

تقييم أداء الخرسانة الحاوية على حصويات خشنة من خبث الفولاذ عند تعرضها لدرجات الحرارة العالية

مناف الخضر^{1*} محمود اسماعيل² ماجد أسعد³

¹. طالب دكتوراه، مهندس، كلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق، مواد البناء.

munaf.alkhadr@damascusuniversity.edu.sy

². دكتور، مهندس، مدرس، كلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق، منشآت خاصة للمواصلات والنقل (ديومومة منشآت). Mahmoud.ismail@damascusuniversity.edu.sy

³. استاذ، دكتور، مهندس، كلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق، مواد البناء. majaasaad@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

يتم انتاج ما يزيد على 100 ألف طن سنوياً من خبث الفولاذ في الجمهورية العربية السورية، ويتم تخزينه على مساحات واسعة حول المعامل مسبباً اثار سلبية بيئياً وصحياً. يهدف هذا البحث إلى تقييم أثر استخدام خبث الفولاذ كحصويات خشنة على الخصائص الحرارية للخرسانة. تم تحضير ثلاث خلطات خرسانية M1, M2, M3 باستخدام خبث الفولاذ الناتج عن معمل حديد سوريا كبديل جزئي وكلي لحصويات المقاول الخشنة. كانت نسب الاستبدال المدروسة (0 - 50 - 100) % من وزن الحصويات الخشنة، تم اختبار تلك الخلطات على درجات حرارة (20 - 400 - 800) °C، وقد تمت دراسة الخواص الميكانيكية والبنية المجهرية للخرسانة قبل التسخين وبعده، ومقارنة النتائج فيما بينها. أظهرت النتائج أن استخدام الحصويات الدولوميتية في الخرسانة قد خفض من تأثير الحرارة العالية على المقاومة على الضغط حيث كان الانخفاض بمقدار 9.6% عند درجة حرارة 400 °C، و 60% عند درجة حرارة 800 °C، وقد تبين أن استخدام حصويات خبث الفولاذ بشكل جزئي قد حسن من المقاومة على الضغط بمقدار 12% عند درجة الحرارة 400، وكانت قيمة الانخفاض في المقاومة على الشد بالفلق لكافة الخلطات بمقدار 12% عند درجة الحرارة 400، بينما كان الانخفاض للخلطة المرجعية بمقدار 66% عند درجة حرارة 800 و 89% للخلطة الحاوية على حصويات خبث الفولاذ، وبالتالي يمكن استخدام حصويات خبث الفولاذ الخشنة كبديل لحصويات المقاول الخشنة في الخرسانة المعرضة للحرارة حتى درجة حرارة 400 °C.

الكلمات المفتاحية: خبث الفولاذ، الخرسانة، الحرارة العالية، الخواص الميكانيكية، البنية المجهرية.

تاريخ الإيداع: 2023/4/12

تاريخ القبول: 2023/5/29



حقوق النشر: جامعة دمشق - سوريا، يحظى المؤلفون بحقوق النشر بموجب CC BY-NC-SA

Evaluation the Performance of Concrete Containing Coarse Steel Slag Aggregate When Exposed to High Temperatures.

Munaf ALkhedr^{*1} Mahmoud Ismail² Majed Asaad³

^{*1}. PhD student, Eng, Faculty of Civil Engineering - Damascus University, Constructions materials, munaf.alkhedr@damascusuniversity.edu.sy.

². Assistant professor, Dr, Faculty of Civil Engineering - Damascus University, Private facilities for transportation and communication.

mahmoud.ismail@damascusuniversity.edu.sy

³. Professor, Faculty of Civil Engineering- Damascus University, Constructions materials. majaasaad@damascusuniversity.edu.sy

Abstract:

Annually more than 100 thousand tons of steel slag are produced in the Syrian Arab Republic. And it is stored in large areas around the factories, causing negative environmental and health effects. This research aims to evaluate the effect of using steel slag as coarse aggregates on the thermal properties of concrete. Three concrete mixtures M1, M2, and M3 were prepared using steel slag from the Syrian Steel Factory as a partial and total replacement for coarse natural aggregates. The replacement percentages were as follows (0 - 50 - 100)%, The studied replacement percentages were (0 - 50 - 100)% of the weight of the coarse aggregates. These mixtures have been tested at temperatures (20 - 400 - 800)°C. The mechanical properties and microstructure of concrete have been studied before and after heating, and compare the results among themselves. The results showed that the use of dolomite aggregates in concrete reduced the effect of high temperature on the compressive strength, where the decrease was by 9.6% at 400°C temperature and 60% at 800°C temperature, while the partial use of steel slag aggregates improved the compressive strength by 12% At the temperature 400°C, and the value of the decrease in the tensile strength for all mixtures was 12% at the temperature 400, while the decrease for the reference mixture was 66% at the temperature 800 and 89% for the mixture containing steel slag aggregates, Thus, steel slag coarse aggregate can be used as a substitute for natural coarse aggregate in concrete exposed to temperatures up to 400°C.

Keywords: Steel slag, Concrete, High temperature, Mechanical properties, Microstructure

Received: 12/4/2023

Accepted: 29/5/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a
CC BY- NC-SA

المقدمة:

والكيميائية التي تكون فيها الخرسانة بالقرب من الأفران، بالإضافة إلى محطات توليد الطاقة النووية.(Naus,2005,1) تصل درجة الحرارة أثناء الحريق إلى 1100 درجة مئوية في الأبنية، و1350 درجة مئوية في الانفاق، مما يؤدي إلى ضرر كبير في الجمل الإنسانية لتلك المنشآت.(Hager,2013,145) تحافظ الخرسانة على خصائصها مع ارتفاع درجات الحرارة إلى حد معين، وذلك بسبب معامل التوصيل الحراري الصغير نسبياً حيث تكون حركة الحرارة عبر الخرسانة بطيئة مما يحمي فولاذ التسلیح الذي يعتبر بدوره حساس للحرارة.

تعتبر الخصائص الحرارية للخرسانة معقدة جداً مقارنة بباقي المواد، حيث تعتبر الخرسانة مادة مركبة من عدة مواد تختلف في خصائصها، بالإضافة إلى أن خصائص الخرسانة تعتمد بشكل كبير على الرطوبة والمسامية.(Naus,2005,3)

يحدث العديد من التغيرات الفيزيائية والكيميائية المعقدة في الخرسانة أثناء التسخين، بالإضافة إلى حركة السوائل ضمن الخرسانة.

تبين هذه الدراسة انعكاس تأثير استخدام حصويات خبث الفولاذ الخشنة الناتجة عن معامل الحديد في سوريا على الخصائص الحرارية للخرسانة كبديل جزئي أو كلي لحصويات المقالع الطبيعية وذلك من خلال فحص الخواص الفيزيائية للحصويات المستخدمة، وفحص الخواص الميكانيكية للعينات الخرسانية.

1- خبث فرن القوس الكهربائي: EAF

ينتج عن عملية صناعة الفولاذ في أفران القوس الكهربائي ما يصل إلى 15% من الخبث لكل طن من الفولاذ. تشكل المكونات الرئيسية لخبث أفران القوس الكهربائي مركب معقد من الأكسيد المصنوعة من الكالسيوم والسيликون والحديد والمغنيزيوم والمنغنيز.

