزيادة هذه بحدود 12.98% و 41.40% وهي نسبة كبيرة ومؤثرة. وبذلك يمكن القول بان قيم pH تزداد مع زيادة درجة حرارة الحرق للعينات الجيرية. ويمكن تفسير هذه النتائج بان CaO الناتج من تحلل الكالسايت سرعان ما يتحلل مرة اخرى مع وجود الماء ليكون $\text{Ca}(\text{OH})_2$ وبذلك تزداد قيم pH. ان هذه النتائج وجدت متوافقة مع نتائج الباحثين السابقين (Kara, 2021)، حيث تم حرق العينات بدرجة حرارة تراوحت ما بين 20 و 700 درجة سيليزية. استنتج الباحث في دراسته بان قيم الرقم الهيدروجيني (pH) تزداد مع زيادة درجة حرارة الحرق.



الشكل 14. نتائج فحص XRD للعينات الجيرية قبل وبعد الحرق: (أ) عينات سليمة، (ب) 100 درجة سيليزية، (ج) 200 درجة سيليزية، (د) 300 درجة سيليزية، (هـ) 400 درجة سيليزية، (و) 600 درجة سيليزية، (ز) 800 درجة سيليزية.

كما هو معروف جيداً فإن الزيادة في قيم الرقم الهيدروجيني تتسبب في زيادة التوصيلية الكهربائية. أكدت الدراسة الحالية بأن نسبة الزيادة في التوصيلية الكهربائية كانت واضحة للعينات الصخرية المتعرضة للمدى الواسع لدرجات الحرارة. بالمقارنة مع التوصيلية الكهربائية للعينات الصخرية السليمة، كانت نسبة الزيادة الكبيرة عند 600 درجة سيليزية وكذلك عند 800 كانت نسبة الزيادة هي الأكبر على الإطلاق (الجدول 3). وهنا يمكن القول بأن الزيادة في قيم pH وقيم EC مع

ارتفاع درجة الحرارة ناتجة عن إذابة أكاسيد MgO و CaO في الماء وتحويله إلى هيدروكسيدات $Mg(OH)_2$ و $Ca(OH)_2$ (Kara, 2021).

يتضح مما سبق بأن نتائج قيم الرقم الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية متوافقة مع ما تم الحصول عليه للنتائج السابقة لهذه الدراسة لفحوصات الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، وايضا لفحوصات المايكروية. حيث ان تأثير درجات الحرارة يكون واضحاً ومؤثراً في درجات الحرارة العالية عند المدى 600 – 800 درجة سيليزية.

جدول 2: أنواع ومحتويات المعادن لعينات الحجر الجيري المتعرضة لدرجات حرارة عالية.

المعادن	عند درجة الحرارة (درجة سيليزية)						
	عينات سليمة	100	200	300	400	600	800
الكالسايت	3.7	3.7	3.1	3.3	3.4	3.6	72.7
البروسايت	9.7	9.7	9.4	9.7	9.6	10.4	12.0
الدولومايت	69.4	70.0	68.7	71.4	71.0	71.0	3.3
الهيماتايت	6.1	5.6	5.5	5.0	5.7	5.5	2.2
الكوارتز	11.0	10.9	13.3	10.6	10.3	9.4	9.8

جدول 3: نتائج الرقم الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية قبل وبعد الحرق.

درجة الحرارة	الرقم الهيدروجيني	نسبة الزيادة بالرقم الهيدروجيني، (%)	الموصيلية الكهربائية (μS)	نسبة الزيادة بالموصيلية الكهربائية، (%)
عينات سليمة	8.14 ± 0.02	---	195.63 ± 7.48	---
100 درجة سيليزية	8.17 ± 0.05	0.41	223.33 ± 30.23	14.16
200 درجة سيليزية	8.28 ± 0.02	1.76	249.67 ± 3.51	27.62
300 درجة سيليزية	8.48 ± 0.03	4.14	271.67 ± 1.53	38.87
400 درجة سيليزية	8.54 ± 0.04	4.95	276.25 ± 6.01	41.21
600 درجة سيليزية	9.20 ± 0.04	12.98	351.33 ± 13.65	79.59
800 درجة سيليزية	11.51 ± 0.04	41.40	1172.67 ± 26.57	499.43

