https://jsras.rcc.edu.ly/
Vol.3 No.0 (2026), 88-95
Article history:
Received:
Accepted:
Published: 18Nov.2026

Journal of Sustainable Research in Applied Sciences

JSRAS

Recycling iron waste in sustainable Concrete

Dr.Nouri Mohamed Gomaa Al-Basha [1], Nour Al-Huda Mahjoub Ali Abu Al-Qasim [2, *]
[1] Civil Engineering, department of Sabratha, Sabratha, Libya nuri.elbasha@sabu.edu.ly
[2] Civil Engineering Department, University of Sabratha, Sabratha, Libya of Sabratha, Libya mhnoor080@gmail.com
* Nour Al-Huda Mahjoub Ali Abu Al-Qasim

keywords
Concrete, Steel plant waste, Electric Arc Furnace slag, coarse aggregate, sustainability

Abstract
The steel industry has experienced rapid growth over recent decades, leading to the generation of large quantities of solid waste, particularly steel plant slag, which represents both an environmental and economic challenge if not effectively utilized. On the other hand, coarse aggregate is a fundamental constituent of concrete, and the increasing demand for natural aggregates is causing the depletion of natural resources. This study aims to review and analyze previous research that has investigated the use of steel plant slag, particularly Electric Arc Furnace (EAF) slag, as a partial or full replacement for natural coarse aggregate in concrete, with a focus on the effects of pre-treatment methods and replacement ratios on concrete performance. The results of the reviewed studies indicate that the use of treated steel slag can lead to an improvement in compressive strength ranging approximately from 5% to 30% compared to conventional control concrete. Enhancements were also observed in flexural strength and modulus of elasticity at appropriate replacement levels. Conversely, most studies reported a reduction in workability, with slump values decreasing by approximately 20% to 50% as the replacement ratio increases. Furthermore, the findings highlight that pre-treatment processes, particularly aging (weathering), play a critical role in improving volume stability and explaining the variability in previous research results, as the use of untreated slag has been associated with potential long-term expansive risks. The reviewed literature suggests the existence of an optimum replacement ratio for steel slag as coarse aggregate, typically ranging between 30% and 60%, where a better balance is achieved between improved mechanical properties and acceptable workability. Accordingly, this study concludes that the use of steel plant slag as a substitute for natural coarse aggregate is a promising and sustainable solution, provided that appropriate pre-treatment is applied and optimal replacement ratios are selected. Moreover, there is a clear need for the development of standardized design guidelines to support the safe and efficient application of these by-products in concrete

إعادة تدوير مخلفات الحديد في الخرسانة المستدامة

نوري محمد جمعة الباشا [1،*]، نور الهدى محجوب علي أبو القاسم [2]،
[1] قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة صبراتة، ليبيا
[2] طالبة دراسات عليا(ماجستير)، قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة صبراتة، ليبيا
mhnoor080@gmail.com
نور الهدى محجوب علي أبو القاسم*

الكلمات المفتاحية
خرسانة، مخلفات مصانع الحديد، الاستدامة، خبث فرن القوس الكهربائي الركام الخشن

الملخص
شهدت صناعة الحديد والصلب نموًا متسارعًا خلال العقود الأخيرة، مما أدى إلى إنتاج كميات كبيرة من المخلفات الصلبة، وعلى رأسها خبث مصانع الحديد، والذي يمثل تحديًا بيئيًا واقتصاديًا في حال عدم استثماره بصورة فعّالة. في المقابل، يُعد الركام الخشن أحد المكونات الرئيسية للخرسانة، ويؤدي الاستهلاك المتزايد للركام الطبيعي إلى استنزاف الموارد الطبيعية. تهدف هذه الدراسة إلى مراجعة وتحليل الدراسات السابقة التي تناولت استخدام خبث مصانع الحديد، وبخاصة خبث أفران القوس الكهربائي، كبديل للركام الخشن في الخرسانة، مع التركيز على تأثير المعالجة المسبقة ونسبة الاستبدال على أداء الخرسانة.
أظهرت نتائج الدراسة أن استخدام خبث الحديد المعالج يمكن أن يؤدي إلى تحسن في مقاومة الضغط، إلى جانب تحسن في مقاومة الانحناء ومعامل المرونة عند نسب استبدال مناسبة. في المقابل، سجلت غالبية الدراسات انخفاضًا في قابلية التشغيل، حيث تراوحت نسبة الانخفاض في قيم الهبوط بين 20% و50%مع زيادة نسب الاستبدال. كما بينت الدراسة أن المعالجة المسبقة، ولا سيما التعتيق، تمثل العامل الحاسم في تحسين الاستقرار الحجمي وتفسير تباين نتائج الدراسات السابقة، إذ ارتبط استخدام الخبث غير المعالج بمخاطر تمدد ضار على المدى الطويل.
وتشير نتائج الدراسات إلى وجود نسبة استبدال مثلى لخبث الحديد كركام خشن، غالبًا ما تتراوح بين 30% و60%حيث تحقق هذه النسب توازنًا أفضل بين تحسن الخواص الميكانيكية والحفاظ على قابلية تشغيل مقبولة. وبناءً على ذلك، خلصت هذه الدراسة إلى أن استخدام خبث مصانع الحديد كبديل للركام الخشن يُعد خيارًا مستدامًا وواعدًا، شريطة الالتزام بالمعالجة المسبقة المناسبة واختيار نسب الاستبدال المثلى، مع التأكيد على الحاجة إلى تطوير إرشادات تصميم واضحة تدعم التطبيق الآمن والفعّال لهذه المخلفات في الخرسانة.