تختلف مكونات الخبث حسب نوع الإضافات والدرجة المطلوبة لنقاء الفولاذ وظروف تشغيل الفرن.(Lewis,1982,76)

تعتمد الهندسة المدنية بشكل أساسى على استغلال الموارد الطبيعية واستخدامها بما يخدم متطلبات وحاجات المشاريع المختلفة، ومع ذلك لا يمكن للطلب المتزايد باستمرار على المواد أن يتم تلبيتها بشكل كامل من الموارد الطبيعية أو المواد التقليدية.

تعد المخلفات الصناعية من أهم المشكلات التي تعمل على عرقلة عملية الانتاج بالإضافة إلى تأثيرها السلبي الكبير على البيئة والصحة العامة.

يعتبر خبث الفولاذ المنتج الثانوي الرئيس لصناعة الفولاذ والذي يتشكل من الشوائب الموجودة في الفولاذ المصنوع حيث يتراكم على مساحات واسعة حول معامل صناعة الفولاذ مشكلًا عبًًا اقتصاديًّا وبائيًّا كبيرًا.

عمل الباحثون حول العالم على إيجاد حلول بهدف تطوير خبث الفولاذ والاستفادة منه بالطرق المثلث في مجالات واسعة وتطبيقات هندسية وزراعية واقتصادية مختلفة، حيث ركز الباحثون على إيجاد طرق جديدة للتصميم والبناء والصيانة بهدف إنتاج مباني صديقة للبيئة.

تعتمد هذه الدراسات على اكتشاف المبادئ البيئية للبناء، وذلك من خلال استخدام كميات أقل من الموارد الطبيعية غير المتعددة وفي نفس الوقت، يجب مواجهة المشكلة الملحة للتخلص من الكميات المتزايدة من المخلفات الصناعية.

تعتبر الخرسانة من أهم المواد التي يستخدم خبث الفولاذ في إنتاجها، وذلك عن طريق صناعة الإسمنت الخبيثي، أو عن طريق استبدال حصويات المقالع الجديدة بحصويات خبث الفولاذ.

تتعرض الخرسانة إلى درجات حرارة مقبولة في ظل الظروف الطبيعية، ولكن في بعض الحالات قد تتعرض إلى درجات حرارة عالية، مثل حرائق الأبنية والتطبيقات الصناعية

ترتبط فيما بينها بالعجينة الإسمنتية التي تتشكل عند إضافة الماء إلى الإسمنت، حيث تؤثر درجات الحرارة على كل مكون من مكونات الخرسانة بشكل مختلف عن الآخر، ويساهم ارتفاع درجة الحرارة في زيادة حجم الحصويات وانكماس العجينة الإسمنتية مما يخلق ضعفاً في ارتباط العجينة الإسمنتية بالحصويات مشكلة ضرراً كبيراً في جسم الخرسانة، ويمكن تلخيص ما يحصل للخرسانة أثناء الارتفاع التدريجي لدرجات الحرارة بما يلي: (Hager, 2013, 147).

(200 – 20) °C : يتم في البدء فقدان الماء الشعري وتوسيع المسام بسبب تمدد الماء، وينفكك الاترنجيت بدرجة حرارة 80 °C – 150 °C، وينفكك هلام C-S-H بشكل أولي، وينفكك الجبس 150 – 170 °C، ويتم فقدان الماء المرتبط كيميائياً.

(300 – 400) °C : ينفكك الركام السيليسي عند درجة حرارة 350 °C، وتعتبر الدرجة 374 °C هي الدرجة الحرجة لفقدان الماء.

(400 – 500) °C : ينفكك هيدروكسيد الكالسيوم بدرجة حرارة تتراوح بين 460 – 540 °C وفق المعادلة التالية:

$$\text{Ca(OH)}_2 \longrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$$

(500 – 600) °C : تتحول بلورات α كوارتز إلى بلورات β كوارتز بدرجة حرارة 573 °C.

(600 – 800) °C : تبدأ المرحلة الثانية من تفكك سيلكات الكالسيوم المائية وتحول إلى $\beta\text{-C}_2\text{S}$.

(800 – 1000) °C : ينفكك الدولوميت عند درجة حرارة 840 °C، وتنفكك كربونات الكالسيوم عند درجة حرارة 930 °C.

(1000 – 1200) °C : ينفكك البازلت عند درجة حرارة 1050 °C.

(1300) °C : يحدث تفكك لكل مكونات الخرسانة.

3- الدراسات المرجعية:

ناقشت العديد من الدراسات حول العالم تأثير درجات الحرارة العالية على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة، حيث

يتميز خبث أفران القوس الكهربائي مقارنة بخبث الأفران العالية بمحتوى أعلى من الحديد والمنغنيز والمغنتيوم. ومحتوى أقل من السيليكون، و بمحتوى شبه معدوم من الكبريت.

يتميز خبث أفران القوس الكهربائي بوزن نوعي وصلابة وكثافة أعلى من خبث الأفران العالية، وبمسامية أقل ومقاومة عالية للتآكل.

كان استخدام خبث الفولاذ في الماضي محدوداً نظراً لوجود كميات كبيرة من خبث الفرن العالي.

تم استخدام خبث الفولاذ كسماد صناعي بشكل أساسي وذلك من العمليات التي تستخدم الحديد الخام الفوسفورى كمادة خام لإنتاج الفولاذ.

كانت الزيادة في خبث مصانع الفولاذ بطيئة بسبب ارتفاع محتوى الحديد حيث تم إعادة تدوير الفولاذ فقط من الخبث وتم التخلص من الباقي في مقالب النفايات. (Lewis, 1982, 78).

بسبب الحصة المتزايدة من إنتاج الفولاذ في أفران القوس الكهربائي في العالم، يصبح خبث فرن القوس الكهربائي أكثر أهمية ويحل محل فرن الصهر العالي في العديد من المجالات التطبيقية ويمكن تلخيص آلية إنتاج خبث أفران القوس الكهربائي بالشكل (1):



الشكل (1) آلية إنتاج خبث الفولاذ في فرن القوس الكهربائي.

2- تأثير درجة الحرارة على الخرسانة:

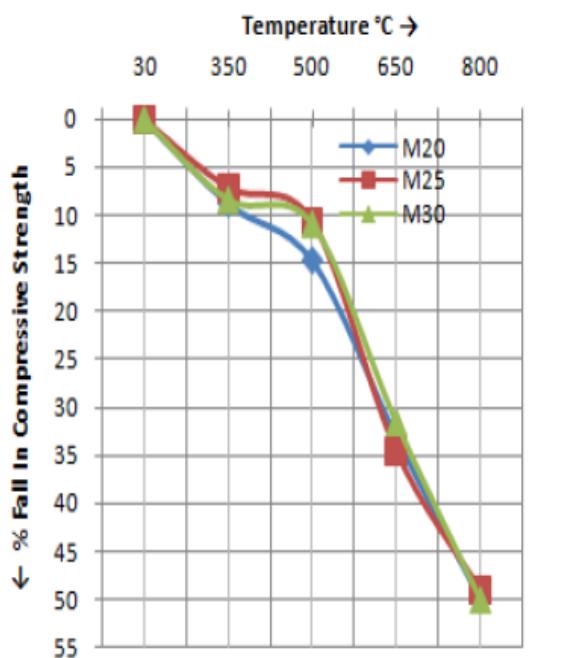
تشكل الحصويات ما يقارب 65-70 % من جسم الخرسانة،

فقدت عينات 1:2:4 مقاومتها للضغط بمقدار 85.96% عند تعریضها لدرجة حرارة 600°C لمدة ساعتين، و 16.04% عند تعریضها لدرجة حرارة 400°C لمدة ساعة.

