Afro-Asian Journal of Scientific Research (AAJSR)
المجلة الأفروآسيوية للبحث العلمي
E-ISSN: 2959-6505
Volume 4, Issue 3, 2026
Page No: 94-104
Website: https://aajsr.com/index.php/aajsr/index
SJIFactor 2024: 5.028 ISI 2025: 0.915 معامل التأثير العربي (AIF) 2025: 0.76

# Laboratory Evaluation of Hot Mix Asphalt Mixtures Incorporating Steel Slag as a Full Replacement for Coarse Aggregate

Abdulmonem Alkabeer[1*], Mohmed Alneery[2]
[1,2]Misurata University, Civil Engineering, Faculty of Engineering, Misurata University, Misurata, Libya

# تقييم مختبري للخلطات الأسفلتية الساخنة المحتوية على خبث الحديد كبديل كامل للركام الخشن

عبد المنعم الكبير[1*]، محمد النعيري[2]
[1,2] قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة مصراتة، مصراتة، ليبيا

*Corresponding author: menem.kabeer@gmail.com

| Received: April 29, 2026 | Accepted: July 08, 2026 | Published: July 25, 2026 |
|---|---|---|

**Copyright:** © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**Abstract**

The use of industrial by-products in road construction requires a thorough understanding of their physical and mechanical characteristics and their influence on asphalt mixture performance. This study presents a comprehensive laboratory evaluation of the feasibility of using Electric Arc Furnace Steel Slag (EAFS) produced by the Libyan Iron and Steel Company in Misurata as a full replacement for the natural coarse aggregate retained on the No. 4 sieve in dense-graded hot mix asphalt (HMA). Routine physical, mechanical, and chemical tests were conducted on both conventional aggregates and EAFS to assess their suitability for asphalt mixture production. Two asphalt mixtures were designed using the Marshall mix design method: a conventional control mixture and an EAFS mixture in which the coarse aggregate was completely replaced with steel slag. The optimum bitumen content (OBC), volumetric properties, and Marshall characteristics of both mixtures were evaluated and compared. The results showed that the use of EAFS increased the optimum bitumen content from 4.7% to 5.0%, increased the bulk density from 2.37 to 2.47 g/cm³, and improved the values of VMA and VFB. Conversely, the Marshall stability decreased from 1760 to 1600 kg, while the flow value decreased slightly from 2.78 to 2.66 mm. Despite these changes, all measured properties remained within the specified standard limits. The findings indicate that Electric Arc Furnace Steel Slag can be successfully utilized as a full replacement for natural coarse aggregate in hot mix asphalt, providing satisfactory volumetric and mechanical performance while promoting the sustainable utilization of industrial by-products and conserving natural aggregate resources.

**Keywords:** Electric Arc Furnace Steel Slag; Hot Mix Asphalt; Marshall Mix Design; Coarse Aggregate Replacement; Sustainability; Industrial Waste Recycling

**الملخص**

يتطلب استخدام المخلفات الصناعية في إنشاء الطرق فهمًا دقيقًا لخواصها الفيزيائية والميكانيكية ومدى تأثيرها في أداء الخلطات الأسفلتية. تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تقييم مختبري شامل لإمكانية استخدام خبث أفران القوس الكهربائي (Electric Arc Furnace Steel Slag, EAFS) الناتج عن الشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة كبديل

كامل للركام الخشن الطبيعي المحجوز على منخل رقم (4) في الخلطات الأسفلتية الساخنة كثيفة التدرج. وقد أُجريت الاختبارات الروتينية لتوصيف الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية لكل من الركام التقليدي وخبث الحديد، ثم تمت مقارنة خصائصهما للتحقق من ملاءمتهما للاستخدام في الخلطات الأسفلتية. بعد ذلك، صُممت خلطتان أسفلتيتان باستخدام طريقة مارشال، الأولى خلطة مرجعية بالركام التقليدي، والثانية باستخدام خبث أفران القوس الكهربائي كبديل كامل للركام الخشن، وتم تحديد المحتوى الأمثل للبيتومين وتقييم الخصائص الحجمية وخصائص مارشال للخلطتين. أظهرت النتائج أن استخدام خبث الحديد أدى إلى زيادة محتوى البيتومين الأمثل من 4.7% إلى 5.0%، وارتفاع الكثافة الحجمية المدموكة من 2.37 إلى 2.47 جم/سم³، وزيادة قيمتي *VMA* وVFB، في حين انخفضت قيمتا ثبات مارشال من 1760 إلى 1600 كجم والانسياب من 2.78 إلى 2.66 مم. وعلى الرغم من هذا الانخفاض، فقد بقيت جميع خصائص الخلطة ضمن حدود المواصفات القياسية، مما يؤكد إمكانية استخدام خبث أفران القوس الكهربائي كبديل كامل للركام الخشن في الخلطات الأسفلتية الساخنة، مع تحقيق خصائص حجمية وميكانيكية مقبولة، والإسهام في الاستفادة من المخلفات الصناعية والمحافظة على الموارد الطبيعية.

**الكلمات المفتاحية:** خبث أفران القوس الكهربائي(EAFS) ، الخلطات الأسفلتية الساخنة، مارشال، الركام الخشن، الاستدامة، إعادة تدوير المخلفات

## 1. مقدمة

يمثل التخلص من الكميات الهائلة من النفايات (خردة الإطارات، الزجاج، خبث الفولاذ، البلاستيك، ونفايات البناء والهدم) تحديًا بيئيًا واقتصاديًا متزايدًا على مستوى العالم، وأصبح إيجاد حلول مستدامة لإدارة هذه النفايات ضرورة ملحة تتطلب تنسيقًا وتعاونًا بين الجهات المعنية كافة. يتمثل أحد الحلول لجزء من مشكلة التخلص من النفايات في إعادة تدوير واستخدام هذه المواد في بناء الطرق السريعة [1].

ونظرًا للارتفاع المستمر في تكاليف إنشاء وصيانة الطرق والمطارات، فقد اتجهت العديد من الدراسات إلى تقييم إمكانية استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الأسفلتية الساخنة كبدائل جزئية أو كلية للركام الطبيعي، حيث يسهم استخدام هذه المخلفات في تقليل الضغط على الموارد الطبيعية وتحقيق الاستخدام الأمثل للمواد المتاحة [2, 3]. ومن بين مختلف هذه المواد، حظي خبث الحديد والصلب بأكبر قدر من الاهتمام والانتشار عالميًا حيث استخدم خبث الحديد في العديد من التطبيقات، مثل ركام إنشاء الطرق، والخرسانة، وصناعة الأسمنت، والصوف المعدني، وغيرها. وتشير الأدبيات إلى أن استخدام خبث الأفران في إنشاء الطرق يعود إلى العصر الروماني، حيث استُخدم في بعض الطرق بمنطقة ساسكس في إنجلترا [4]. ومنذ النصف الأول من القرن التاسع عشر، استخدمت الولايات المتحدة الأمريكية الخبث في إنشاء الطرق (كطبقات الأساس والخلطات البيتومينية)، والسكك الحديدية، وكذلك في صناعة الأسمنت [5].