1. المقدمة

تُعدّ الخرسانة من أكثر المواد الإنشائية استخدامًا على مستوى العالم، نظرًا لتوافر مكوناتها وتعدد تطبيقاتها في مختلف أنواع المنشآت. ويُشكّل الركام، بنوعيه الناعم والخشن، ما يقارب 70–80% من الحجم الكلي للخرسانة، الأمر الذي أدى إلى زيادة الطلب على الركام الطبيعي، وما يصاحبه من استنزاف للموارد الطبيعية وتأثيرات بيئية سلبية ناتجة عن عمليات الاستخراج والنقل. في المقابل، شهدت صناعة الحديد والصلب نموًا ملحوظًا خلال العقود الأخيرة، حيث تجاوز الإنتاج العالمي من الفولاذ 1.89 مليار طن سنويًا [1] ، وينتج عن هذه الصناعة كميات كبيرة من المخلفات الصلبة، وعلى رأسها خبث الحديد، والذي يُقدَّر إنتاجه عالميًا بمئات الملايين من الأطنان سنويًا. وغالبًا ما يتم التخلص من هذه المخلفات بطرق تقليدية مثل التخزين المكشوف أو الردم، مما يشكل عبئًا بيئيًا واقتصاديًا، وفي الوقت ذاته يمثل موردًا محتملاً يمكن الاستفادة منه في التطبيقات الهندسية. وعلى الصعيد المحلي، تُعدّ الشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة من أكبر المنشآت الصناعية في ليبيا، بطاقة إنتاجية تتراوح بين 1.2-1.6 مليون طن من الفولاذ سنويًا[2]. وبالاعتماد على معدلات توليد الخبث المرتبطة بصناعة الحديد (نحو 10–20% من إنتاج الفولاذ)، يمكن تقدير كميات كبيرة من خبث الحديد سنويًا، وهي كميات لا يُستفاد من معظمها بصورة فعّالة حتى الآن، مما يبرز الحاجة إلى إيجاد حلول مستدامة لإعادة توظيف هذه المخلفات. وقد تناولت العديد من الدراسات السابقة إمكانية استخدام مخلفات مصانع الحديد، وبخاصة خبث أفران القوس الكهربائي، في صناعة الخرسانة بطرق مختلفة، سواء كبديل جزئي للركام أو كمواد مضافة. إلا أن استخدام خبث الحديد كبديل للركام الخشن يكتسب أهمية خاصة نظرًا لتأثيره المباشر على الخواص الميكانيكية للخرسانة وعلى الاستدامة البيئية.

من جهة أخرى، تشير بعض الدراسات إلى وجود تحديات مرتبطة باستخدام خبث الحديد، خاصة فيما يتعلق بالاستقرار الحجمي الناتج عن وجود أكاسيد الكالسيوم والمغنيسيوم الحرة، والتي قد تؤدي إلى تمدد ضار في حال استخدام الخبث دون معالجة مسبقة مناسبة. وقد أظهرت الأبحاث أن المعالجة المسبقة، مثل التعتيق، تلعب دورًا أساسيًا في تحسين أداء الخرسانة المحتوية على خبث الحديد، وهو ما يفسر التباين الملحوظ في نتائج الدراسات السابقة. وبناءً على ذلك، تهدف هذه الدراسة المرجعية إلى مراجعة وتحليل الدراسات السابقة التي تناولت استخدام خبث مصانع الحديد كبديل للركام الخشن في الخرسانة، مع التركيز على دور المعالجة المسبقة في تحسين الخصائص الميكانيكية وتفسير اختلاف نتائج الأبحاث، بما يسهم في تقييم إمكانية الاستخدام الآمن والمستدام لهذه المخلفات في التطبيقات الخرسانية.

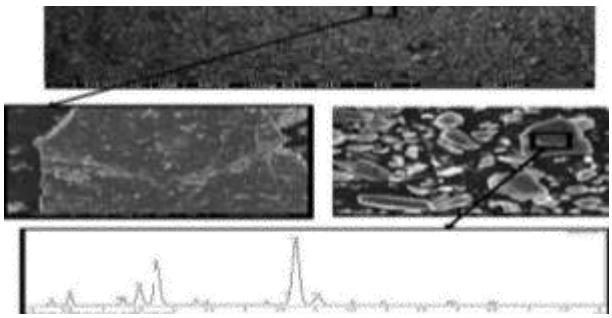
2. .أنواع مخلفات مصانع الحديد والصلب وطرق معالجتها

تنتج صناعة الحديد والصلب كميات كبيرة من المخلفات الصلبة الثانوية التي تختلف في خصائصها الفيزيائية والكيميائية باختلاف نوع الفرن المستخدم وتقنيات التشغيل. وتمثل هذه المخلفات تحديًا بيئيًا في حال التخلص منها بطرق غير مناسبة، وفي المقابل توفر فرصة واعدة لإعادة التدوير والاستخدام في العديد من التطبيقات الهندسية، لا سيما استخدامها كبديل للركام الخشن في الخرسانة.

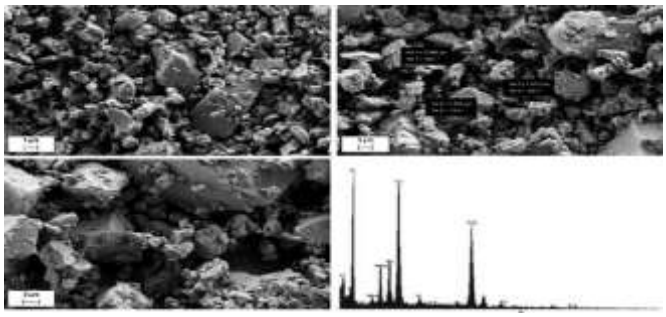
1.2 خبث الفرن العالي (*Blast Furnace Slag - BFS*)

تعد خبث الفرن العالي ناتجًا ثانويًا لعملية إنتاج الحديد الغفل داخل الأفران العالية، حيث ينفصل عن المعدن المنصهر نتيجة لاختلاف الكثافة. ويتكون هذا الخبث أساسًا من أكاسيد الكالسيوم والسيليكون والألومنيوم والمغنيسيوم، وتتشابه تركيبته الكيميائية إلى حد كبير مع مكونات الأسمنت. يوجد خبث الفرن العالي في صورتين رئيسيتين: خبث مبرد بالهواء-Air cooled slag وخبث محبب مبرد بالماء Granulated slag. ويتميز الخبث المبرد بالهواء بتركيب بلوري وكثافة مناسبة تجعله صالحًا للاستخدام كركام خشن بعد المعالجة. الشكل (1) يوضح البنية الميكروية لخبث الفرن العالي قبل المعالجة باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، حيث تظهر البنية المسامية وعدم التجانس. بينما الشكل (2) يوضح الخبث بعد التكسير والغربلة، حيث تصبح الحبيبات أكثر انتظامًا ذات زوايا حادة وملمس خشن، مما يعزز من خواص التماسك داخل الخرسانة

الشكل (1) صورة (SEM) لخبث الفرن العالي قبل المعالجة، [3]



الشكل (2) SEM لحبيبات خبث الفرن العالي بعد التكسير والغربلة، [3]



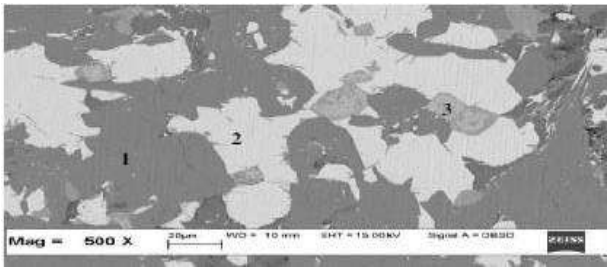
2.2 خبث فرن القوس الكهربائي (*Electric Arc Furnace Slag - EAFS*)

ينتج خبث فرن القوس الكهربائي أثناء عملية صهر الخردة المعدنية لإنتاج الفولاذ، ويُعد من أهم المخلفات الصناعية القابلة لإعادة الاستخدام في مجال الخرسانة، نظرًا لخصائصه الميكانيكية الجيدة مثل الكثافة العالية، وقوة التحمل، ومقاومة التآكل.