فقدت عينات 1:3:6 مقاومتها للضغط بمقدار 73.61% عند تعریضها لدرجة حرارة 600°C لمدة ساعتين، و 19.63% عند تعریضها لدرجة حرارة 400 لمدة ساعة (Ukala, 2019, 1640).

تأثر الخرسانة بشكل كبير بزمن التعرض للحرارة، حيث تمت دراسة الخرسانة عند تعریضها لدرجات حرارة بين (200 - 200) $^{\circ}\text{C}$ مع ثبات درجة الحرارة المطلوبة عند نقطة الذروة لـ 800 دقيقة ساعة ومقارنتها مع نتائج تعریض العينات لنفس درجة الحرارة مع تثبيتها عند نقطة الذروة لمدة ساعتين.

يبين الشكل (4) تغير المقاومة على الضغط عند التعریض للحرارة لمدة ساعة.



الشكل(4) تغير المقاومة على الضغط عند التعریض لمدة ساعة.
(Mundhada et al, 2015, 69)

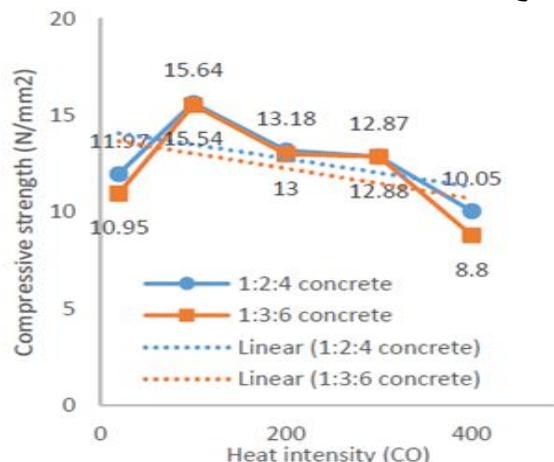
يبين الشكل (5) تغير المقاومة على الضغط عند التعریض للحرارة لمدة ساعتين.

تلعب نسب الخلط ومدة التعرض للحرارة دوراً هاماً في تغير الخواص الحرارية للخرسانة وتبين ذلك عند فحص مكعبات خرسانية بنسبتين مختلفتين 1:2:4 و 1:3:6 وتم دراسة هاتين:

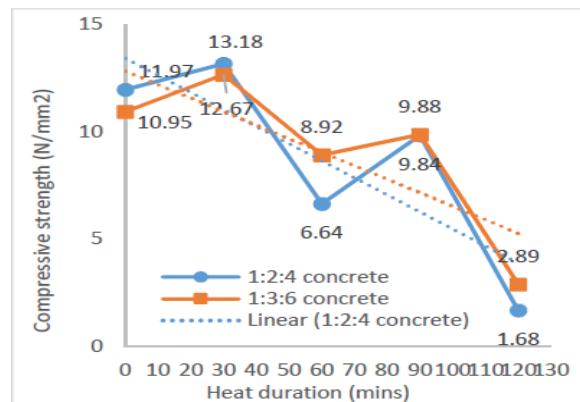
الحالة الأولى: عُرضت العينات لدرجات حرارة (100 - 200 - 300 - 400) $^{\circ}\text{C}$ مع ثبات درجة الحرارة عند نقطة الذروة لمدة ساعة.

الحالة الثانية: عُرضت العينات لدرجة حرارة 600°C مع ثبات درجة الحرارة عند نقطة الذروة لمدة (30 - 60 - 90 - 120) دقيقة.

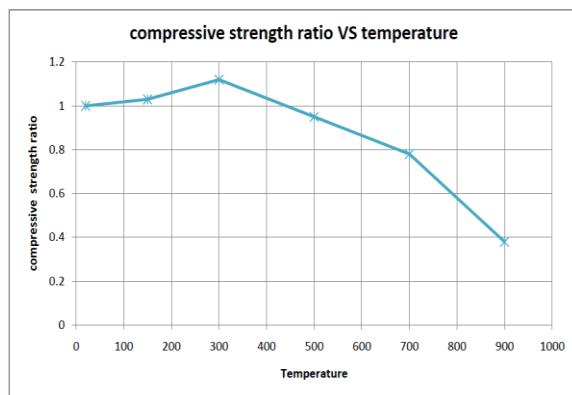
يوضح الشكل (2) تغير المقاومة على الضغط لعينات الحالة الأولى مع تغير درجة الحرارة.



الشكل(2) تغير المقاومة على الضغط مع تغير درجة الحرارة للحالة الأولى(Ukala, 2019, 1640)



الشكل(3) تغير المقاومة على الضغط لعينات الحالة الثانية مع تغير زمن التسخين.(Ukala, 2019, 1639)



الشكل(6) تغير المقاومة على الضغط بتغير درجة الحرارة . (Husain et al , 2016,1367)

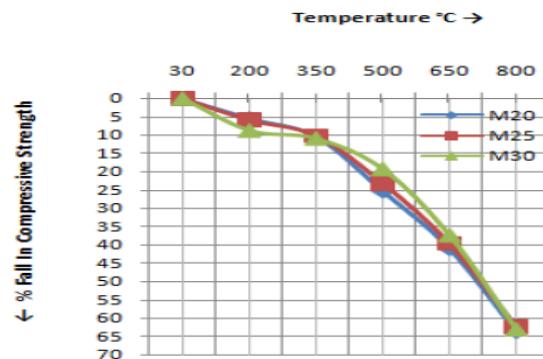
يوضح الشكل (6) تحسن المقاومة على الضغط عند درجة حرارة 150 بمقدار 3%， وعند الدرجة 300 °C بمقدار 12%， بينما انخفضت المقاومة على الضغط عند الدرجة 500 °C بمقدار 5%， وعند الدرجة 700 °C بمقدار 22%， ليصل الانخفاض عند درجة حرارة 900 °C إلى 62% (Husain et al , 2016,1367)

يمكن أن تحسن الإضافات وتعديل نسب الخلط على خواص الخرسانة الحرارية، حيث تم تحضير 5 خلطات مختلفة بزمن انتاج 56 يوم وكانت الخلطات على الشكل التالي:
M1: خلطة مرجعية تحتوي على حصويات مقاالت ناعمة وخشندة دولوميتية.

M2: خلطة تحتوي على حصويات ناعمة مقاالت وحصويات خشندة من خبث الفولاذ.

M3: خلطة تحتوي على حصويات ناعمة مقاالت وحصويات خشندة خبث فولاذ مع إضافة ألياف البولي بروبلين.
M4: خلطة تحتوي على حصويات ناعمة مقاالت وحصويات خشندة خبث فولاذ مع إضافة الرماد المتطاير كنسبة من وزن الإسمنت.

M5: خلطة تحتوي على حصويات ناعمة مقاالت مع حصويات خبث الفولاذ خشندة مع إضافة ألياف البولي بروبلين والرماد المتطاير كنسبة من وزن الإسمنت.



الشكل(5) تغير المقاومة على الضغط عند التعرض لمدة ساعتين.

(Mundhada et al , 2015,69)

تبين الأشكال البيانية(4) و(5) أنه عند درجة حرارة 350°C درجة مؤدية يكون الانخفاض بالمقاومة على الضغط قليل ولا يتجاوز 10%.

يكون الانخفاض في المقاومة على الضغط عند درجة حرارة 500°C يقارب ال 10% عند التعرض لمدة ساعة، و 20% عند التعرض لمدة ساعتين.