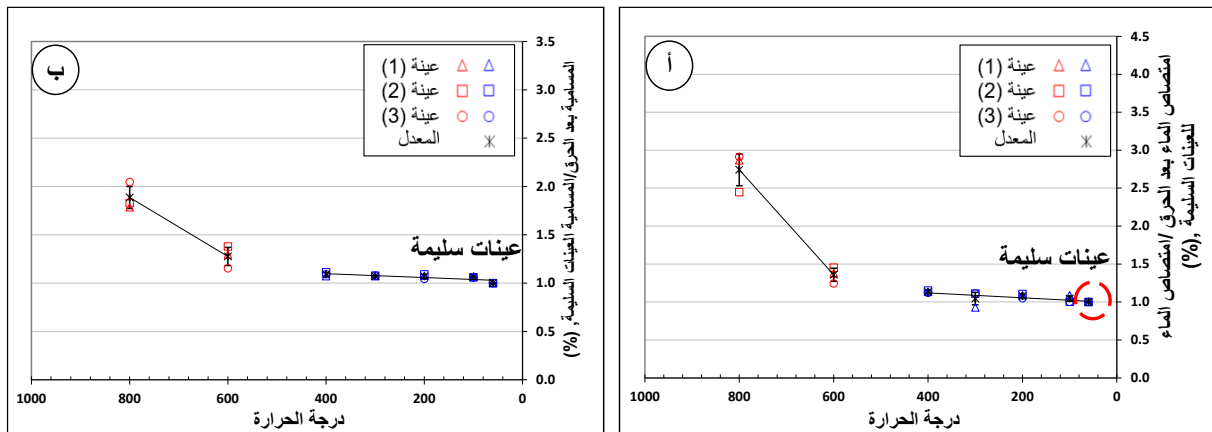
درجة الحرارة الفعالة

تبنت الدراسة الحالية التحري عن درجة الحرارة الفعالة من خلال اجراء مقارنة لبعض الخصائص للعينات الصخرية. احدى الطرق المهمة في تحديد هذه المقارنة هو قياس النسب الموزونة (Normalized values) لخصائص العينات الصخرية. ان القيم الموزونة تمثل نسبة قيمة خاصية معينة للعينة الصخرية المتعرضة لدرجة حرارة معينة (100 او 200 او 300 او 400 او 600 او 800) الى قيمة نفس الخاصية للنماذج السليمة. تم احتساب القيم الموزونة لبعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية للعينات الصخرية عند درجات الحرارة المختلفة وكما مبينة في الاشكال (15 و 16 و 17). لكل حالة تم حساب المعدل لثلاث عينات صخرية، كما تم احتساب المعدل والانحراف المعياري لكل درجة حرارة معينة.

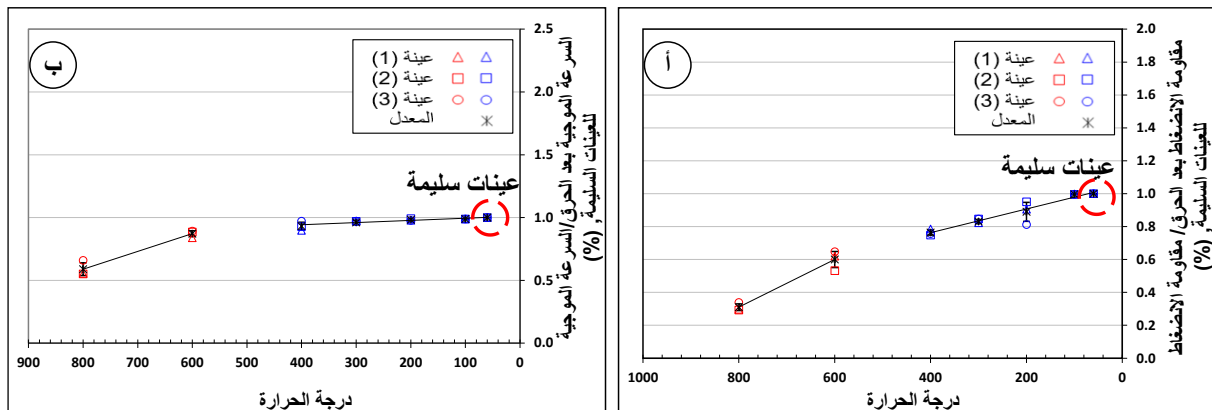
يعرض الشكل (15) نتائج فحوصات الخصائص الفيزيائية (المسامية وامتصاص الماء الاجباري)، بينما يبين الشكل (16) نتائج فحوصات الخصائص الميكانيكية (مقاومة الانضغاط غير المحصور والسرعة فوق الصوتية)، كما ان نتائج فحوصات الخصائص الكيميائية (الرقم الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية) مبينة في الشكل (17). في هذه الاشكال يمكن تمثيل خصائص العينات الجيرية بنوعين من المنحنيات الخطية، مما يوضح اتجاهات متميزة لقيم خصائص العينات الجيرية. الخطوط المتصلة تمثل أفضل خط اتجاه لكلا المجموعتين للقيم الموزونة القريبة من الواحد (المرتبطة بالنقاط الزرقاء) والقيم الموزونة البعيدة من الواحد (المرتبطة بالنقاط الحمراء). ان تحليل النتائج في هذه الاشكال يشير الى وجود تأثير قليل يكاد يكون معدوماً على سلوك العينات الجيرية في مدى درجات الحرارة التي تتراوح ما بين 100 – 400 درجة سيليزية حيث تكون القيم الموزونة لخصائص العينات الجيرية قريبة من الواحد. بينما التأثير يكون حاسماً ومؤثراً في سلوك