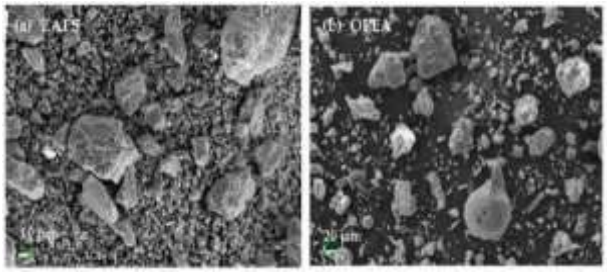
يحتوي هذا النوع من الخبث على نسب مرتفعة من أكاسيد الحديد والكالسيوم والسيليكون، مما يمنحه خصائص فيزيائية مميزة، حيث يتميز بسطح خشن وزوايا حادة، وهو ما يعزز من قوة التماسك بين الركام والعجينة الأسمنتية داخل الخرسانة.

الشكل (3) يوضح البنية الميكروية لخبث فرن القوس الكهربائي في حالته الخام قبل المعالجة باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، حيث تظهر الحبيبات غير المنتظمة والملمس الخشن والبنية غير المتجانسة للمادة. في حين الشكل (4) يوضح شكل الحبيبات بعد عمليات التكسير والمعالجة، حيث تصبح أكثر انتظامًا مع وضوح ملامح السطح وزيادة خشونته، مما يجعلها أكثر ملاءمة للاستخدام كركام خشن في الخلطات الخرسانية

الشكل (3) صورة (SEM) لخبث فرن القوس الكهربائي في حالته الخام قبل المعالجة [4]



الشكل (4) صورة (SEM) لخبث فرن القوس الكهربائي بعد التكسير أو المعالجة [5]



2.3 مخلفات أخرى من صناعة الحديد والصلب

بالإضافة إلى خبث الأفران، تنتج مصانع الحديد والصلب عدة أنواع أخرى من المخلفات الصناعية الثانوية، والتي تختلف في تركيبها وخصائصها الفيزيائية والكيميائية. ومن أبرز هذه المخلفات غبار الأفران (Dust), وحل الأفران(Sludge) , قشور الدرفلة(Mill Scale) . تُستخدم هذه المخلفات عادة في تطبيقات محدودة، مثل المواد المالئة أو الإضافات المعدنية في بعض الصناعات، نظرًا لخصائصها الدقيقة وصعوبة استخدامها كركام خشن في الخرسانة. في المقابل، يظل خبث الفرن العالي وخبث فرن القوس الكهربائي هما المصدرين الرئيسيين المستخدمين كبدائل للركام الخشن في التطبيقات الخرسانية. الشكل (5) يوضح أمثلة لمخلفات أخرى ناتجة عن صناعة الحديد والصلب.

الشكل (5) أمثلة لمخلفات أخرى من مصانع الحديد



3. معالجة مخلفات مصانع الحديد لاستخدامها كركام خشن في الخرسانة

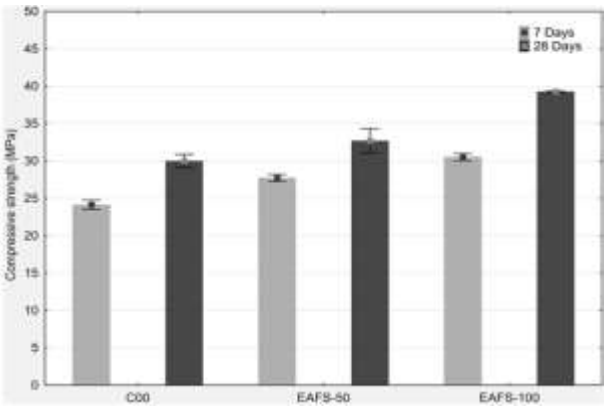
قبل استخدام مخلفات مصانع الحديد كركام خشن في الخرسانة، يجب إخضاعها لسلسلة من العمليات المعالجة الفيزيائية والميكانيكية بهدف تحسين خصائصها وضمان ملاءمتها لمتطلبات الاستخدام في الخلطات الخرسانية. تبدأ هذه المعالجة بمرحلة التبريد والتعتيق (Aging)، حيث يُترك الخبث لفترة زمنية كافية للسماح باستقرار المركبات غير المتفاعلة وتقليل احتمالية حدوث التمدد الحجمي الناتج عن وجود أكاسيد حرة مثل CaO وMgO، والتي قد تؤثر سلبًا على الاستقرار الحجمي للخرسانة. بعد ذلك، يتم تكسير الكتل الكبيرة من الخبث للحصول على أحجام مناسبة للركام الخشن، يليها إجراء عمليات الغربلة لضبط التدرج الحبيبي بما يتوافق مع المواصفات القياسية للركام المستخدم في الخرسانة. كما تُستخدم تقنية الفصل المغناطيسي لإزالة الشوائب المعدنية العالقة، والتي قد تؤثر على تجانس الخلطة الخرسانية أو خواصها الميكانيكية. وفي المرحلة النهائية، يتم غسل الخبث وتجفيفه لإزالة الأتربة والمواد الناعمة والأملاح السطحية. تسهم هذه العمليات مجتمعة في تحسين الخصائص الفيزيائية للخبث، مثل تقليل الامتصاص وزيادة الكثافة وتحسين المتانة، كما تقلل من احتمالية حدوث تفاعلات غير مرغوبة داخل الخرسانة، مما ينعكس إيجابًا على مقاومة الضغط والمتانة على المدى الطويل.

4. الدراسات السابقة

[6] Rojas.et. al.(2023) 4.1)