يزداد الانخفاض في المقاومة على الضغط عند درجة حرارة 650°C ليصل الى 30 - 40%.

يكون الانخفاض في المقاومة على الضغط عند درجة حرارة 800°C ما يقارب ال 50% عند التعرض لمدة ساعة، و 60% عند التعرض لمدة ساعتين.

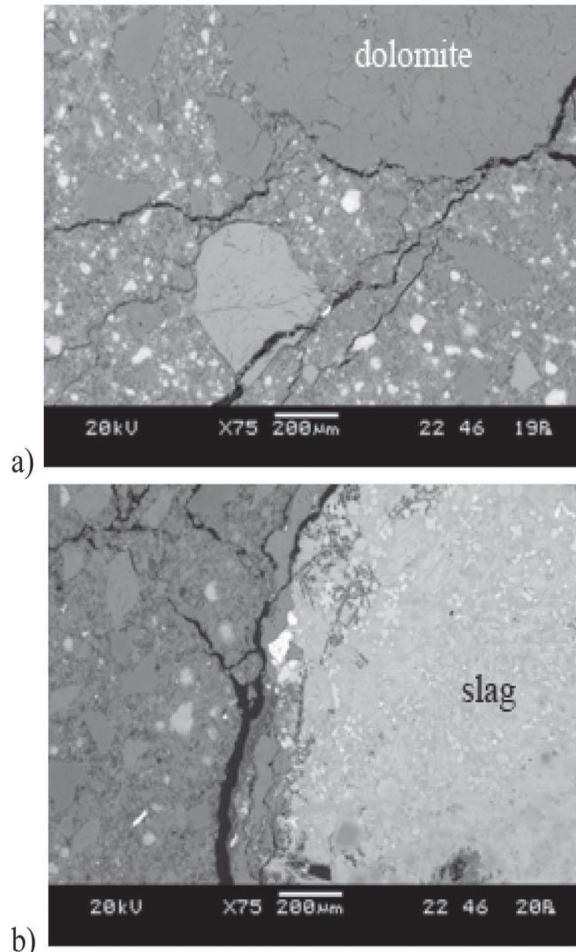
(Mundhada et al , 2015,69)

تلعب الحصويات دوراً هاماً في تحديد الخواص الحرارية للخرسانة، حيث تم انتاج عينات مكعبية بأبعاد (10*10*10 cm) لمدة 28 يوم، وقياس المقاومة على الضغط لتلك العينات عند درجات حرارة (20 - 150 - 300 - 500 - 700 - 900 °C) علماء أن الحصويات المستخدمة في هذه الدراسة هي حصويات بازلتية والتي تعرف بمقاومتها لدرجات الحرارة العالية.

يبين الشكل(6) تغير المقاومة على الضغط بتغير درجة الحرارة.

عند 600°C درجة مؤوية، إلى حوالي 28% - 30% عند 800°C درجة مؤوية ، على التوالي).

يوضح الشكل(8) الاختلاف في البنية المجهرية بين العينات المرجعية وعينات حصويات خبث الفولاذ. (Netiger et al, 2012,1349)



الشكل(8) البنية المجهرية لعينات الخرسانة.

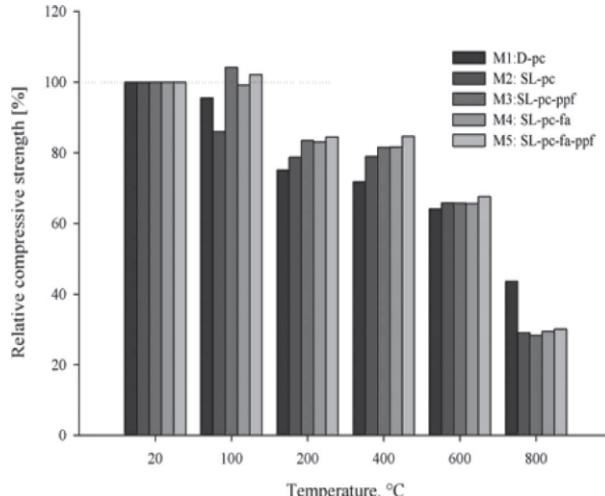
(Netiger et al, 2012,1351)

نستنتج من الدراسات المرجعية السابقة أن الخرسانة تحافظ على خواصها حتى درجة حرارة 400°C ومن ثم تبدأ بالانهيار، وتوضح الدراسات أن آلية التسخين المتبعه ونوع الحصويات له دور كبير في تغير خواص الخرسانة عند درجات الحرارة العالية.

4 - أهمية البحث وأهدافه:

تم تسخين العينات بدرجات حرارة (100-200-400-600- 800°C) بمعدل تسخين درجة واحد كل دقيقة مع ثبات درجة الحرارة عند نقطة الذروة لمدة ساعة، ومن ثم تبريدها في الفرن منعاً لحدوث الصدمة الحرارية.

تم اختبار المقاومة على الضغط لتلك العينات ويوضح الشكل(7) تغير المقاومة على الضغط بتغير درجة الحرارة.



الشكل(7) تغير المقاومة على الضغط بتغير درجة الحرارة.

(Netiger et al, 2012,1349)

يوضح الشكل(7) أن جميع الخلطات الحاوية على الخبث أعطت قيم أعلى للمقاومة على الضغط عند درجة حرارة 100°C ما عدا الخلطة M2.

انخفضت المقاومة على الضغط لجميع الخلطات مع ارتفاع درجات الحرارة من 200°C حتى 600°C .

عند درجة حرارة 600°C كانت الخلطات الحاوية على الخبث أفضل من الخليط المرجعي.

عند درجة حرارة 800°C كان الخليط المرجعي أفضل من خلطات خبث الفولاذ بنسبة 15%.

ومن الجدير بالذكر أن هناك انخفاض بنسبة 35% لجميع الخلطات الحاوية على خبث الفولاذ

عند درجة حرارة 800°C ، والخلطات التي تحتوي على خبث الفولاذ لها قيم متشابهة جداً للمقاومة على الضغط 66-68%

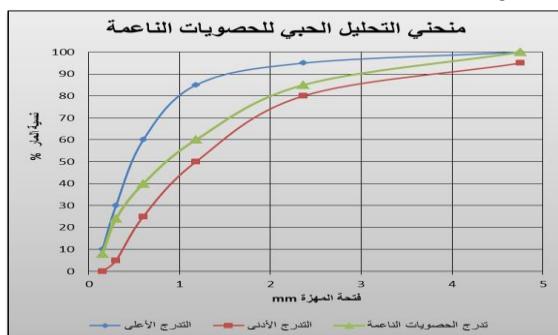
عن صهر الخردة الواردة إلى المعمل في فرن القوس الكهربائي EAF في مدينة عدرا الصناعية، والمبرد تحت الظروف الجوية السائدة حول المعمل، وتم تكسيره إلى مقاسات الحصويات المطلوبة في تصميم خلطات البحث.

الأسمنت : تم استخدام الأسمنت البورتلاندي العادي صنف N 32.5 وتم الحصول عليه من معمل أسمنت عدرا .