يعتبر خبث فرن القوس الكهربائي (Electric Arc Furnace Steel Slag, EAFS) ناتجًا ثانويًا لعملية تصنيع الفولاذ باستخدام أفران القوس الكهربائي ذات القدرة العالية، والتي تعتمد على الأقواس الكهربائية بدلاً من الوقود الغازي لتوليد الحرارة اللازمة لصهر خردة الفولاذ المعاد تدويرها وتحويلها إلى فولاذ عالي الجودة. ومع التوسع العالمي في صناعة الفولاذ خلال العقود الماضية، ازدادت كميات خبث الحديد المنتجة بصورة كبيرة، حيث تتجاوز نسبة الاستفادة منه في الدول المتقدمة 60%، بينما لا تتجاوز 20% في الدول النامية [6]، مما جعل التخلص منه يمثل تحديًا بيئيًا واقتصاديًا متزايدًا.

ويُوصى باستخدام خبث فرن القوس الكهربائي في الخلطات الأسفلتية باعتباره أحد المخلفات المعدنية غير الخطرة. ويُعد إجراء المعالجة المناسبة لخبث الحديد وتطبيق إجراءات صارمة لمراقبة الجودة من المتطلبات الأساسية لاختيار هذا النوع من الخبث للاستخدام في الخلطات الأسفلتية الساخنة [7]. تشمل أهم تطبيقات خبث الحديد استخدامه كركام في الخلطات الأسفلتية وطبقات مقاومة الانزلاق ومواد لطبقات الأساس والأساس المساعد الحبيبية والخلطات الأسفلتية الدافئة ومعالجات الرش السطحي وغيرها من التطبيقات [8].

وعلى الرغم من كثرة الدراسات التي تناولت استخدام خبث الحديد في الخلطات الأسفلتية على المستويين العالمي والإقليمي، فإن هذا المجال لا يزال يفتقر إلى دراسات محلية تُقيّم إمكانية الاستفادة من خبث الحديد الناتج عن مصانع الصلب المحلية في الخلطات الأسفلتية الساخنة كثيفة التدرج. ومن هذا المنطلق، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية استخدام خبث الحديد الناتج من مصنع الحديد والصلب – مصراته، بوصفه بديلًا جزئيًا للركام الطبيعي في الخلطات الأسفلتية الساخنة كثيفة التدرج، بما يسهم في الاستغلال الأمثل لهذا المخلف الصناعي، والحد من الآثار البيئية المترتبة على تراكمه، والمحافظة على الموارد الطبيعية من خلال تقليل استهلاك الركام التقليدي.

## 2. الدراسات السابقة

أظهرت العديد من الدراسات إمكانية استخدام خبث الحديد كبديل للركام الطبيعي في الخلطات الأسفلتية الساخنة، نظرًا لما يمتلكه من خصائص فيزيائية وميكانيكية متميزة، مثل الصلادة العالية، والخشونة السطحية، ومقاومة التآكل، والتي تسهم في تحسين أداء طبقات الرصف وتقليل الاعتماد على الموارد الطبيعية.

قام خان وآخرون [9] بتقييم إمكانية استخدام خبث الحديد في الخلطات الأسفلتية، حيث تم استخدامه بنسبة 48% من الوزن الكلي للركام الطبيعي في خلطة الطبقة السطحية، بينما تم استخدام نسبتي 61% و100 %في خلطات الطبقة الأساسية.

وأظهرت النتائج أن استخدام خبث الحديد ساهم في تقليل استهلاك الركام الطبيعي والمحافظة على الموارد الطبيعية، كما أدى إلى تحسين مقاومة الانزلاق وزيادة عمر الكلال للرصف الأسفلتي.

كما قام آسي وآخرون [10] بدراسة تأثير استبدال الركام الجيري بخبث الحديد بنسب مختلفة تراوحت بين 0% إلى100% من الوزن الكلي للركام .وتم تقييم أداء الخلطات باستخدام مجموعة من الاختبارات، شملت مقاومة الشد غير المباشر، ومعامل المرونة الارتدادي (Resilient Modulus)، واختبار مسار العجلة (Humberg Wheel Tracking)، واختبار الزحف (Creep Test)، واختبار مقاومة الانفصال والتفتت (Stripping Resistance) وأظهرت النتائج إمكانية استخدام خبث الحديد في الخلطات الأسفلتية الساخنة، حيث حققت خصائصه متطلبات نظام Superpave والمواصفات الأردنية، كما أدى استبدال ما يصل إلى 75%من الركام الخشن الجيري بخبث الحديد إلى تحسين الخواص الميكانيكية للخلطات الأسفلتية [10] .

أشار شنطاوي وآخرون [11] إلى تأثير استخدام خبث الحديد بنسبة 100%في خلطة الطبقة السطحية مقارنة بخلطة تقليدية تحتوي على ركام الحجر الجيري كثيف التدرج مع نفس التدرج الحبيبي ومحتوى البيتومين. وأوضحت النتائج أن الخلطة المحتوية على خبث الحديد حققت ثباتًا أعلى ومقاومة أفضل للتخدد مقارنة بالخلطة التقليدية المرجعية.

وقام هاينين وآخرون (Hainin et al., 2012) بدراسة تأثير استخدام خبث الحديد في الخلطات الأسفلتية من خلال مقارنة الخلطات المحتوية على الخبث مع الخلطات التقليدية. وتم تقييم الأداء باستخدام اختبارات معامل المرونة الارتدادي (Resilient Modulus)واختبارات الزحف. وأظهرت النتائج أن الخلطات المحتوية على خبث الحديد سجلت انخفاضًا في التشوهات الدائمة مقارنة بالخلطات التقليدية، مما يشير إلى تحسن مقاومتها للتخدد تحت تأثير الأحمال المرورية.[12]

وقام البدوي وآخرون (El-Badawy et al., 2015) بتقييم إمكانية استخدام خبث فرن القوس الكهربائي كبديل للركام التقليدي في الخلطات الأسفلتية الساخنة. حيث تم إجراء برنامج تجريبي شامل لتقييم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية لخبث الحديد ومقارنتها بالركام الجيري المستخدم تقليديًا في إنشاء طبقات الرصف في مصر. وتم تحضير عينات مارشال باستخدام نسب استبدال مختلفة بلغت 0%، 20%، 40%، و100 %من الركام الكلي. وأظهرت النتائج أن زيادة نسبة خبث الحديد أدت إلى زيادة ثبات مارشال وكثافة الخلطات الأسفلتية، بينما انخفضت قيم الانسياب (Flow)والفراغات في الركام المعدني (VMA)، مما أكد إمكانية استخدام خبث فرن القوس الكهربائي كبديل للركام الطبيعي في الخلطات الأسفلتية الساخنة.[13]

درس كانغ وآخرون[14] خصائص الخلطات الأسفلتية الساخنة المحتوية على ركام خبث الحديد، حيث تمت مقارنة هذه الخلطات مع خلطات تقليدية تحتوي على ركام الجرانيت. وتم تقييم تأثير نسبة الفراغات الهوائية ودرجة الحرارة على أداء الخلطات من خلال مجموعة من الاختبارات الميكانيكية. وأظهرت النتائج أن الخلطات المحتوية على خبث الحديد حققت تحسنًا في مقاومة التخدد، ومقاومة الشد، والمتانة، ومعامل المرونة الديناميكي مقارنة بالخلطات التقليدية.