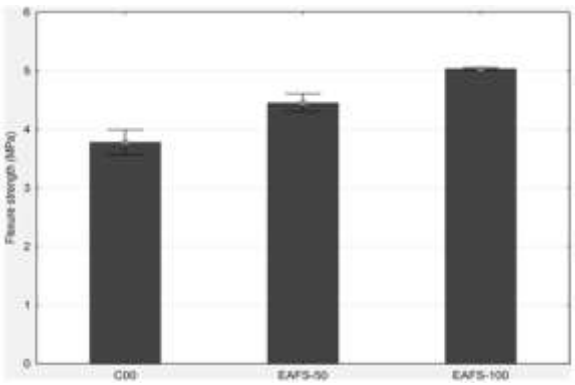
هدفت هذه الدراسة إلى تقييم استخدام خبث فرن القوس الكهربائي (EAFS)كبديل جزئي وكلي للركام الخشن الطبيعي في الخرسانة، مع تحليل تأثيره على الخواص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية، ومدى ملاءمته كمادة ركام مستدامة. استخدمت الدراسة خبثًا من أحد مصانع الصلب بعد إخضاعه لتعتيق طبيعي لمدة ثلاثة أشهر بهدف تحسين الاستقرار الحجمي وتقليل تأثير الأكاسيد الحرة. وتم إعداد ثلاث خلطات: خرسانة مرجعية(C00) ، وخلطة بنسبة استبدال 50(EAFS-50) %، وأخرى بنسبة 100(EAFS-100) %، مع تثبيت نسبة الماء إلى الأسمنت عند 0.48. أظهرت نتائج الهبوط انخفاض قابلية التشغيل مع زيادة نسبة الخبث، حيث تراجعت قيم الهبوط من 80 مم للخلطة المرجعية إلى 60 مم و30 مم لخلطتي EAFS-50وEAFS-100على التوالي، ويُعزى ذلك إلى الشكل الزاوي والملمس الخشن لحبيبات الخبث. في المقابل، سجلت مقاومة الضغط تحسنًا ملحوظًا؛ إذ ارتفعت عند عمر 28 يومًا بنسبة 8.97% عند استبدال 50%، وبنسبة 30.90% عند الاستبدال الكامل. ويُعزى هذا التحسن إلى زيادة التماسك بين العجينة الأسمنتية والخبث، مما يحسّن منطقة الانتقال البيني (Interfacial Transition Zone, ITZ). والشكل (6) يوضح تطور مقاومة الضغط للخلطات المختلفة عند أعمار 7 و28 يومًا.

الشكل (6) مقاومة الضغط لعينات الخرسانة عند عمر 7 و28 يوم [6]



كما أظهرت نتائج مقاومة الانحناء تحسنًا واضحًا مع زيادة محتوى الخبث، حيث ارتفعت بنسبة 17.99% و35.71% لخلطتي EAFS-50 وEAFS-100 على التوالي مقارنة بالخرسانة المرجعية. والشكل (7) يوضح مقاومة الانحناء للخرسانة عند عمر 28 يومًا، ويعكس ذلك قدرة خبث فرن القوس الكهربائي على تحسين الترابط الداخلي للخرسانة وزيادة مقاومتها للتشقق

الشكل (7) مقاومة الإنحناء للخرسانة عند عمر 28 يوم [6]

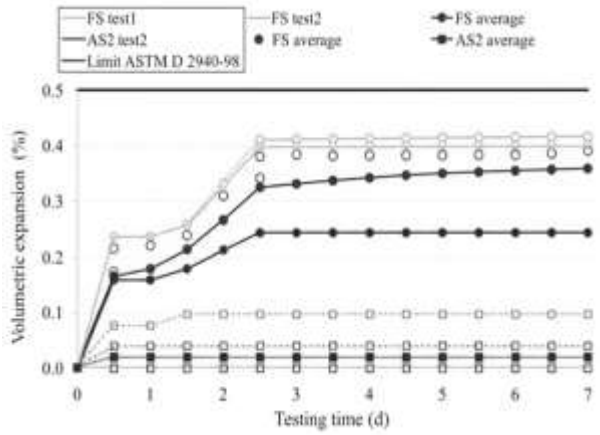


وفيما يتعلق بمعامل المرونة، سجلت الخرسانة المحتوية على 50% و100% من الخبث زيادات قدرها 5.05% و25.02% على التوالي مقارنة بالخرسانة التقليدية، مما يدل على زيادة صلابة الخرسانة عند استخدام الخبث كركام خشن. أما بالنسبة للخواص الفيزيائية، فقد لوحظ انخفاض في امتصاص الماء والمسامية مع زيادة نسبة الخبث، حيث انخفض امتصاص الماء من 4.48% في الخرسانة المرجعية إلى 3.68% عند الاستبدال الكامل، كما انخفضت المسامية بنسبة تقارب 8%، مما يشير إلى تكوّن بنية داخلية أكثر كثافة في الخرسانة المحتوية على الخبث. وتخلص الدراسة إلى أن خبث فرن القوس الكهربائي المعالج يمكن استخدامه كبديل جزئي أو كلي للركام الخشن الطبيعي، مع تحقيق تحسن ملحوظ في مقاومة الضغط والانحناء ومعامل المرونة، مقابل انخفاض في قابلية التشغيل. كما تشير النتائج إلى أن الاستبدال حتى 100% ممكن من الناحية الميكانيكية، إلا أن نسب الاستبدال المتوسطة (مثل 50%) تمثل توازنًا أفضل بين الأداء الميكانيكي وقابلية التشغيل، مما يجعل الخبث خيارًا واعدًا ضمن استراتيجيات الخرسانة المستدامة.

2.4 Rondi.et.al. (2016) [7]

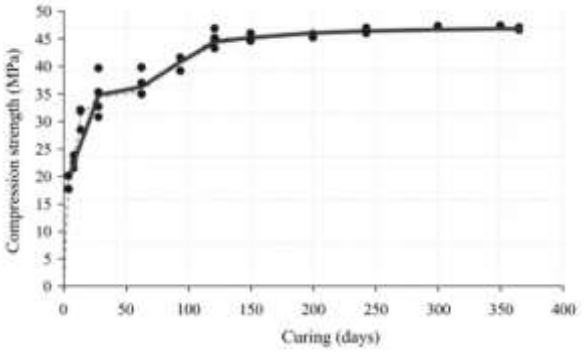
قام الباحثون بإجراء دراسة تجريبية لتقييم الخصائص التقنية والبيئية لخبث فرن القوس الكهربائي(EAF steel slag) ، بالإضافة إلى دراسة السلوك الميكانيكي للخرسانة المصممة باستخدامه كبديل كامل (100%) للركام الخشن الطبيعي. وتهدف الدراسة إلى التحقق من إمكانية إنتاج خرسانة تعتمد كليًا على ركام صناعي معاد تدويره. تم استخدام نوعين من الخبث، وهما خبث حديث وآخر مُعتّق، تم جمعهما من أحد مصانع الصلب في شمال إيطاليا، حيث خضعا لعمليات معالجة ميكانيكية للحصول على حجم حبيبي أقصى يبلغ 31.5 مم. كما أُجريت مجموعة من الاختبارات الفيزيائية والكيميائية والبيئية وفقًا للمواصفات الأوروبية، شملت الكثافة، الامتصاص، مقاومة التآكل، الاستقرار الحجمي، واختبارات الرشح البيئي. بعد ذلك، تم تصميم خلطة خرسانية من الصنف C25/30 باستخدام الخبث المُعتّق كركام خشن بنسبة استبدال 100%، مع تثبيت نسبة الماء إلى الأسمنت عند 0.43، ومقارنتها بخرسانة مرجعية تحتوي على ركام طبيعي. أظهرت نتائج اختبارات الاستقرار الحجمي أن الخبث المُعتّق سجل تمددًا منخفضًا جدًا بمتوسط يقارب 0.02%، في حين سجل الخبث الحديث قيم تمدد أعلى، إلا أنها بقيت ضمن الحدود المسموح بها (0.5%). والشكل (8) يوضح نتائج الاستقرار الحجمي لعينات الخبث، مما يؤكد أهمية المعالجة المسبقة، خاصة التعتيق، في تحسين استقرار الخبث قبل استخدامه في الخرسانة.