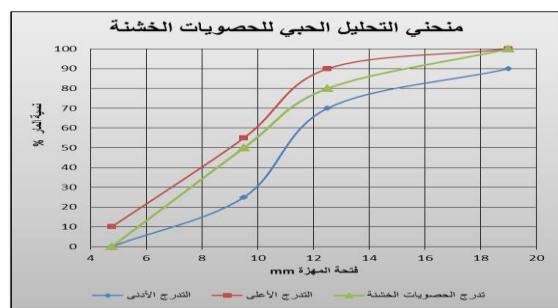
7- التجارب على الحصويات:

تم اجراء سلسلة من التجارب على حصويات المقالع الخشنة والناعمة وحصويات خبث الفولاذ الخشنة، بالإضافة إلى اجراء تحليل كيميائي لخبث الفولاذ وذلك بهدف التحقق من الخواص الفيزيائية والكيميائية.

يبين الشكل (9) منحنى التدرج الحبي لحصويات المقالع الناعمة، والشكل (10) منحنى التدرج الحبي لحصويات المقالع وخبث الفولاذ الخشنة



الشكل البياني (9) منحنى التدرج الحبي لحصويات الخشنة.



الشكل البياني (10) منحنى التدرج الحبي لحصويات الخشنة.

يبين الجدول (1) الخواص الفيزيائية والميكانيكية لـ الحصويات المدروسة.

يقوم هذا البحث على دراسة أثر استبدال حصويات المقالع الخشنة بـ حصويات خبث الفولاذ الخشنة كـ بديل جزئي أو كـ تـ كلي على الخرسانة المعرضة للحرارة العالية، وذلك من خلال فحـ صـ الخواص الميكانيكية للـ خـ رـ سـ اـ نـ اـ تـ ةـ المنتـ جـ ةـ قـ بـ لـ الـ تـ عـ رـ بـ لـ درـ جـ اـتـ الحرـ اـ رـ وـ بـ عـ دـ هـ اـ، بـ إـضـ اـ فـ إـلـىـ فـ حـ صـ الـ بـ نـ يـةـ الـ مجـ هـ رـ يـةـ لـ كـافـ ةـ حالـ اـتـ الـ درـ اـ سـ ةـ.

5- طرائق البحث ومواده:

يعتمد هذا البحث على اجراء سلسلة من التجارب على حصويات المقالع وحصويات خبث الفولاذ المستخدمة، ودراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية لتلك الحصويات، ومن ثم تصميم خلطات خرسانية باستخدام حصويات المقالع الخشنة بنسبة 100% كـ خـ لـ طـ ةـ مـ رـ جـ عـ يـةـ يـ رـ مـ زـ لهاـ بـ الـ زـ مـ 1ـ، وـ خـ لـ طـ ةـ بـ نـ سـ بـ نـ سـ 50% حصـ وـ خـ لـ طـ ةـ بـ نـ سـ بـ نـ سـ 100% حصـ وـ خـ لـ طـ ةـ خـ بـ ثـ فـوـ لـ زـ خـ شـ نـ ةـ 2ـ Mـ 2ـ، وـ خـ لـ طـ ةـ بـ نـ سـ بـ نـ سـ 100% حصـ وـ خـ لـ طـ ةـ خـ بـ ثـ فـوـ لـ زـ خـ شـ نـ ةـ 3ـ Mـ 3ـ، ومن ثم التتحقق من مقاومة العينات الخرسانية على الضغط و الشد بالفلق عند التعرض لدرجات حرارة 400-400°C وفـ حـ صـ الـ بـ نـ يـةـ الـ مجـ هـ رـ يـةـ لـ لـ عـ يـنـ اـتـ وـ مـ قـ اـرـ نـ اـ تـ هـ اـ معـ عـ يـنـ اـتـ غـ يـرـ الـ مـ عـ رـ ضـ هـ ةـ لـ لـ حـ رـ اـ رـ ةـ.

أنجزت هذه التجارب في مختبرات كلية الهندسة المدنية بـ جـامـ عـةـ دـمـشـقـ وـ مـخـ بـ تـ رـاتـ الـ معـهـدـ الـ عـالـيـ لـ الـ عـلـوـيـةـ الـ تـطـبـيـقـيـةـ وـ الـ تـكـنـوـلـوـجـيـاـ وـ معـاملـ مـرـكـزـ الـ درـاسـاتـ وـ الـ بـحـوثـ الـ عـلـمـيـةـ.

6- المواد المستخدمة:

حصويات المقالع (Natural aggregate) NA: تم احضارها من منطقة المراح في ريف دمشق و هي عبارة عن حصويات دولوميتية تم تسيير الحصويات الخشنة المستخدمة في البحث وفق المواصفة ASTM C33 / AASHTO M80 للـ حصـ وـ خـ بـ ثـ فـوـ لـ زـ خـ شـ نـ ةـ الـ خـ بـ ثـ، وـ تم تـ سـ يـرـ الحـ صـ وـ خـ بـ ثـ فـوـ لـ زـ خـ شـ نـ ةـ الـ خـ بـ ثـ وـ قـ وـ فـ الـ مـ وـ اـصـ فـ اـةـ 6ـ AASHTO M6ـ للـ حصـ وـ خـ بـ ثـ فـوـ لـ زـ خـ شـ نـ ةـ الـ خـ بـ ثـ النـاعـمـةـ.

حصويات خـ بـ ثـ الفـوـ لـ زـ (Steel slag aggregate) SSA: تم الحصول على كـ تـ لـ خـ بـ ثـ الفـوـ لـ زـ من مـ عـ مـلـ حـ دـ يـدـ سـوـ رـيـاـ النـاتـجـ

الجدول (2) التحليل الكيميائي لخبث الفولاذ المدروس

النسبة المئوية للعناصر المشكّلة لخبث الفولاذ	
27.82	CaO
44.15	Fe ₂ O ₃
13.63	SiO ₂
0.04	CuO
7.18	Al ₂ O ₃
2.75	MgO
2.68	MnO
0.66	ZnO
0.58	BrO
0.58	BrO

يوضح الجدول (2) أن أكسيد الحديد هو الأكسيد الغالب في خبث الفولاذ المستخدم بنسبة تقارب 44 % وأن خبث الكالسيوم والسيلكون يتواجدان بنسبة عالية في هذا الخبث.

9- تصميم الخلطات الخرسانية المدرosa:

تم التصميم وفق طريقة المعهد الأمريكي للخرسانة .ACI211.191

تم اعتماد ثلاثة خلطات وهي على الشكل التالي:

M1: خلطة مرجعية بواسطة حصويات مقايع فقط.

M2: خلطة باستخدام 50 % حصويات مقايع خشنة و 50 % حصويات خبث فولاذ خشنة.

M3: خلطة باستخدام 100 % حصويات خبث فولاذ خشنة.

يوضح الجدول(3):

الجدول(3) نسب الخلط للخلطات المدرosa.

أوزان مكونات خلطات الدراسة مقدرة بالكيلو غرام			اسم الخلطة
M3	M2	M1	
-	480	960	حصويات مقايع خشنة
966	896	820	حصويات مقايع ناعمة
1014	507	-	حصويات خبث فولاذ خشنة
380	380	380	اسمنت
228	223	218	ماء
2588	2487	2378	الوزن الكلي

الجدول (1) الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحصويات الخشنة والناعمة المدرosa.