وقام شيها وآخرون [15] بدراسة إمكانية استخدام خبث فرن القوس الكهربائي (EAFS)كبديل للركام الطبيعي في الخلطات الأسفلتية الساخنة وطبقات الأساس الحبيبية. وتم تقييم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخلطات المحتوية على خبث الحديد ومقارنتها بالخلطات التقليدية المحتوية على الركام الجيري. وأظهرت النتائج أن استخدام خبث الحديد أدى إلى تحسين الأداء الميكانيكي للخلطات من خلال زيادة ثبات مارشال، ومعامل المرونة الارتدادي، ومقاومة التشوهات الدائمة، مما يدعم استخدامه كبديل مستدام للركام الطبيعي.

كما درس لي وآخرون [16] مقاومة الخلطات الأسفلتية المحتوية على خبث الحديد للتشوه والتدهور في مقاومة الانزلاق تحت تأثير الأحمال المرورية المتكررة. وتم تقييم الأداء باستخدام اختبارات التحميل المتكرر ومقاومة التشوه. وأظهرت النتائج أن الخلطات المحتوية على خبث الحديد حققت مقاومة أعلى للتخدد والتشوهات الدائمة مقارنة بالخلطات التقليدية، مما يؤكد ملاءمة استخدامها في الطرق ذات الأحمال المرورية العالية.

وقام نيفيس وكروشّو[17] بتقييم الأداء الهندسي للخلطات الأسفلتية المحتوية على ركام خبث الحديد بهدف استخدامه في إنشاء وصيانة الرصف المستدام. وتم استخدام نسب مختلفة من خبث الحديد، وتقييم الخلطات من خلال الخصائص الحجمية، وثبات مارشال، والصلابة، ومقاومة التعب، والتشوهات الدائمة، والحساسية للرطوبة. وأظهرت النتائج أن إضافة خبث الحديد لم تؤثر سلبًا على أداء الخلطات، بل حققت خصائص ميكانيكية مناسبة للاستخدام في طبقات الرصف الأسفلتية.

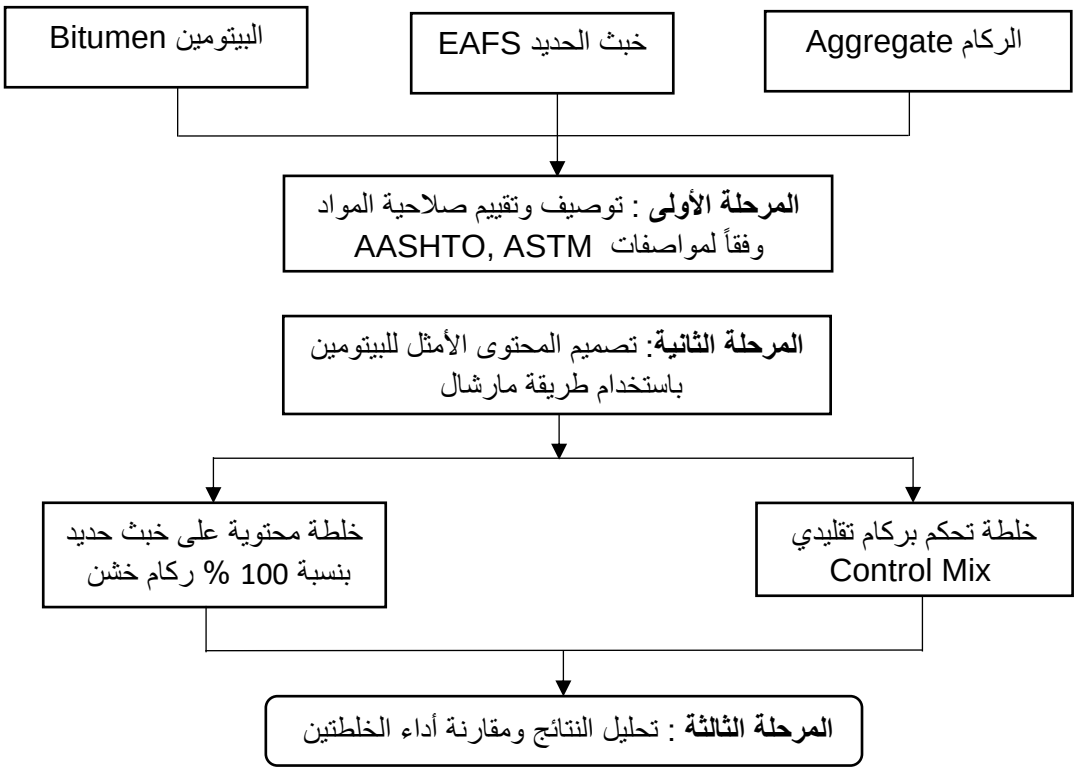
وبحث نكيتياه وآخرون[18] إمكانية استخدام خبث الحديد كبديل للركام التقليدي في الخلطات الأسفلتية كثيفة التدرج (Dense-Graded Asphalt Mixtures)، حيث تم تقييم تأثير الخبث على الخصائص الحجمية والأداء الميكانيكي للخلطات. وأظهرت النتائج إمكانية استخدام خبث الحديد كبديل للركام الطبيعي مع تحقيق أداء مناسب، إضافة إلى الفوائد البيئية الناتجة عن إعادة تدوير المخلفات الصناعية وتقليل استهلاك الموارد الطبيعية.

كما قام وو وآخرون [19] بدراسة أداء الخلطات الأسفلتية المحتوية على خبث الحديد والمطاط المعاد تدويره، حيث استخدم خبث الحديد كبديل جزئي للركام الخشن مع بيتومين معدل بالمطاط. وتم تقييم تأثير محتوى خبث الحديد على مقاومة التشوه الدائم، ومقاومة الرطوبة، والأداء تحت الأحمال المتكررة. وأظهرت النتائج أن استخدام ركام خبث الحديد أدى إلى تحسين الترابط بين الركام والمادة الرابطة وزيادة مقاومة الخلطات للتخدد، مما يدعم استخدامه في تطبيقات الرصف المستدام.