العينات الجيرية عند درجات الحرارة التي تزيد عن 600 - 800 درجة سيليزية. وبذلك يمكن القول بان ميل المنحنيات الخطية اتخذ نمطين رئيسيين مختلفين: الميل البسيط للخط الازرق والميل العالي والشديد للخط الاحمر، حيث تحتوي الخطوط الحمراء على منحدرات أعلى ولا سيما المرتبطة بالعينات الجيرية الأكثر تعرضاً للحرارة العالية. يمكن تمييز نقطة النقاء الخطين عند مدى درجات الحرارة المحصورة ما بين 400 - 600 درجة سيليزية، مما يشير إلى وجود نقطة العتبة الحرجة لدرجة الحرارة الفعالة في هذا المدى المحدود والتي تمثل الحد الفاصل للتغيير الذي يحصل في سلوك العينات الجيرية المتعرضة للحريق.

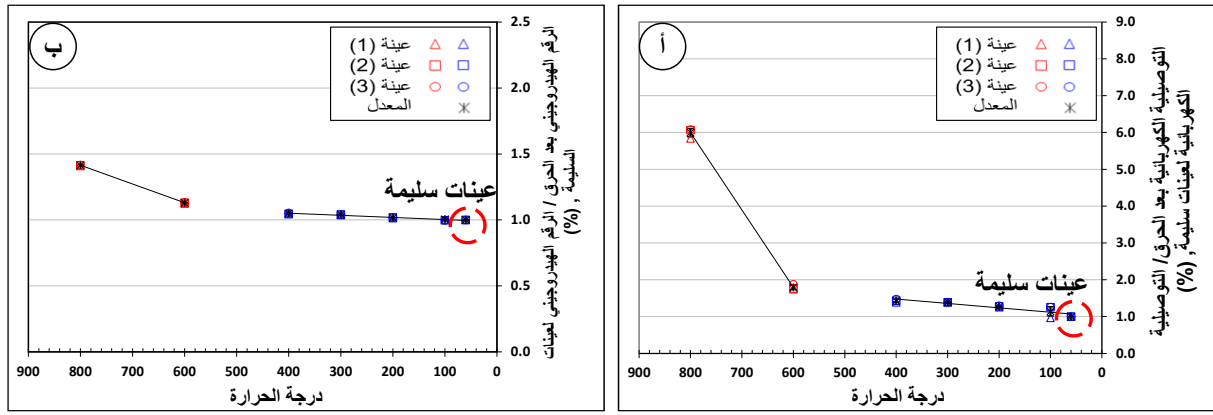
يشير تحليل النتائج اعلاه الى ان العينات الجيرية بعد تعرضها للحريق في المديات المحصورة لدرجات الحرارة (100 الى 400) درجة سيليزية ممكن ان تحتفظ بجزء فعال من خصائصها الفيزيائية والميكانيكية، وبالتالي الاحتفاظ بجزء مهم من مقاومتها وديمومتها ضد عمليات التعرية المختلفة. الا ان هذا الجزء الفعال لا شك ان يكون اقل بالمقارنة مع حالة العينات الصخرية السليمة. في هذه الحالة يتطلب الأمر اجراء فحوصات الديومومة المختلفة، مثل فحص الانجماد والذوبان او فحص الترطيب والتجفيف او فحص التآكل او غيرها من فحوصات الديومومة الاخرى، لكلٍ من العينات الصخرية السليمة والعينات الجيرية المتعرضة للمدى المحصور من درجات الحرارة ما بين 100-400 درجة سيليزية. ان تحليل نتائج هذه الفحوصات ستمكن من تحديد درجة حرارة الحريق الحرجة التي تمثل عاملاً مسيطراً في تغيير سلوك العينات الجيرية المعرضة للحريق. لم يسبق التطرق الى تحديد درجة حرارة الحريق الحرجة في الدراسات السابقة، وتعتبر نتائج البحث الحالي رائدة ضمن الأعمال البحثية التي تم تنفيذها والجاري تنفيذها، بما في ذلك تحديد درجة حرارة الحريق الحرجة فيما يتعلق بالحجر الجيري من مدينة الموصل.