التجربة	الوزن النوعي الكلي الجاف Gsb	حصويات خبث فولاذ خشنة	حصويات مقايع خشنة	حصويات مقايع ناعمة
الوزن النوعي الظاهري الجاف Gsd	3.289	2.664	2.679	
الوزن النوعي مشبع وسطحة جاف Gssd	3.592	2.802	2.794	
نسبة الامتصاص %	3.374	2.713	2.718	
الفacd بالاهتراء %	2.56	1.85	1.6	
المكافى الرملى	21.98	18.94	-	75

نستنتج من الجدول (1) أن الوزن النوعي لحصويات خبث الفولاذ أكبر بقدر 22 % من الحصويات الدولوميتية، ويعود ذلك إلى المحتوى العالي من أكسيد الحديد الموجودة في خبث الفولاذ الناتج عن معمل حديد سوريا.

نسبة الامتصاص لحصويات خبث الفولاذ أكبر بقدر 27.7 % من حصويات المقاييس الدولوميتية، ويعود ذلك إلى البنية المسامية التي يتتصف بها خبث الفولاذ.

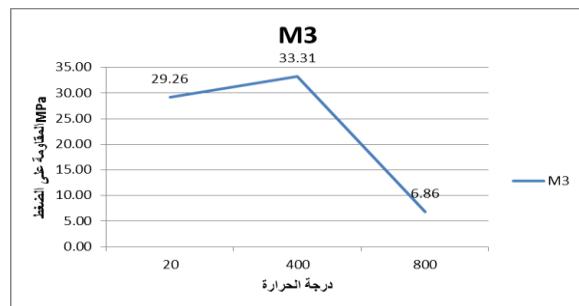
الفacd بالاهتراء لحصويات خبث الفولاذ أكبر بقدر 13.8 % من حصويات المقاييس الدولوميتية، ويعود ذلك إلى بنيتها المسامية مما يقلل من مقاومتها للاهتراء عند وضعها في جهاز لوس أنجلوس.

وعلى الرغم من ذلك (مسامتها واهترائها الأعلى من الحصويات الدولوميتية) إلا أنه تبين النتائج السابقة امكانية استخدام حصويات خبث الفولاذ في انتاج الخرسانة وذلك وفقاً لمتطلبات الأداء.

8- التحليل الكيميائي لخبث الفولاذ المدروس:

تم اجراء تحليل كيميائي بهدف معرفة الأكسيد المشكّلة لخبث الفولاذ ونسبة كل منها، حيث تم إجراء هذه التجربة في مختبرات المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجية.

يوضح الشكل (12) أن المقاومة على الضغط للخلطة M2 تناقصت بنسبة 19.4% عند درجة حرارة 400°C، و75% عند درجة حرارة 800°C.



الشكل (13) تغير المقاومة على الضغط مع تغير درجة الحرارة للخلطة M3 يوضح الشكل (13) أن المقاومة على الضغط للخلطة M3 ازدادت بنسبة 12% عند درجة حرارة 400°C، وتتناقصت بنسبة 76% عند درجة حرارة 800°C.

نستنتج من الأشكال (11) و(12) و(13) ما يلي:

أعطت الخلطة M2 أفضل أداء بالنسبة للمقاومة على الضغط، ويعود ذلك إلى التفوه في أشكال ومقاسات الحصويات الذي ساعد على إملاء أفضل للفراغات مقارنة بالخلطة M1 ذات النسبة 100% حصويات دولوميتية والخلطة M3 ذات النسبة 100% حصويات خبث الفولاذ.

كانت نسبة الانخفاض في المقاومة على الضغط للخلطة M2 أكبر من باقي الخلطات عند درجة حرارة 400°C، ويعود ذلك إلى اختلاف معاملات التمدد الحراري بين الحصويات الدولوميتية وحصويات خبث الفولاذ، مما خلق اجهادات إضافية في العينات، ومع ذلك أعطت الخلطة M2 أعلى قيمة للمقاومة على الضغط، ويعود ذلك إلى قيمة المقاومة على الضغط الكبيرة التي تملكتها قبل التسخين.

أعطت الخلطات الحاوية على حصويات خبث الفولاذ مقاومة على الضغط أقل من الخلطة المرجعية عند درجة حرارة 800°C، ويعود ذلك إلى عدم استقرار حصويات خبث الفولاذ عند تعرضها لدرجات الحرارة العالية.

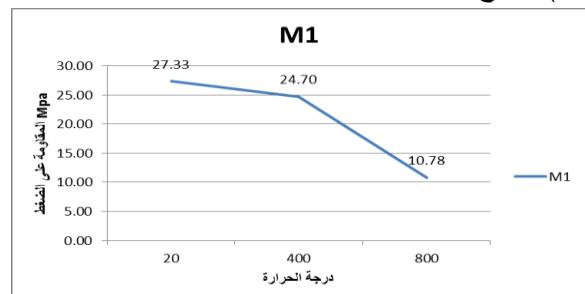
10-آلية تسخين العينات:

تم استخدام فرن مزود بوشائع كهربائية في أحد معامل مركز الدراسات والبحوث العلمية، وتم اقتراح برنامج زمني لتسخين العينات بمعدل خمس درجات بالدقيقة مع ثبات درجة الحرارة عند نقطة الذروة لمدة ساعة، والسماح للعينات بالتبريد ضمن الفرن بعد اطفائه منعاً لحصول صدمة حرارية، حيث تم تسخين العينات حتى درجة حرارة 400 و 800°C.

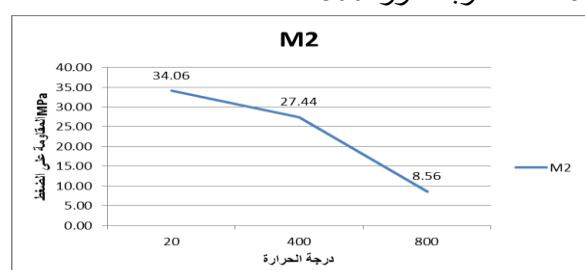
11-خواص الخرسانة المتصلبة:

1- مقاومة الخرسانة على الضغط:

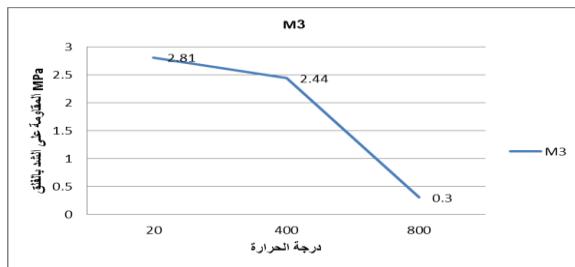
تم التحقق من مقاومة العينات على الضغط وذلك بعد زمن انضاج 28 يوم، حيث تم صب 5 عينات مكعبية لكل حالة م دروسة بأبعاد (10*10*10) سم، وتم تسخين العينات حتى درجة حرارة 400 و 800°C، تبين الأشكال (11) و (12) و (13) نتائج هذا الاختبار.



الشكل (11) تغير المقاومة على الضغط مع تغير درجة الحرارة للخلطة M1. يوضح الشكل (11) أن المقاومة على الضغط للخلطة المرجعية تتناقصت بنسبة 9.6% عند درجة حرارة 400°C و 60% عند درجة حرارة 800°C.



الشكل (12) تغير المقاومة على الضغط مع تغير درجة الحرارة للخلطة M2.



الشكل (16) نتائج المقاومة على الشد بالفلق للخطة M3.

يوضح الشكل (16) أن المقاومة على الشد بالفلق للخطة M3 تناقصت بنسبة 13% عند درجة حرارة 400°C، و 89% عند درجة حرارة 800°C.