## 3. البرنامج التجريبي

يوضح الشكل (1) مخططًا توضيحيا للبرنامج التجريبي الذي نُفِّذ في هذه الدراسة. وقد قُسِّمت الأعمال المختبرية إلى ثلاث مراحل رئيسية على النحو الآتي:

- المرحلة الأولى :شملت جمع وتوصيف المواد المستخدمة، والتي تضمنت الركام التقليدي، والبيتومين، وركام خبث أفران القوس الكهربائي(EAFS) ، وذلك من خلال تحديد خصائصها الفيزيائية والميكانيكية وفقًا للاختبارات القياسية ومقارنتها بحدود المواصفات لتحديد مدى صلاحيتها لاستخدامها في كمواد رصف.
- المرحلة الثانية :تضمنت إعداد وتصميم خلطتين اسفلتيتن، الأولى خلطة تحكم ومقارنة بالركام التقليدي والثانية: خلطة من ركام خشن ( محجوز على منخل رقم 4) خبث أفران القوس الكهربائي(EAFS) أي بنسبة 100 % ركام خشن مستبدل من خبث الحديد.
- المرحلة الثالثة :شملت التقييم والتحليل للخلطتين، ومقارنة نتائجهما لتحديد تأثير استخدام ركام خبث أفران القوس الكهربائي (EAFS) على خصائص الخلطات الأسفلتية .




**الشكل (1):** المخطط التوضيحي لمراحل البرنامج التجريبي المستخدم في الدراسة

## 4. المواد المستخدمة

### 1.4 البيتومين

في هذه الدراسة تم استخدام مواد معتمدة بالمشاريع المنفذة حيث تم استخدام بيتومين اختراق (60–70) يوناني المنشأ والمورد بواسطة شركة الأشغال العامة – مصراتة .وقد خضعت جميع المواد لسلسلة من الاختبارات القياسية لتوصيف خصائصها الفيزيائية والميكانيكية قبل استخدامها في تصميم وإعداد الخلطات الأسفلتية، ولغرض توصيف البيتومين المستخدم، أُجريت عليه مجموعة من الاختبارات القياسية، شملت اختبار الاختراق Penetration ، والكثافة النوعية Specific Gravity، ونقطة الليونة Softening Point ونقطة الوميض Flash Point والاستطالة Ductility ويعرض الجدول (1) ملخصًا لنتائج الاختبارات الروتينية التي أُجريت على البيتومين. وتُظهر النتائج أن جميع الخصائص الفيزيائية للبيتومين المستخدم تتوافق مع متطلبات دليل مواصفات إنشاء الطرق السريعة [20].

**جدول (1):** الاختبارات الروتينية على عينة البيتومين للحصول على الخواص الفيزيائية

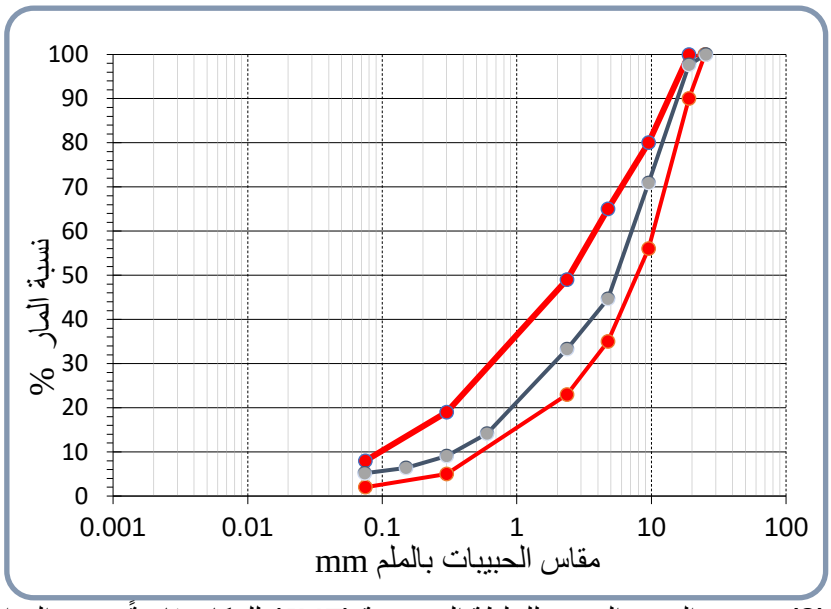
| حدود المواصفات **Specifications** | **Results** النتيجة | **Standard** المواصفة | **property** الخاصية |
|---|---|---|---|
| 70 - 60 | 64 | ASTM D5<br>AASHTO T49 | الاختراق Penetration mm |
| 55 - 45 | 51 | ASTM D36<br>AASHTO T53 | نقطة الليونة Softening point C° |
| - | 1.03 | ASTM D70 | الوزن النوعي Specific Gravity |
| لا يقل عن 250 | 320 | AASHTO T48 | نقطة الوميض Flash Point C° |
| لايقل عن 100 | أكبر من 100 | ASTM D115 | الاستطالة Ductility cm |

### 2.4 الركام التقليدي وخبث الحديد

تم الحصول على المواد المستخدمة في هذه الدراسة من مصادر محلية معتمدة لضمان تمثيلها للمواد المستخدمة في مشاريع إنشاء وصيانة الطرق في ليبيا. حيث تم توريد الركام التقليدي من ناتج تكسير الصخور بمحجر رأس اللفعة التابع والمعتمد لشركة الأشغال العامة بمدينة مصراتة وهو صخر بركاني ذو خصائص عالية، أما ركام خبث الحديد (EAFS) فقد تم الحصول عليه من مخلفات عمليات تصنيع الحديد والصلب بالشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة.

### 3.4 التدرج وخلطة العمل

تم إعداد التدرج الحبيبي لكل من الركام الجيري وركام خبث أفران القوس الكهربائي (EAFS) بحيث يقع ضمن حدود التدرج المسموح بها وهو D4 وفقًا للمواصفة (ASTM D3515) المعتمدة والمعمول بها في أغلب المشاريع . والشكل (2) يوضح صيغة خلطة العمل Job Mix Formula الناتجة عن عملية مزج أحجام الركام المختلفة بطريقة المحاولة والخطأ.




**الشكل (2):** منحنى التدرج الحبيبي للخلطة التصميمية (JMF) للركام مقارنةً بحدود المواصفات

### 4.4 الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للركام التقليدي

يوضح الجدول (2) ملخصًا للخصائص الفيزيائية والميكانيكية للركام التقليدي المستخدم في هذه الدراسة. وبشكل عام تشير النتائج إلى أن جميع الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للركام التقليدي تقع ضمن الحدود المسموح بها وفقًا للمواصفات القياسية المعتمدة، مما يؤكد صلاحيته للاستخدام في تصميم وإنتاج الخلطات الإسفلتية ويجعله ركامًا مرجعيًا مناسبًا للمقارنة مع الخلطات المحتوية على خبث الأفران الكهربائية.