الشكل (8): نتائج استقرار الحجمي لعينات الخبث [7]



أما من ناحية الخواص الميكانيكية، فقد أظهرت نتائج اختبار مقاومة الضغط أن الخرسانة المصنوعة باستخدام 100% من خبث فرن القوس الكهربائي كركام خشن حققت مقاومة تراوحت بين 35 و45 ميغا باسكال، مع زيادة تدريجية في المقاومة حتى عمر 120 يومًا، ثم استقرار القيم بعد ذلك. و الشكل (9) يوضح نتائج اختبارات مقاومة الضغط للعينات المكعبة عند أعمار معالجة مختلفة. كما لم يُلاحظ أي انخفاض في المقاومة حتى بعد مرور سنة من المعالجة، مما يدل على استقرار طويل الأمد للخرسانة المحتوية على الخبث.

الشكل (9) نتائج اختبارات الضغط للعينات المكعبة عند اعمار معالجة مختلفة [7]



كما أظهرت الخرسانة المحتوية على الخبث قيمة عالية لمعامل المرونة بلغت نحو 46 ميغا باسكال، وهي أعلى من القيم المتوقعة للخرسانة التقليدية، ويُعزى ذلك إلى الصلابة العالية لحبيبات الخبث مقارنة بالركام الطبيعي. في المقابل، سجلت الخرسانة كثافة نوعية مرتفعة بلغت نحو 3100 كغ/م^3، أي أعلى بحوالي 25% من الخرسانة التقليدية، نتيجة الكثافة العالية للخبث. وبخصوص الجوانب البيئية، بينت نتائج اختبارات الرشح أن تراكيز معظم العناصر الثقيلة كانت أقل من الحدود التنظيمية المسموح بها، مع تسجيل بعض التباين في تركيز الفناديوم والكروم الكلي، إلا أن ذلك لم يمنع إمكانية استخدام الخبث في الخرسانة، خاصة عند إدماجه داخل مصفوفة أسمنتية تحد من حركة الملوثات. لخصت هذه الدراسة أن استخدام خبث فرن القوس الكهربائي المُعتّق كبديل كامل للركام الخشن الطبيعي يمكن أن ينتج خرسانة ذات خواص ميكانيكية مستقرة ومناسبة للتطبيقات الإنشائية، مع تحقيق مقاومات ضغط جيدة ومعامل مرونة مرتفع، شريطة الالتزام بفترة تعتيق كافية لضمان الاستقرار الحجمي. وتؤكد النتائج أن الاستبدال بنسبة 100% ممكن من الناحية الفنية، مما يعزز دور خبث الحديد كخيار مستدام لتقليل استهلاك الركام الطبيعي.

3.4 Mekonen. et. al. (2024) [8]

قام الباحثون بدراسة تأثير استبدال خبث الحديد كبديل جزئي للركام الخشن في الخرسانة المسلحة، مع تقييم مقاومة الضغط، مقاومة الانحناء، وسلوك الكمرات الخرسانية المسلحة تحت تأثير الأحمال، بهدف تحديد نسب الاستبدال المثلى لاستخدام خبث الحديد كمادة ركام مستدامة في العناصر الإنشائية. تم إعداد 30 مكعبًا لاختبارات مقاومة الضغط و10 كمرات

خرسانية مسلحة لاختبارات الانحناء، مع استخدام نسب استبدال للركام الخشن بلغت 25% و50% و75% و100%. أُجريت اختبارات مقاومة الضغط عند عمري 7 و28 يومًا، بينما تم اختبار مقاومة الانحناء على كمرات بأبعاد 150×150×750 مم. أظهرت نتائج اختبار الهبوط انخفاضًا في قابلية التشغيل مع زيادة نسبة الاستبدال، حيث تراجع الهبوط من 65 مم في الخرسانة المرجعية إلى 35 مم عند الاستبدال الكامل (100%)، ويُعزى ذلك إلى زيادة خشونة السطح وارتفاع امتصاص خبث الحديد مقارنة بالركام الطبيعي. فيما يتعلق بمقاومة الضغط، أظهرت النتائج تحسنًا ملحوظًا عند نسب الاستبدال المتوسطة، حيث سجلت أعلى مقاومة عند نسبة 50%، إذ بلغت مقاومة الضغط عند عمر 28 يومًا حوالي 43.9 ميغا باسكال مقارنة بـ 37.1 ميغا باسكال للخرسانة المرجعية، أي بزيادة تقارب 26%. أما مقاومة الانحناء، فقد أظهرت الكمرات الخرسانية المسلحة تحسنًا واضحًا عند استبدال 50% من الركام الخشن، حيث زادت مقاومة الانحناء بحوالي 13% مقارنة بالكمرات المرجعية. كما أظهرت منحنيات الحمل–الإزاحة سلوكًا أكثر مطيلية للكمرات المحتوية على 50% خبث، مما يدل على تحسن في القدرة على تحمل الأحمال قبل الفشل. وتخلص الدراسة إلى أن نسبة الاستبدال 50% تمثل النسبة المثلى لتحقيق توازن بين تحسين الخواص الميكانيكية (مقاومة الضغط والانحناء) والحفاظ على قابلية تشغيل مقبولة، مما يؤكد إمكانية استخدام خبث الحديد كبديل مستدام وفعال للركام الخشن في الخرسانة المسلحة.