نستنتج من الأشكال (14) و(15) و(16) ما يلي:

تعطي الخلطات التي تحوي على حصويات خبث الفولاذ بشكل عام قيم أعلى للمقاومة على الشد بالفلق مقارنة بخلطة الحصويات الدولوميتية وذلك قبل التسخين، ويعود ذلك إلى خواص حصويات خبث الفولاذ الجيدة من حيث الوزن النوعي ومقاومة الاهتراء وسطحها الخشن، مما يجعلها مقاومة لاجهادات الشد الناتجة.

كانت نسبة الانخفاض في المقاومة على الشد بالفلق للخلطات التي تحوي على حصويات خبث الفولاذ أكبر من الخلطات التي تحوي على حصويات دولوميتية فقط، ومع ذلك أعطت تلك الخلطات قيم أكبر للمقاومة على الشد بالفلق من خلطات الحصويات الدولوميتية، ويعود ذلك إلى القيمة الكبيرة التي تملكتها قبل التسخين.

أعطت الخلطات الحاوية على حصويات خبث الفولاذ مقاومة على الشد بالفلق أقل من الخلطة المرجعية عند درجة حرارة 800°C، ويعود ذلك إلى عدم استقرار حصويات خبث الفولاذ عند تعرضها لدرجات الحرارة العالية.

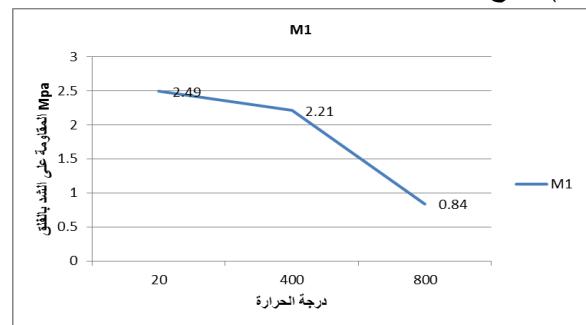
12-3- البنية المجهرية:

تم استخدام المجهر الضوئي لرصد التغيرات الفيزيائية لشريائج

نستنتج أنه يمكن استخدام حصويات خبث الفولاذ الخشنة كبديل جزئي وكلي لحصويات المقالع الخشنة عند درجات الحرارة العادية، ويمكن استخدام حصويات خبث الفولاذ الخشنة كبديل جزئي أو كلي للمنشآت المعرضة لدرجة حرارة حتى 400°C لما لها دور في تحسين المقاومة على الضغط للخرسانة.

12-2- مقاومة الخرسانة لقوة الشد بالفلق:

تم التحقق من مقاومة العينات لقوة الشد بالفلق وذلك بعد زمن انصاص 28 يوم، حيث تم صب 5 عينات لكل حالة مدرسوسة بقطر 7.5 سم وارتفاع 15 سم، يبيّن الشكل (14) و(15) و(16) نتائج هذا الاختبار.



الشكل (14) نتائج المقاومة على الشد بالفلق للخطة M1.

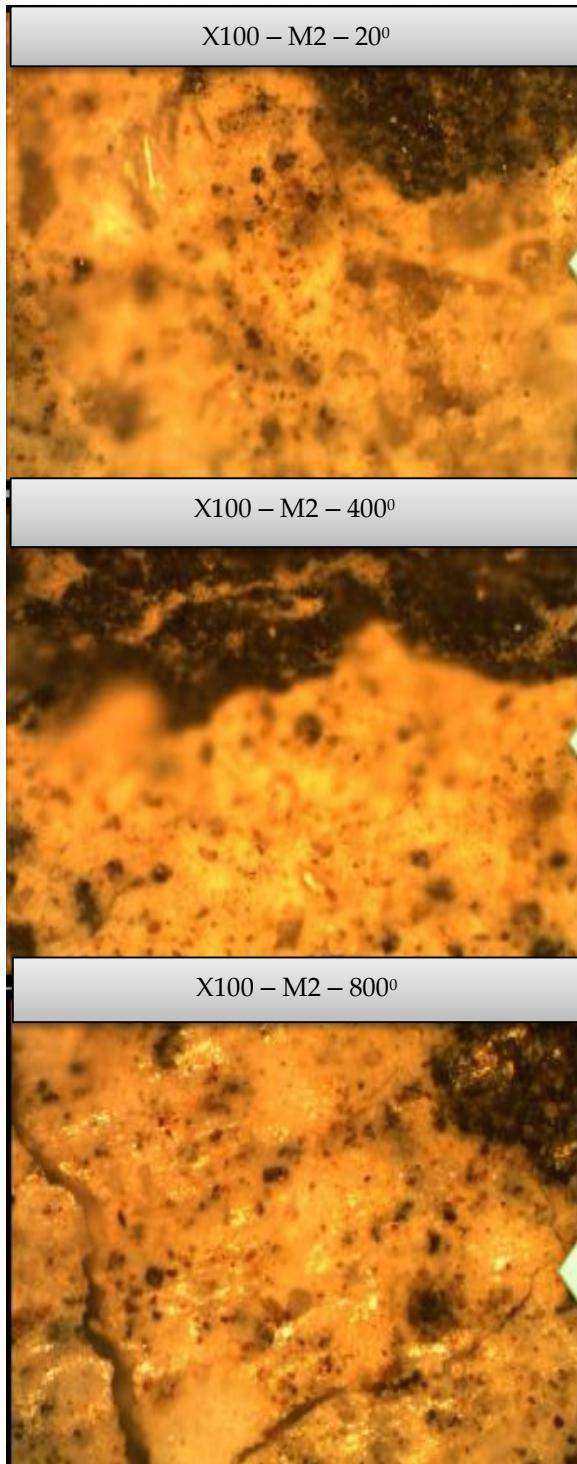
يوضح الشكل (14) أن المقاومة على الشد بالفلق للخطة M1 تناقصت بنسبة 11.2% عند درجة حرارة 400°C، و 66% عند درجة حرارة 800°C.



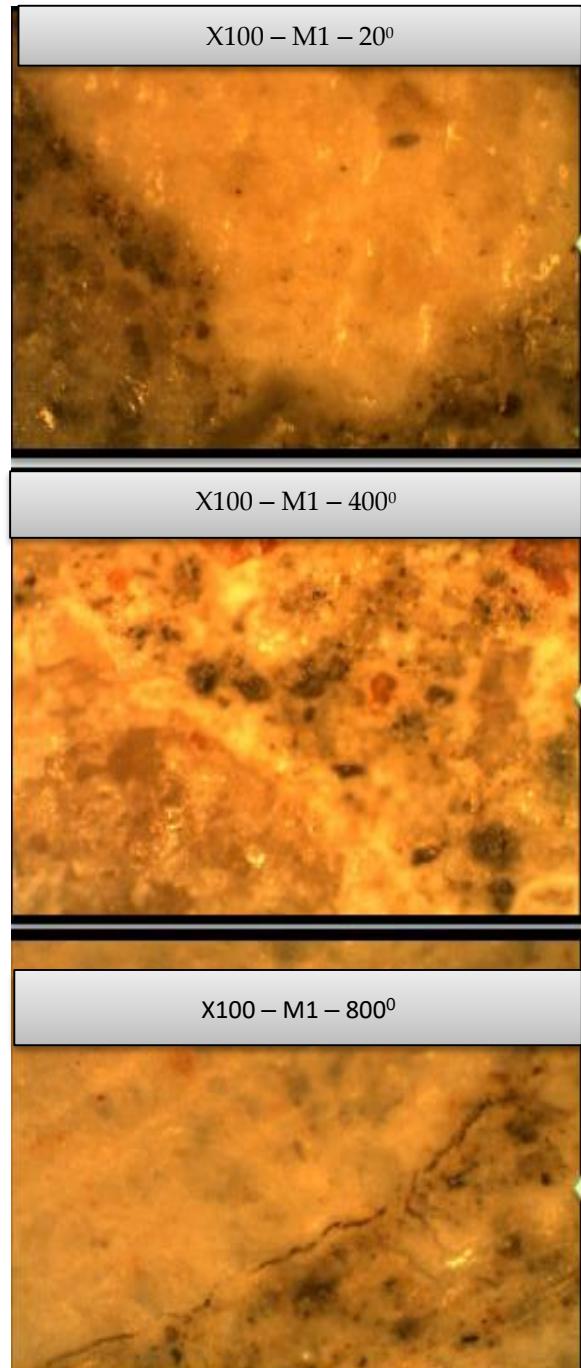
الشكل (15) نتائج المقاومة على الشد بالفلق للخطة M2.