**جدول (2):** الخواص الفيزيائية والميكانيكة للركام التقليدي

| الحدود Limits | المواصفة Standard | الركام التقليدي | | | | | الخاصية property |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 5 – 0 mm | 5 – 8 mm | 5 – 14 mm | 14 -19 mm | 19 – 25 mm | |
| - | AASHTO T84,85 | 2.577 | 2.637 | 2.644 | 2.646 | 2.643 | الوزن النوعي bulk |
| - | AASHTO T84,85 | 2.616 | 2.666 | 2.67 | 2.67 | 2.667 | الوزن النوعي SSD |
| - | AASHTO T84,85 | 1.52 | 1.122 | 1.003 | 0.916 | 0.916 | الامتصاص % |
| 40 % max | AASHTO T96 | تدرج B = 22 تدرج D = 23 | | | | | لوس أنجلس Los Angeles |
| 25 % max | BS 812 | | 4.7 | 3.7 | 4.3 | 3.2 | مؤشر التفلطح Flakiness |
| 25 % max | BS 812 | | 6.4 | 7.3 | 5.7 | 6.4 | مؤشر الاستطالة Elongation |
| 1 % max | ASTM C142 | | 0.25 | 0.013 | 0.05 | 0.03 | الكتل الطينية Clay Lumps |
| 45 % min | AASHTO T176 | % 74 | - | | | | المكافئ الرملي Sand Equivalent |
| 90 min | ASTM 5821 | | 100 | 100 | 100 | 100 | زاوية الركام الخشن Angularity |

### 5.4 الخصائص الكيميائية والفيزيائية لخبث الحديد

يوضح الجدول (3) الخصائص الفيزيائية والكيميائية لمسحوق خبث الحديد، والتي تشمل الكثافة، والتوزيع الحجمي للحبيبات، بالإضافة إلى تركيبه الكيميائي. ووفقًا لدليل المنتجات الصادر عن الشركة الليبية للحديد والصلب، فإن مسحوق خبث الحديد عبارة عن مادة ذات لون رمادي تنتج عن إضافة مصهرات الجير والدولوميت إلى الصلب المنصهر داخل أفران القوس الكهربائي، وذلك بهدف إزالة شوائب الفوسفور والكبريت ومعادلة الأكاسيد الحمضية، مما يسهم في تحسين جودة الصلب المنتج.

**جدول (3):** الخواص الفيزيائية والكيميائية لخبث الحديد

| الخصائص | التفاصيل |
|---|---|
| نوع خبث الحديد | خبث الافران الكهربائية |
| خردة حديدية | 2- 4% |
| الكثافة | 3.3 (طن/م3) |
| الحجم الحبيبي | 0 الي 300 ملم |
| اكسيد الكالسيوم | 45-30 |
| اكسيد الماغنيسيوم | 10-4 |
| اكسيد السليكون | 25-15 |
| اكسيد الالمونيوم | 8-4 |
| اكسيد الحديد | 25-15 |
| اكسيد المنجنيز | 3-1 |

### 6.4 الخواص الميكانيكية لخبث الحديد

يوضح الجدول (3) الخصائص الفيزيائية لخبث الأفران الكهربائية المستخدم كبديل للركام الخشن في هذه الدراسة. وبالمقارنة مع الركام التقليدي، يتضح أن خبث الأفران الكهربائية يتميز بوزن نوعي أعلى، مما يعكس كثافته الأكبر، كما يتمتع بدرجة عالية من الزاوية والخشونة مع مؤشرات تفلطح واستطالة متقاربة. وتؤكد نتائج الاختبارات أن خصائص خبث الحديد تقع ضمن الحدود التي تحددها المواصفات القياسية، مما يدعم إمكانية استخدامه كبديل مناسب للركام الطبيعي في إنتاج الخلطات الإسفلتية.

**جدول (4):** الخواص الفيزيائية والميكانيكة لخبث الأفران الكهربائية EAFS

| Limits الحدود | Standard المواصفة | خبث الحديد EAFS | | property الخاصية |
|---|---|---|---|---|
| | | 5 -10 mm | 10 – 25 mm | |
| - | AASHTO T84,85 | 3.046 | 2.963 | الوزن النوعي bulk |
| - | AASHTO T84,85 | 3.192 | 2.978 | الوزن النوعي SSD |
| - | AASHTO T84,85 | 1.94 | 1.5 | الامتصاص % |
| 40 max | AASHTO T96 | 11.5 | | لوس أنجلس Los Angeles % |
| 25 % max | BS 812 | 4.6 | 3.8 | مؤشر التفلطح Flakiness |
| 25 % max | BS 812 | 6.3 | 5.5 | مؤشر الاستطالة Elongation |
| 1 % max | ASTM C142 | 0.03 | 0.02 | الكتل الطينية Clay Lumps |
| Min 90 | ASTM 5821 | 100 | 100 | زاوية الركام الخشن Angularity |

## 5. المنهجية والنتائج والمناقشة

### 1.5 إعداد عينات مارشال

تم إعداد واختبار عينات مارشال وفقًا لمتطلبات المواصفة AASHTO T 245 حيث سخن الركام والإسفلت عند درجة حرارة 165°م، و150 م$^0$ على التوالي ثم خُلِط الركام الساخن مع البيتومين خلطًا جيدًا باستخدام الخلاط الميكانيكي. كما حُددت الكثافة النوعية العظمى النظرية للخلطة غير المدموكة (Gmm) باستخدام اختبار Rice وفقًا للمواصفة AASHTO T 209لجميع الخلطات. تم تحضير ثمانية عشر عينة عند نسب مختلفة من محتوى البيتومين تراوحت بين 3.5% و6%، حيث دُمكت العينات باستخدام مطرقة مارشال بعدد 75 ضربة لكل وجه لمحاكاة ظروف المرور الثقيل. وبعد الانتهاء من الدمك، أُخرجت العينات من القوالب وتُركت في درجة حرارة الغرفة لمدة 24 ساعة.