الشكل (15). القيم الموزونة للخواص الفيزيائية لعينات الصخور الجيرية السليمة وبعد الحرق (أ) قيم امتصاص الماء، (ب) قيم المسامية.



الشكل 16. القيم الموزونة للخواص الميكانيكية الطبيعية لعينات الصخور الجيرية السليمة وبعد الحرق (أ): قيم مقاومة الانضغاط، (ب) قيم السرعة الموجية.



الشكل 17. القيم الموزونة للخواص الكيميائية لعينات الصخور الجيرية وبعد الحرق (ا) قيم التوصيلية الكهربائية، (ب) قيم الرقم الهيدروجيني.

الاستنتاجات

- ان اهم الاستنتاجات المستحصلة في هذه الدراسة يمكن أدرجها بالنقاط التالية:
- أظهرت النتائج أنه في درجة حرارة 400 درجة سيليزية، كانت هناك تغييرات طفيفة في معظم الخواص المختلفة (الفيزيائية والميكانيكية). حيث لوحظ وجود تغيرات كبيرة في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية فوق 400 درجة سيليزية، وخاصة بين 600 و 800 درجة سيليزية، بما يتوافق مع التغيرات المعدنية.
- تزداد المسامية وفحص امتصاص الماء الاجباري وفحص الخاصية الشعرية بشكل بسيط عند درجات حرارة تتراوح من 100-400 درجة سيليزية وتزداد بشكل كبير عند درجات حرارة 600-800 درجة سيليزية.
- يبدأ التغير في الكثافة الحقيقية عند 800 درجة سيليزية نتيجة اعادة تكوين المعادن من الكالساييت الى اوكسيد الكالسيوم.
- من خلال فحص الشرائح الرقيقة (Thin section) وعند درجة حرارة 100-200 درجة سيليزية نلاحظ وجود مسامات منتظمة الحجم. وعند درجة حرارة 300-400 درجة سيليزية لوحظ وجود مسامات شكلية. وعند درجات حرارة 600-800 درجة سيليزية لوحظ وجود شقوق واسعة وكسور داخل العينة الصخرية.
- مع زيادة درجة الحرارة تقل السرعة الموجية ومقاومة الانضغاط غير محصور عندما تكون درجة الحرارة اقل من 400 درجة سيليزية يكون الانخفاض غير مهم. عند درجات حرارة مرتفعة 600-800 درجة سيليزية يزداد نقصان مقاومة الانضغاط بشكل كبير ويعود السبب الى انه نتيجة توسع وتمدد الصخرة يتم فقدان المياه المعدنية داخل الحجر الجيري تدريجيا.
- قيم الرقم الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية تزداد مع زيادة درجة الحرارة وتزداد بشكل كبير عند 800 درجة سيليزية.
- تشير العينات الصخرية بعد تعرضها للحريق في المديات المحصورة لدرجات الحرارة (100 الى 400) درجة سيليزية الى امكانية احتفاظها بجزء فعال من خصائصها الفيزيائية والميكانيكية، وبالتالي الاحتفاظ بجزء مهم من مقاومتها وديمومتها ضد عمليات التعرية المختلفة.
- كشفت الدراسة أنه عند تعرض العينات الصخرية لدرجات حرارة مرتفعة وخاصة عند 600-800 درجة سيليزية تتدهور الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجر الجيري. ويشير هذا التدهور في الخصائص والذي لوحظ بعد التعرض لدرجات الحرارة المرتفعة إلى أن الحجر الجيري قد لا يكون قادراً على الحفاظ على سلامته في حالة تعرض الى حريق.
- ان مدى درجات الحرارة 400-600 درجة سيليزية يمكن القول عنه أنه دال على وجود نقطة حرجية تمثل الحد الفاصل للتغيير الذي يحصل في سلوك العينات الصخرية المتعرضة للحريق.
- ان نتائج الدراسة الحالية هي بمثابة نتائج تمهيدية والتي يفترض ان تستكمل في اجراء سلسلة من فحوصات الديمومة للعينات الجيرية المتعرضة لدرجات الحرارة القريبة من درجة الحرارة الفعالة. وبذلك يمكن القول بان الدراسة الحالية