5. مناقشة الدراسات السابقة

حظي استخدام خبث الحديد، وخاصة خبث الأفران الكهربائية (EAF slag)، باهتمام واسع في السنوات الأخيرة باعتباره أحد البدائل المستدامة للركام الطبيعي في الخرسانة، وذلك بسبب تأثيره الإيجابي المحتمل على الخواص الميكانيكية وتقليل الآثار البيئية الناتجة عن المخلفات الصناعية [6]–[10]. وقد ركزت أغلب الدراسات على تقييم تأثير نسب الاستبدال المختلفة على مقاومة الخرسانة، قابلية التشغيل، المتانة، والاستقرار الحجمي، مع محاولة تحديد النسبة المثلى التي تحقق أفضل أداء إنشائي وبيئي. اتفقت غالبية الدراسات على أن استخدام خبث الحديد بنسب استبدال متوسطة، غالبًا بين 25–50%، يؤدي إلى تحسن واضح في مقاومة الضغط مقارنة بالخرسانة التقليدية [6], [10], [15], [20], [39], [52]. فقد أظهرت إحدى الدراسات أن استبدال الركام الطبيعي بخبث الحديد بنسبة 50% أدى إلى زيادة مقاومة الضغط بحوالي 15% مقارنة بالخرسانة المرجعية [39]، بينما سجلت دراسة أخرى تحسنًا تجاوز 20% عند استخدام خبث الحديد في الخرسانة عالية الكثافة [20]. كما بينت الدراسات الأساسية المعتمدة في هذه الورقة [6]–[8] أن التحسن في الخواص الميكانيكية يرتبط بارتفاع كثافة الخبث وخشونة سطحه، مما يعزز الترابط بين الركام والعجينة الأسمنتية ويقلل من الفراغات الداخلية. كما دعمت نتائج العديد من الدراسات هذا الاتجاه، حيث سجلت الخرسانة المحتوية على خبث الحديد تحسنًا في مقاومة الشد والانحناء نتيجة زيادة التماسك الداخلي وتحسن منطقة الانتقال البيني بين الركام والعجينة الأسمنتية [17], [19], [24], [35], [40], [48], [50]. وأشارت بعض الدراسات إلى أن استخدام خبث الحديد في العناصر الخرسانية المسلحة ساهم في تحسين مقاومة التشقق وتقليل عرض الشروخ مقارنة بالخرسانة التقليدية [8], [19], [41]. كما أوضحت بعض الدراسات أن الخرسانة المحتوية على خبث الحديد أظهرت سلوكًا أكثر صلابة تحت الأحمال المتكررة، مما يدعم إمكانية استخدامها في المنشآت المرورية والعناصر المعرضة للأحمال الديناميكية [19], [44], [49] .

ورغم الاتفاق العام حول تحسن الخواص الميكانيكية، إلا أن الدراسات اختلفت فيما يتعلق بنسبة الاستبدال المثلى. فقد أوضحت بعض الدراسات أن أفضل أداء يتحقق عند نسب استبدال لا تتجاوز 50% [6], [15], [39], [52]، بينما أشارت دراسات أخرى إلى إمكانية استخدام نسب استبدال مرتفعة تصل إلى 75% أو حتى الاستبدال الكامل دون انخفاض كبير في مقاومة الخرسانة [14], [31], [43], [60]. وفي المقابل، بينت بعض الدراسات أن الاستبدال الكامل قد يؤدي إلى انخفاض مقاومة الضغط بنسبة تتراوح بين 5–12% نتيجة زيادة المسامية وضعف التشغيلية [24], [35], [45]. ويرجع هذا التباين إلى اختلاف طبيعة الخبث المستخدم، وطريقة معالجته، والتدرج الحبيبي، إضافة إلى اختلاف نسب الماء إلى الأسمنت وطرق المعالجة المستخدمة في كل دراسة.

فقد اتفقت أغلب الدراسات على أن زيادة نسبة خبث الحديد تؤدي إلى انخفاض الهبوط (Slump) بسبب الطبيعة الزاوية والخشنة لحبيبات الخبث وارتفاع معدل امتصاصها للماء [10], [14], [18], [24], [31], [43]. وقد أشارت بعض الدراسات إلى انخفاض قابلية التشغيل بنسبة تراوحت بين 10–25% عند زيادة نسبة الاستبدال إلى أكثر من 50% [35], [61]. ومع ذلك، أوضحت دراسات أخرى إمكانية معالجة هذه المشكلة باستخدام الملدنات الفائقة أو تحسين التدرج الحبيبي للركام [9], [20], [37], [56]. كما بينت بعض الدراسات أن التحكم في حجم حبيبات الخبث يلعب دورًا مهمًا في تقليل التأثير السلبي على التشغيلية وتحقيق توازن أفضل بين المقاومة وقابلية التشغيل [25],[55] .

أظهرت العديد من الدراسات تحسنًا واضحًا في مقاومة النفاذية وامتصاص الماء عند استخدام خبث الحديد [13], [15], [23], [33], [36], [38], [52], [53], [57]–[60]. فقد سجلت بعض الدراسات انخفاضًا في امتصاص الماء بنسبة تجاوزت 15% مقارنة بالخرسانة التقليدية [15], [59]، كما تحسنت مقاومة الخرسانة للهجوم الكبريتي والتآكل نتيجة انخفاض المسامية وتحسن الكثافة الداخلية [11], [22], [36], [38], [52]. وأوضحت بعض الدراسات أيضًا أن استخدام خبث الحديد ساهم في تحسين مقاومة الكربنة والأداء طويل الأمد للخرسانة، خاصة بعد معالجة الخبث أو كربنته قبل الاستخدام [13], [53],[58] . وفي المقابل، ركزت عدة دراسات على مشكلة الاستقرار الحجمي للخبث، حيث أشارت إلى أن وجود أكاسيد الكالسيوم والمغنيسيوم الحرة قد يؤدي إلى حدوث تمددات مستقبلية وتشقق في الخرسانة إذا تم استخدام الخبث دون معالجة مناسبة [12], [16], [46], [57], [63]. وقد أوضحت بعض الدراسات أن التمدد الحجمي قد يزداد عند استخدام نسب استبدال مرتفعة أو عند التعرض لظروف رطوبة عالية [16], [57]. ولهذا أكدت الدراسات الحديثة أهمية معالجة الخبث بالتعتيق أو الكربنة أو المعالجة الحرارية قبل استخدامه في الخرسانة، لما لذلك من دور في تحسين الاستقرار الحجمي وتقليل احتمالية التمدد [22], [29], [42], [57], [58], [67], [68].

أكدت الدراسات أن الكربنة المسبقة للخبث ساهمت في تقليل المسامية وتحسين الأداء البيئي للخرسانة [58] ,[70] .ومن الجانب البيئي، اتفقت الدراسات الحديثة على أن استخدام خبث الحديد في الخرسانة يساهم في تقليل استهلاك الركام الطبيعي والحد من تراكم المخلفات الصناعية، إضافة إلى خفض الانبعاثات الكربونية المرتبطة بصناعة الخرسانة التقليدية [18], [21], [22], [26]–[30], [42], [47], [64], [67]–[70]. كما أوضحت بعض الدراسات أن إعادة تدوير خبث الحديد داخل المواد الخرسانية ينسجم مع مبادئ الاقتصاد الدائري ويعزز من استدامة قطاع البناء [22], [27], [30], [69]. وأشارت دراسات المراجعة الحديثة إلى أن التوسع في استخدام المواد الصناعية المعاد تدويرها في الخرسانة أصبح من الاتجاهات الأساسية في الأبحاث الحديثة المتعلقة بالبناء المستدام [42],[67],[68 .],[70]

وبشكل عام، يتضح من تحليل الدراسات السابقة وجود اتفاق واضح حول فعالية خبث الحديد كبديل للركام الطبيعي في الخرسانة، خاصة عند استخدام نسب استبدال معتدلة ومعالجة مناسبة للخبث. كما أظهرت الدراسات أن أداء الخرسانة لا يعتمد فقط على نسبة الاستبدال، بل يتأثر أيضًا بنوع الخبث المستخدم، وخواصه الكيميائية والفيزيائية، وطريقة معالجته، وتصميم الخلطة الخرسانية.