بعد ذلك، قيست الكثافات النوعية المدموكة (Gmb) لجميع الخلطات، ثم غُمِرت العينات في حمام مائي عند درجة حرارة 60°م لمدة 30 دقيقة، قبل اختبارها باستخدام جهاز مارشال لتحديد كل من الثبات Stability والانسياب Flow . تم حساب الخصائص الحجمية للخلطات، والتي شملت نسبة الفراغات الهوائية(Va) ، والفراغات في الركام المعدني (VMA)، ونسبة الفراغات المملوءة بالإسفلت (VFA) اعتمادًا على الخصائص الحجمية للعينات. وتم تحديد المحتوى الأمثل للبيتومين بالاستناد إلى منحنيات تصميم مارشال، والتي تضمنت الكثافات، وثبات مارشال، والفراغات الهوائية. وقد كانت قيم المحتوى الأمثل للبيتومين لخلطة التحكم والخلطة المحتوية على خبث الحديد بواقع 4.7% و5.% على التوالي عند فراغات هوائية 4 % بحسب منهجية معهد الاسفلت MS-2 [21] . أخيرًا، تم التحقق من مطابقة قيم الثبات والانسياب والفراغات المملوءة بالاسفلت والفراغات في الركام المعني عند المحتوى الأمثل للبيتومين ( Optimum Bitumen Content OBC). ويعرض الجدول (5) ملخص خصائص مارشال للخلطتين، بينما توضح الأشكال (3–8) منحنيات خواص مارشال .

**جدول (5):** نتائج اختبار مارشال للخلطتين

| حدود المواصفات Specifications | خلطة خبث الحديد Steel Slug Mix | خلطة التحكم Control Mix | property الخاصية |
|---|---|---|---|
| 7 - 4 | 5 | 4.7 | محتوى البيتومين الأمثل OBC % |
| Min 817 | 1600 | 1760 | ثبات مارشال كجم Stability (kg) |
| 2 – 3.5 | 2.66 | 2.78 | الانسياب ملم Flow (mm) |
| - | 2.47 | 2.37 | الكثافة المدموكة جم/سم$^3$ Gmb (g/cm$^3$) |
| 5 - 3 | 4 | 4 | الفراغات الهوائية Air Voids % |
| Min 13 | 15.1 | 13 | الفراغات في الركام العدني VMA % |
| 75 - 65 | 74 | 69 | الفراغات المملوءة بالاسفلت VFB % |

### 2.5 تحليل نتائج اختبار مارشال

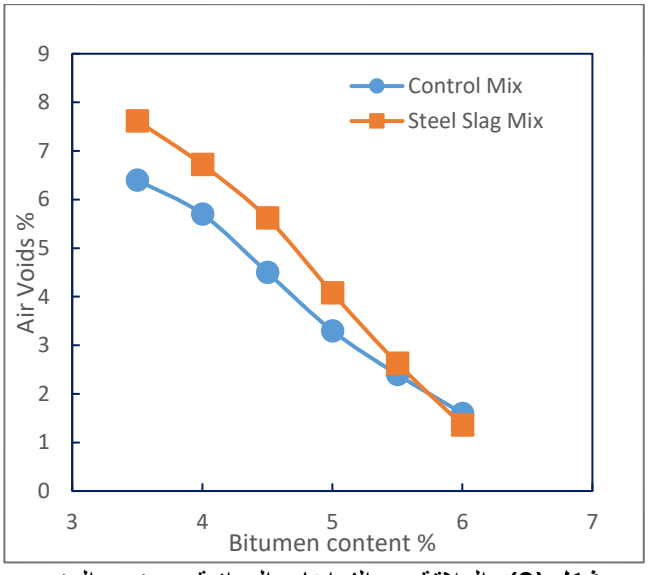
يوضح الجدول (5) نتائج خصائص مارشال للخلطة المرجعية (Control Mix) والخلطة المحتوية على خبث الحديد حيث تم استبدال الركام الخشن الطبيعي المحجوز على المنخل رقم (4) بالكامل بخبث الحديد، وتشير النتائج إلى أن إضافة خبث الحديد أثرت على الخصائص الحجمية والميكانيكية للخلطة الأسفلتية مقارنة بالخلطة المرجعية المحتوية على الركام البركاني. حيث ارتفع محتوى البيتومين الأمثل (OBC) من 4.7% في خلطة التحكم إلى 5.0% في خلطة خبث الحديد. ويمكن تفسير هذه الزيادة بسبب زيادة كمية الامتصاص لخبث الحديد مقارنة بالركام التقليدي، كما أن ارتفاع الكثافة النوعية لخبث الحديد مقارنة بالركام البركاني قد أدى إلى تغير ترتيب الحبيبات داخل الهيكل المعدني للخلطة، مما انعكس على احتياجها لمحتوى أسفلتي أعلى.

أظهرت نتائج الثبات (Marshall Stability) انخفاضًا من 1760كجم للخلطة المرجعية إلى 1600كجم عند استخدام خبث الحديد، أي بانخفاض يقارب 9.1%. وعلى الرغم من هذا الانخفاض، فإن قيمة الثبات لخلطة خبث الحديد ما تزال أعلى بكثير من الحد الأدنى المحدد في المواصفات (817 كجم)، مما يدل على قدرتها على مقاومة الأحمال المرورية والمحافظة على أداء إنشائي مقبول.

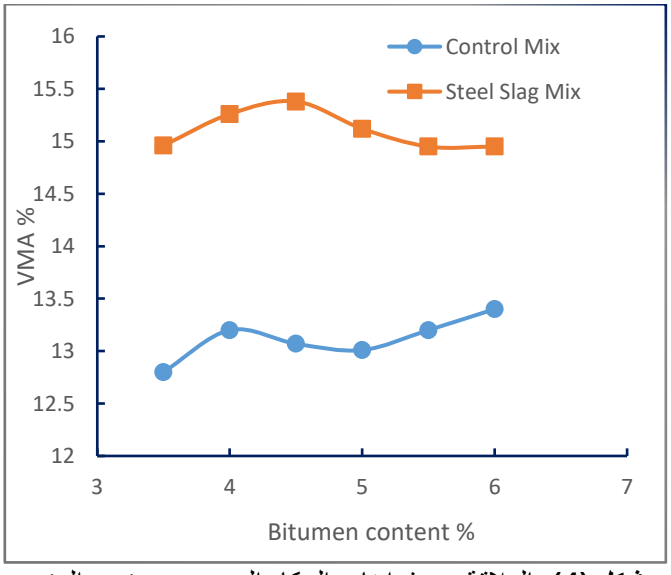
أما قيمة الانسياب (Flow)، فقد انخفضت بشكل طفيف من 2.78 مم إلى 2.66 مم بعد إضافة خبث الحديد. ويشير هذا الانخفاض إلى تحسن نسبي في مقاومة التشوهات اللدنة. كما لوحظ ارتفاع الكثافة الحجمية المدموكة (Gmb) من 2.37 جم/سم³ للخلطة المرجعية إلى 2.47 جم/سم³ لخلطة خبث الحديد. ويُعزى ذلك بصورة رئيسية إلى ارتفاع الكثافة النوعية لخبث الحديد مقارنة بالركام البركاني، حيث إن استبدال الجزء الخشن من الركام أدى إلى زيادة الوزن الحجمي للخلطة وتحسين قابليتها للوصول إلى كثافة أعلى بعد الدمك.