يوضح الشكل (15) أن المقاومة على الشد بالفلق للخطة M2 تناقصت بنسبة 18.5% عند درجة حرارة 400°C، و 90% عند درجة حرارة 800°C.

من العينات الخرسانية وذلك بعد تعرضها لدرجات الحرارة
800،400 °C وتبين الأشكال (17) و(18) و(19) البنية
المجهرية المدرستة.



الشكل(18)البنية المجهرية للخلطة M2



الشكل(17)البنية المجهرية للخلطة M1

لوحظ تشققات شعرية بسيطة عند درجة حرارة 400 لـ 400 العينات

التي تحوى على حصويات خبث الفولاذ، بينما كانت عينات الخلطة المرجعية سليمة تقريباً.

لوحظ تشققات في كافة عينات الدراسة عند درجة حرارة 800، ولكن كانت أبعاد الشقوق في العينات التي تحوى على حصويات خبث الفولاذ أكبر من العينات المرجعية، بالإضافة إلى ملاحظة تشققات ضمن جسم حصوية خبث الفولاذ، وهو ما يدعم استنتاج عدم استقرار حصويات خبث الفولاذ عند درجات الحرارة العالية.

النتائج والتوصيات:

- الوزن النوعي لحصويات خبث الفولاذ أكبر بمقدار 22 % من حصويات الدولوميتية، ويحوي على نسبة عالية من أكسيد الحديد، بالإضافة إلى نسبة الامتصاص العالية التي يتصرف بها.

- استخدام حصويات خبث الفولاذ في الخرسانة يحسن من الخواص الميكانيكية للخرسانة في الظروف التقليدية.

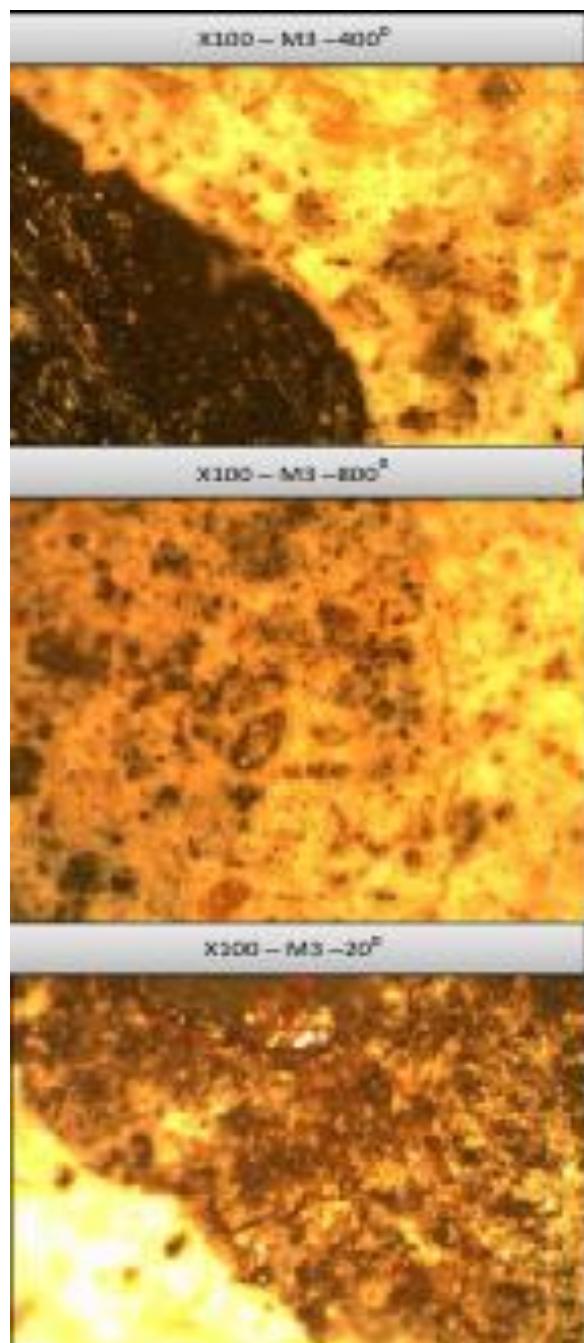
- تتأثر الخواص الميكانيكية الخرسانية التي تحوى على حصويات خبث الفولاذ بشكل سلبي عند التعرض لدرجات الحرارة العالية.

- تسلك الخرسانة التي تحوى على حصويات خبث الفولاذ سلوك مختلف عند التعرض لاجهادات قوة الضغط واجهادات قوة الشد بالفلق

- يوصى باستخدام حصويات خبث الفولاذ كبديل لحصويات المقالع وبنسب استبدال جزئية أو كافية وذلك في ظروف الخرسانة التقليدية.

- يجب معالجة حصويات خبث الفولاذ قبل استخدامها في الخلطات المدروسة على تحمل درجات الحرارة العالية.

المتمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595).



الشكل(19) البنية المجهرية للخلطة M3

توضح الأشكال (17) و(18) و(19) مايلي: البنية المجهرية لكافة العينات سليمة قبل التسخين ولم يتم رصد تشققات أو فراغات.

References:

- [1] Australasian Slag Association. (2002). a guide to the use of iron and steel slag in roads. Australasian Slag Association Inc.P12-35.
- [2] Hager ,I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. Bulletin of the polish academy of sciencesS. Vol. 61, No. 1.Pages 145-154.
- [3] Husain, A, Ahmad, J, Mujeeb ,A and Ahmed, R.(2016) Effects of temperature on concrete.International Journal of Advances Research in Science and Engineering, Volume 5 Issue 3.Pages33-42.
- [4] Lewis, D.W. (1982) Properties and Uses of Iron and Steel Slags, National Slag Association,Symposium on Slag National Institut for Transport and Road Research. Pages 182.
- [5] Mundhada, A, R and Pofale, A. D.(2015). Effect of High Temperature on Compressive Strength of Concrete. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), Volume 12, Issue 1 Ver. II.Pages 66-70.
- [6] Naus, D, J. (2005). The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures—A Literature Review. Under Interagency Agreement No. 1886-N674-1Y. Pages 204.
- [7] Netinger, I, Jelèiæ, R, Marija, and Mladenoviè, A. (2012). Concrete containing steel slag aggregate: Performance after high temperature exposure. Pages 1347-1352.
- [8] UKALA, DC. (2019). Effect of Heat Intensity and Duration on the Compressive Strength of Concrete. Vol. 23 (9) Pages 1637-1642.