6. الخاتمة

أن استخدام خبث الحديد، وخاصة خبث الأفران الكهربائية، كبديل للركام الخشن في الخرسانة يمثل أحد الحلول الواعدة لتحقيق الاستدامة في قطاع البناء، نظرًا لما يوفره من فوائد ميكانيكية وبيئية واقتصادية. وقد بينت أغلب الدراسات أن نسب الاستبدال المتوسطة، والتي تتراوح غالبًا بين 25–50%، تحقق أفضل توازن بين تحسين مقاومة الضغط والمتانة والحفاظ على قابلية التشغيل. كما أوضحت النتائج أن الخرسانة المحتوية على خبث الحديد تمتلك مقاومة جيدة للنفاذية والتآكل والهجوم الكبريتي مقارنة بالخرسانة التقليدية، نتيجة تحسن الكثافة الداخلية وتقليل المسامية . وأظهرت المقارنة بين الدراسات وجود اتفاق واضح حول قدرة خبث الحديد على تحسين الخواص الميكانيكية للخرسانة، إلا أن بعض الاختلافات ظهرت فيما يتعلق بنسبة الاستبدال المثلى وتأثير الخبث على التشغيلية والاستقرار الحجمي. ويرجع ذلك إلى اختلاف نوع الخبث

المستخدم، وطرق المعالجة، والتدرج الحبيبي، إضافة إلى اختلاف تصميم الخلطات الخرسانية وظروف المعالجة في كل دراسة.

كما أشارت بعض الدراسات إلى احتمالية حدوث تمددات مستقبلية عند استخدام الخبث غير المعالج بسبب وجود أكاسيد الكالسيوم والمغنيسيوم الحرة، في حين أكدت دراسات أخرى أن المعالجة المسبقة للخبث تقلل من هذه المشكلة بشكل كبير وتحسن من استقرار الخرسانة على المدى الطويل.ومن خلال تحليل نتائج الدراسات السابقة، يمكن الاستنتاج أن استخدام خبث الحديد في الخرسانة لا يقتصر فقط على تحسين الأداء الإنشائي، بل يساهم أيضًا في تقليل استهلاك الركام الطبيعي والحد من تراكم المخلفات الصناعية وتقليل الانبعاثات الكربونية المرتبطة بصناعة الخرسانة التقليدية، مما يجعله مادة واعدة ضمن توجهات البناء المستدام والاقتصاد الدائري

7. التوصيات

1. التوسع في استخدام مخلفات الصناعات المعدنية ضمن تطبيقات البناء المستدام لتقليل استنزاف الموارد الطبيعية.
2. تشجيع المؤسسات الصناعية والبحثية على تطوير تقنيات إعادة تدوير خبث الحديد وتحسين خواصه للاستخدام الإنشائي.
3. إجراء دراسات اقتصادية متكاملة لتقييم جدوى استخدام خبث الحديد مقارنة بالركام التقليدي في المشاريع الإنشائية واسعة النطاق.
4. تطوير مواصفات ومعايير هندسية خاصة باستخدام خبث الحديد في الخرسانة لضمان جودة وأمان التطبيقات المستقبلية

8 . المراجع

World Steel Association. World Steel in Figures 2023. 2023. Retrieved on 01-05-2026 from: https://worldsteel.or g

Libyan Iron and Steel Company. Company Profile and Production Capacity. 2022. Retrieved on 01-05-2026 from: https://www.lisco.l y

Pacific Northwest National Laboratory. 2010. Characterization of blast furnace slag phases by SEM and EDS (PNNL-19505). Retrieved on 04-05-2026 from: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-19505.pdf

Bankole L K, Rezan S A and Sharif N M, Assessment of hexavalent chromium release in Malaysian electric arc furnace steel slag for fertilizer usage, Malaysia, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 19, 2014, 012004.

Ana Muñoz-Castillo, Francisca Andrés-Castro, Miguel Ángel Gómez-Casero and Dolores Eliche-Quesada, Olive Pomace Fly Ash as an Alternative Alkaline Activator for Electric Arc Furnace Slag for Sustainable Cementitious Materials, Materials, 18(3), 2025, 601.

Rojas, N., Bustamante, M., Muñoz, P., Godoy, K., & Letelier, V. (2019). “Study of properties and behavior of concrete containing EAF slag as coarse aggregate.” Construction and Building Materials, 213, 592–603.

Rondi, L., Bregoli, G., Sorlini, S., Cominoli, L., Collivignarelli, C., Plizzari, G. Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation. Composites Part B: Engineering. 2020; 181: 107573.

Mekonen T. B., Alene T. E., Alem Y. A., Nebiyu W. M. Influence of steel slag as a partial replacement of aggregate on performance of reinforced concrete beam. Structures. 2024; 58: 1058–1072.

Abendeh, R.M., Salman, D., Al Louzi, R. Experimental and numerical investigations of interfacial bond in self-compacting concrete-filled steel tubes made with waste steel slag aggregates. Developments in the Built Environment. 2022; 11: 100080. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100080

Abu-Eishah, S.I., El-Dieb, A.S., Bedir, M.S. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace steel slag aggregate. Construction and Building Materials. 2012; 34: 249–256. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.074

Adegoloye, G. Concretes made of EAF slag aggregates: mechanical properties and durability. Construction and Building Materials. 2015; 76: 313–321. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.007

Adegoloye, G. Mineralogical composition and stability of EAF slag aggregates. Construction and Building Materials. 2016; 115: 171–178. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.036

Andrade, H.D. Mechanical performance and carbonation resistance of steel slag concrete. Construction and Building Materials. 2021; 298: 123910. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.12391 0

Arribas, I. Electric arc furnace slag in hydraulic concrete. Construction and Building Materials. 2015; 90: 68–79. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.003

Biskri, Y. Mechanical and durability properties of steel slag concrete. Construction and Building Materials. 2017; 150: 167–178. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.083

Brand, A.S., Roesler, J.R. Steel furnace slag aggregate expansion and properties. Cement and Concrete Composites. 2015; 60: 1–9. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.00 6

Brand, A.S., Roesler, J.R. Interfacial transition zone of steel slag concrete. Cement and Concrete Composites. 2018; 86: 117–129. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.01 2

Coppola, L. Electric arc furnace slag for sustainable concrete. Construction and Building Materials. 2016; 123: 115–119. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.14 2

De Domenico, D. Structural behavior of RC beams with EAF slag. Construction and Building Materials. 2018; 171: 321–337. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.12 8