بالنسبة للفراغات في الركام المعدني (VMA) فقد أظهرت النتائج زيادة من 13% في الخلطة المرجعية إلى 15.1%في خلطة خبث الحديد. ويمكن تفسير ذلك بأن استبدال الركام البركاني الخشن بخبث الحديد أدى إلى تغير شكل وترتيب الحبيبات داخل الهيكل المعدني، حيث تتميز حبيبات خبث الحديد عادةً بشكل أكثر زاوية وخشونة، مما قد يؤدي إلى زيادة الفراغات بين الحبيبات الخشنة، وبالتالي ارتفاع قيمة VMA وبالتزامن مع ارتفاع قيمة VMA ، ارتفعت نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين (VFB) من 69% إلى 74%، وهي مؤشر جيد على حماية الحبيبيات من عملية الأكسدة والتقادم الزمني.

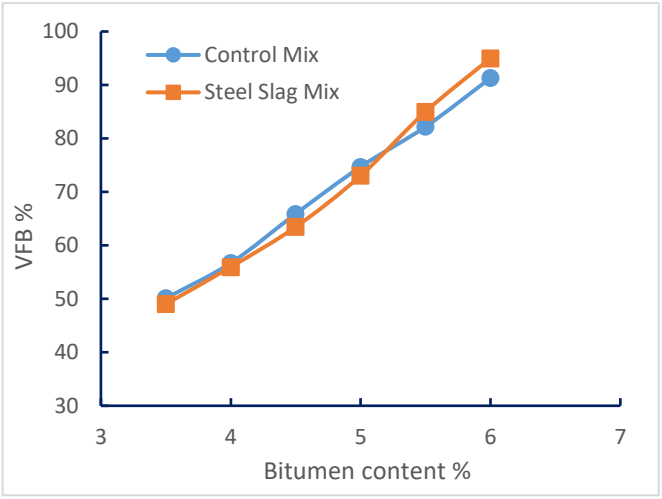
وبحساب معامل الصلابة (Rigidity=Stability/Flow) ، بلغت قيمته 633.1 كجم/ مم للخلطة المرجعية و 601.5كجم/ مم لخلطة خبث الحديد. وعلى الرغم من انخفاض قيمة الصلابة بنسبة تقارب 5% عند استخدام خبث الحديد، فإنها بقيت أقل من الحد الأقصى الموصى به (700 كجم/ مم)، مما يدل أن خلطة خبث الحديد تمتلك قابلية أكبر نسبيًا لتحمل التشوهات قبل الفشل، مع المحافظة على مستوى مناسب من مقاومة الأحمال. وبصفة عامة، تشير نتائج اختبار مارشال إلى أن استبدال الركام الخشن البركاني بخبث الحديد بنسبة 100% أنتج خلطة أسفلتية ذات خصائص حجمية وميكانيكية مقبولة، مع زيادة واضحة في الكثافة وتحسن في مقاومة التشوه، مع المحافظة على جميع المؤشرات ضمن حدود المواصفات، مما يؤكد إمكانية استخدام خبث الحديد كبديل مستدام للركام الطبيعي في الخلطات الأسفلتية.



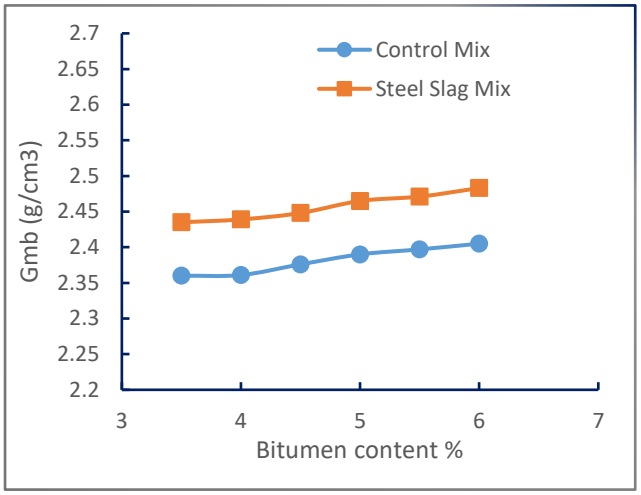

**شكل (3):** العلاقة بين الفراغات الهوائية ومحتوى البيتومين



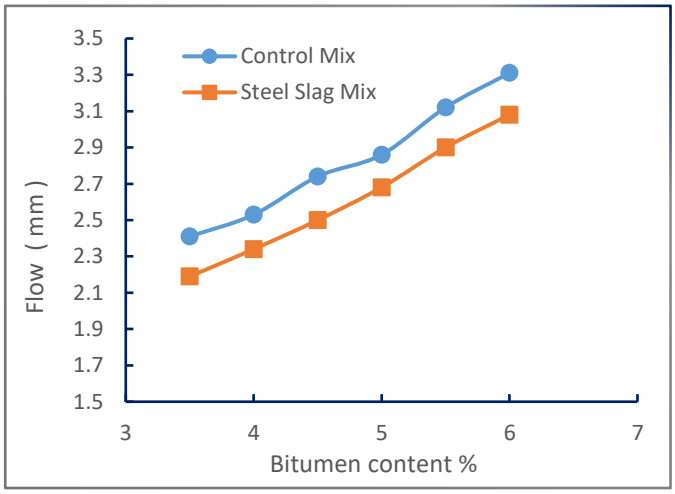

**شكل (4)**: العلاقة بين فراغات الركام المعدني ومحتوى البيتومين



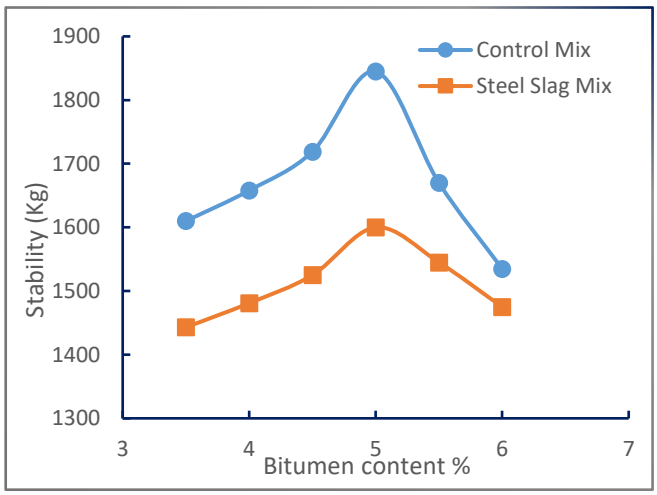

**شكل (5):** العلاقة بين الفراغات المملوءة ومحتوى البيتومين




**شكل (6):** العلاقة بين الكثافة المدموكة ومحتوى البيتومين




**شكل (7):** العلاقة بين الانسياب ومحتوى البيتومين




**شكل (8):** العلاقة بين الثبات ومحتوى البيتومين

## 6. الخلاصة

بناءً على الدراسة التجريبية التي أُجريت لتقييم إمكانية استخدام خبث أفران القوس الكهربائي EAFSكبديل كامل للركام الخشن التقليدي في الخلطات الأسفلتية الساخنة ذات التدرج الكثيف، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