تهدف الى تمهيد الطريق في تحديد درجة الحرارة الحرجة للحرق كعامل تحكم في أضرار الحجر الجيري من مدينة الموصل.

شكر وتقدير

يُثمن الباحثون جهود اعضاء هيئة تحرير المجلة العراقية الوطنية لعلوم الارض في متابعة نشر المقالة. كما يقدم الباحثون شكرهم لقسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة الموصل لإتاحة الفرصة في اجراء هذه الدراسة. الشكر لقسم هندسة البيئة في جامعة الموصل لإنجاز فحوصات الرقم الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية. والشكر لجامعة سوران، اربيل لإنجاز فحص حيود الاشعة السينية. والشكر لجامعة صلاح الدين، اربيل لتحضير نماذج الشرائح الرقيقة، ولقسم علوم الأرض بجامعة الموصل لاستخدام المجهر المستقطب لوصف المعادن.

تضارب المصالح

يقر الباحثون لهذه الدراسة عدم وجود تضارب للمصالح.

References

- Abdulkareem, O.M., Aldaood, A., Al-Omari, A., Bouasker, M., Fraj, A.B. and Al-Mukhtar, M., 2022. Impact of tufa stone powder as a partial replacement of aggregate on the mechanical performance and durability of repair mortar. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), pp. 433-444. <https://doi.org/10.3311/PPci.19146>
- Adeeb, H.Gh.M., 1988. Structural and Stratigraphy of Mosul City – The Right Bank. Unpublished MSc. Thesis. College of Science, University of Mosul, 168 P.
- Al-Jbouri, M.A.M.A., 1988. Geology of Mosul Area – East Tigris River. Un-published M.Sc. Thesis. College of Science, University of Mosul, 152 P.
- Andriani, G.F. and Germinario, L., 2014. Thermal decay of carbonate dimension stones: fabric, physical and mechanical changes. *Environmental Earth Sciences*, 72, pp.2523-2539. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3160-6>
- Bodare, A., 2017. Nondestructive test methods of stone and rock. Stockholm: Royal Institute of Technology.
- Borg, R.P., Hajpál, M., and Török, Á. 2013. The fire performance of limestone characterisation. strategy for the fire performance of Maltese and Hungarian limestone. In International conference proceedings, application of structural fire engineering, Ed. F. Wald, et. al., 19-20 April 2013. Prague, Czech Republic. ISBN 978-80-01-05204-4. <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/84314>
- Brotóns, V., Tomás, R., Ivorra, S.A.J.C. and Alarcón, J.C., 2013. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite. *Engineering Geology*, 167, pp. 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.012>
- Dong, Y., Xi, B., He, S. and Chen, L., 2023. Experimental study on the effect of thermal shock on physical and mechanical properties of limestone. *Applied Sciences*, 13(6), 3649 P. <https://doi.org/10.3390/app13063649>
- Guibaud, A., Mindeguia, J.C., Albuerne, A., Parent, T. and Torero, J., 2024. Notre-Dame de Paris as a validation case to improve fire safety modelling in historic buildings. *Journal of Cultural Heritage*, 65, pp. 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.05.008>