Faleschini, F. High performance concrete with EAF slag. Construction and Building Materials. 2015; 101: 113–121. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.02 2

Geiseler, J. Use of steelworks slag in Europe. Waste Management. 1996; 16: 59–63. https://doi.org/10.1016/S0956-053X(96)00070- 0

Gencel, O. Steel slag in cement and concrete technology: review. Construction and Building Materials. 2021; 283: 122783. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122783

https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.006
Pellegrino, C. Properties of EAF slag concrete. Cement and Concrete Composites. 2013; 37: 232–240.
Qiu, M. UHPC flexural behavior. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2020; 14: 5. https://doi.org/10.1186/s40069-019-0380-x
Ren, Z. Steel slag as aggregate: review. Materials. 2023; 16: 5841. https://doi.org/10.3390/ma16175841
Roslan, N.H. Steel slag in concrete. Construction and Building Materials. 2016; 104: 16–24. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.008
Saravan, R.A. High performance concrete with steel slag. Asian Journal of Civil Engineering. 2024. https://doi.org/10.1007/s42107-023-00815-x
[45] Sharba, A.A. Steel slag efficiency in concrete. KSCE Journal of Civil Engineering. 2019; 23: 4846–4851. https://doi.org/10.1007/s12205-019-0700-3
Shi, C. Steel slag properties. Journal of Materials in Civil Engineering. 2004; 16: 230–236.
Siddique, R. Industrial by-products in concrete: review. Elsevier. 2019.
Wang, Q., et al. Steel slag influence on concrete properties. Constructionand Building Materials. 2013; 47: 1414–1420.
Zhang, X., et al. UHPC with steel slag aggregate. Construction and Building Materials. 2019; 214: 28–36. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.10 6
Van Ho, Q., Huynh, T.P. High-performance concrete with steel slag. Journal of Building Engineering. 2023; 80: 107982. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107982
Biskri, Y. Mechanical and durability characteristics of high performance concrete containing steel slag. Construction and Building Materials. 2017; 150: 167–178. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.083
Andrade, H.D. Mechanical performance and carbonation resistance of steel slag concrete. Construction and Building Materials. 2021; 298: 123910. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123910
Afroughsabet, V., Biolzi, L., Ozbakkaloglu, T. Influence of steel fibers and slag on recycled aggregate concrete. Composite Structures. 2017; 181: 273–284. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.005
LE, H.V. Effects of steel slag aggregate size on UHPC behavior. Sensors and Actuators A: Physical. 2020; 305: 111925. https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111925
Rehman, S. Combined influence of glass powder and steel slag on SCC. Construction and Building Materials. 2018; 178: 153–160. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.196
Zhou, Z. Long-term volume stability of steel slag mortar and concrete. Case Studies in Construction Materials. 2025; 22: e04179. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04179
Tang, W. Utilization of carbonated steel slag as fine sand in concrete. Results in Engineering. 2025; 25:
Gonzáles-Ortega, M. Durability of concrete with EAF slag aggregate. Construction and Building Materials. 2019; 217: 543–556. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.082
Guo, Y. Effects of steel slag as fine aggregate in concrete. Construction and Building Materials. 2018; 192: 194–201. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.129
Ho, C.M. Effect of steel slag particle size in high strength concrete. Construction and Building Materials. 2024; 411: 134531. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134531
Hoque, M.M., Hosse, M.A. Review of steel slag utilization in concrete. Open Journal of Applied Sciences. 2019; 9: 841–850. https://doi.org/10.4236/ojapps.2019.912067
Ibrahim, M. Industrial by-products in concrete materials: review. Construction and Building Materials. 2022; 325: 126704. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126704
Jagadisha, K.B. Sustainable concrete using steel slag aggregates. Springer. 2021.
Kumar, P. Utilization of steel slag waste: review. Materials Today: Proceedings. 2023; 78: 145–152. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.015
Kurniati, E.O. Mining wastes and steel slag in construction: review. Resources, Conservation and Recycling. 2023; 198: 107175. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.10717 5
Lai, M.H. BOF steel slag aggregate in concrete. Construction and Building Materials. 2021; 277: 122269. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.12226 9
Li, Z. Steel slag as aggregate in concrete: review. Road Materials and Pavement Design. 2023; 24(2): 537–559.
Manso, J.M. Durability of EAF slag concrete. Cement and Concrete Composites. 2006; 28: 528–534. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.00 8
Maslehuddin, M. Steel slag vs limestone aggregate concrete. Construction and Building Materials. 2003; 17: 105–112. https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00095- 8
Monosi, S. EAF slag as aggregate replacement. Cement and Concrete Composites. 2016; 66: 66–72. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.004
Ortega-López, V. Durability of fiber-reinforced EAF slag concrete. Construction and Building Materials. 2018; 163: 471–481.
Ozalp, F. Mechanical and permeability of EAF slag concrete. Construction and Building Materials. 2022; 329: 127159. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127159
Papachristoforou, M. Steel slag fiber concrete durability. Construction and Building Materials. 2020; 262: 120569. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120569
Pellegrino, C., Gaddo, V. Mechanical properties of EAF slag concrete. Cement and Concrete Composites. 2009; 31: 663–671.

103716. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103716
Santamaría, A. Durability of structural concrete incorporating EAF slag. Construction and Building Materials. 2018; 161: 94–111. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.121
Costa, L.C.B. Mechanical and durability performance of concretes with steel slag aggregate. Construction and Building Materials. 2022; 318: 126152. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126152
Roslan, N.H. Performance of steel slag and steel sludge in concrete. Construction and Building Materials. 2016; 104: 16–24. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.00 8
Sharba, A.A. Efficiency of steel slag and recycled aggregate in concrete strength. KSCE Journal of Civil Engineering. 2019; 23: 4846–4851. https://doi.org/10.1007/s12205-019-0700-3
Shi, C. Steel slag properties and cementitious behavior. Journal of Materials in Civil Engineering. 2004; 16(3): 230–236https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230)
Siddique, R. Industrial by-products in sustainable concrete (review). Elsevier. 2019.
Lai, M.H. BOF steel slag aggregate in concrete. Construction and Building Materials. 2021; 277: 122269. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122269
Li, Z. Steel slag as substitute for natural aggregate in concrete: review. Road Materials and Pavement Design. 2023; 24: 537–559.
Ren, Z. Application of steel slag as aggregate in concrete: review. Materials. 2023; 16: 5841. https://doi.org/10.3390/ma16175841
Kumar, P. Utilization of steel slag waste as construction material: review. Materials Today: Proceedings. 2023; 78: 145–152. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.015
Kurniati, E.O. Application of steel slags and mining wastes in construction materials: review. Resources, Conservation and Recycling. 2023; 198: 107175. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107175
Gencel, O. Steel slag in cement and concrete technology: review. Construction and Building Materials. 2021; 283: 122783. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122783