- Hou, B., Sun, F., Xue, S., and Zhang, X., 2022. November. Experimental study on mechanical properties and porosity and permeability of rock in high temperature environment. In Journal of Physics: Conference Series Vol. 2368, No. 1, 012031P. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2368/1/012031>
- ISRM, 1978. International Society of Rock Mechanics, Commission on Standardisation of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract, Vol. 15, No. 3, pp. 99–103. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90003-7](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(78)90003-7)
- ISRM, 1979. International Society of Rock Mechanics, Commission on Standardisation of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract, Vol. 16, No. 2, pp. 135–140. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)91450-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)91450-5)
- Jodry, C., Heap, M.J., Bayramov, K., Alizada, G., Rustamova, S., and Nabiyeve, S., 2023. Influence of High Temperature on the Physical and Mechanical Properties of Porous Limestone from Baku (Azerbaijan). Fire, 6(7), 263. <https://doi.org/10.3390/fire6070263>
- Kara, I.B., 2021. Effects of cooling regimes on limestone rock and concrete with limestone aggregates at elevated temperatures. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 138, 104618. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104618>
- Liu, L., Li, R., Qin, H. and Sun, W., 2021. Experimental SHPB study of limestone damage under confining pressures after exposure to elevated temperatures. Metals, 11(10), 1663P. <https://doi.org/10.3390/met11101663>
- Martínez-Ibáñez, V., Garrido, M.E., Signes, C.H. and Tomás, R., 2020a. June. Study of explosive behaviour at high temperatures on limestones from a road tunnel in Spain. In ISRM EUROCK, pp. ISRM-EUROCK. ISRM. <https://onepetro.org/ISRMEUROCK/proceedings-abstract/EUROCK20/All-EUROCK20/ISRM-EUROCK-2020-184/447430?redirectedFrom=PDF>
- Martínez-Ibáñez, V., Garrido, M.E., Signes, C.H. and Tomás, R., 2020b. June. Indirect evaluation of strength for limestones subjected to high temperatures. In ISRM EUROCK, pp. ISRM-EUROCK. ISRM. <https://onepetro.org/ISRMEUROCK/proceedings-abstract/EUROCK20/All-EUROCK20/ISRM-EUROCK-2020-110/447352>
- May-Crespo, J., Martínez-Torres, P., Quintana, P., Alvarado-Gil, J. J., Vilca-Quispe, L. and Camacho, N., 2021. Study of the effects of heating on organic matter and mineral phases in limestones. Journal of Spectroscopy, 2021(1), 9082863. <https://doi.org/10.1155/2021/9082863>
- Meng, Q.B., Wang, C.K., Liu, J.F., Zhang, M.W., Lu, M. M. and Wu, Y., 2020. Physical and micro-structural characteristics of limestone after high temperature exposure. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79, pp. 1259-1274. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01620-0>

- Norme AFNOR, Référence NF EN., 1925. (B10-613). Test methods for natural stones – Determination of the coefficient of water absorption by capillarity. (1999) 16 P. <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-en-1925/natural-stone-test-methods-determination-of-water-absorption-coefficient-by/fa041104/3714#AreasStoreProductsSummaryView>
- Ozguven, A. and Ozcelik, Y., 2013. Investigation of some property changes of natural building stones exposed to fire and high heat. Construction and Building Materials, 38, pp. 813-821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.072>
- Ozguven, A. and Ozcelik, Y., 2014. Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones. Engineering Geology, 183, pp. 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.006>
- RILEM Recommendations, 1984. 11.3. Absorption of water by immersion under vacuum. Materials and Structures, 17(101), pp. 391-394. https://www.rilem.net/publication/publication/207?id_papier=5419
- Ugur, I., Sengun, N., Demirdag, S. and Altindag, R., 2014. Analysis of the alterations in porosity features of some natural stones due to thermal effect. Ultrasonics, 54(5), pp. 1332-1336. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.01.013>
- Zhang, W. and Lv, C., 2020. Effects of mineral content on limestone properties with exposure to different temperatures. Journal of Petroleum Science and Engineering, 188, 106941. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.106941>
- Zhang, W., Sun, Q., Zhu, S., and Wang, B., 2017a. Experimental study on mechanical and porous characteristics of limestone affected by high temperature. Applied Thermal Engineering, 110, pp. 356-362. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.194>
- Zhang, Y., Sun, Q. and Geng, J., 2017b. Microstructural characterization of limestone exposed to heat with XRD, SEM and TG-DSC. Materials Characterization, 134, pp. 285-295. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.007>