- أظهرت نتائج التوصيف الفيزيائي والميكانيكي والكيميائي أن خبث أفران القوس الكهربائي (EAFS) المنتج بواسطة الشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة يمتلك خصائص مناسبة للاستخدام في تطبيقات الخلطات الأسفلتية. حيث إن الكثافة النوعية العالية، والشكل الزاوي للحبيبات، والملمس السطحي الخشن، ومقاومة التآكل المقبولة تشير إلى أن خبث الحديد يمثل بديلاً واعداً للركام التقليدي المستخدم في إنشاء طبقات الرصف.
- أدى الاستبدال الكامل للركام الخشن التقليدي المحجوز على المنخل رقم (4) بخبث أفران القوس الكهربائي إلى زيادة نسبة الأسفلت المثلى من 4.7% في الخلطة المرجعية إلى 5.0% في خلطة خبث الحديد. ويُعزى هذا الارتفاع بشكل رئيسي إلى زيادة قدرة الخبث على الامتصاص واختلاف خصائص سطحه مقارنة بالركام الطبيعي التقليدي.
- ساهم استخدام خبث الحديد في تحسين الخصائص الحجمية للخلطة الأسفلتية، حيث ازدادت الكثافة الحجمية بعد الدمك من 2.37 إلى 2.47 جم /سم³، بالإضافة إلى زيادة الفراغات في الركام المعدني (VMA) والفراغات المملوءة بالأسفلت (VFB) .
- على الرغم من انخفاض قيمة ثبات مارشال من 1760 كجم للخلطة المرجعية إلى 1600 كجم لخلطة خبث الحديد، فإن القيمة الناتجة بقيت أعلى بكثير من الحد الأدنى المحدد في المواصفات. وهذا يؤكد قدرة خلطة خبث الحديد على توفير مقاومة كافية للأحمال الناتجة عن حركة المرور مع الحفاظ على أداء ميكانيكي مقبول.

- انخفضت قيمة الانسياب بشكل طفيف من 2.78 مم إلى 2.66 مم عند استخدام خبث الحديد، مما يشير إلى انخفاض قابلية التشوه اللدن، ويُظهر تحسناً محتملاً في مقاومة التشوهات الدائمة تحت تأثير الأحمال المرورية.
- بقيت صلابة مارشال (Marshall Rigidity) لخلطة خبث الحديد ضمن الحدود المقبولة، مما يدل على تحقيق توازن مناسب بين الصلابة ومقاومة التشوه. وبالتالي، فإن استخدام خبث الحديد لم يؤثر سلباً على العلاقة بين الثبات والمرونة في الخلطة الأسفلتية.
- تؤكد نتائج الدراسة إمكانية استخدام خبث أفران القوس الكهربائي بنجاح كبديل مستدام للركام الخشن الطبيعي في إنتاج الخلطات الأسفلتية الساخنة دون التأثير على المتطلبات الحجمية والميكانيكية الأساسية. كما يمكن أن يساهم استخدامه في تقليل استهلاك الركام الطبيعي، والحد من تراكم المخلفات الصناعية، ودعم ممارسات إنشاء الرصف المستدامة.
- وبالنظر إلى الأداء المختبري المرضي الذي حققته خلطات خبث الحديد في هذه الدراسة، يُوصى بإجراء المزيد من الدراسات لتقييم الأداء طويل الأمد لهذه الخلطات تحت الظروف الحقلية، بما في ذلك مقاومة تأثير الرطوبة moiure damage، ومقاومة التخدد rutting، وسلوك التعب fatigue تحت تأثير الأحمال المرورية والعوامل البيئية المختلفة.

**المراجع**


1. Arnold, G., Werkmeister, S., & Alabaster, D. (2008). *The effect of adding recycled glass on the performance of basecourse aggregate* (Research Report 351). NZ Transport Agency.
2. K. Hansen, and A. Copeland, Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2016, Prepared by National Asphalt Pavement Association for U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 2016.
3. Gautam, P.K., Kalla, P., Nagar, R., Agrawal, R., Jethoo, A.S., 2018. Laboratory investigations on hot mix asphalt containing mining waste as aggregates. *Construction and Building Materials* 168, 143–152.
4. Emery, J., 1984. Steel Slag Utilization in Asphalt Mixes. National Slag Association, MF 186-1, Taken from Canadian Technical Asphalt Association Proceedings.
5. Lewis, D. W., 1982. Properties and Uses of Iron and Steel Slags. National Slag Association, MF182-6, National Institute for Transport and Road Research South Africa,
6. C. Heidrich, K. Kiggins, T. Reiche, T. Merkel. Thomas, Iron and Steel Slags: Global Perspective on the Circular Economy, In Proceedings of the 9th EUROSLAG Conference, Metz, France, 2017.
7. Yildirim, I. Z., and Prezzi, M., 2009. Use of Steel Slag in Subgrade Applications. Joint Transportation Research Program, FHWA/IN/JTRP-2009/32, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
8. Kumar, H., & Varma, S. (2020). A review on utilization of steel slag in hot mix asphalt. Resources, Conservation and Recycling, 158, 104822.
9. Khan, M. I., Wahhab, H. I. A., & Baig, M. G. (2002). Use of steel slag as aggregate in asphalt concrete mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, 14(3), 236–242.
10. Asi, I. M., Qasrawi, H. Y., & Shalabi, F. I. (2007). Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. Canadian Journal of Civil Engineering, 34(8), 902–911. https://doi.org/10.1139/L07-025
11. Shatnawi, A. S., Abdel-Jaber, M. S. and Ramadan, K. Z., 2008. Effect of Jordanian Steel Blast Furnace Slag on Asphalt Concrete Hot Mixes. Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 2, No. 3
12. Hainin, M. R., Yusoff, N. I. M., Mohd Satar, M. K. I., & Hussain, M. A. (2012). The potential of using steel slag as a coarse aggregate replacement in asphalt concrete mixtures. Construction and Building Materials, 27(1), 252–259.

13. EL-Badawy, S. M. Shiha, M. F., & Gabr, A. R (2015). Laboratory Characterization of Asphalt Mixtures Containing Steel Slag. *MEJ-Mansoura Engineering Journal*, *40*(5), 57-67.
14. Kang, S., Kim, J., & Lee, S. (2018). Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage. Construction and Building Materials, 188, 1128–1136.
15. Shiha, M., El-Badawy, S., & Gabr, A. (2020). Modeling and performance evaluation of asphalt mixtures and aggregate bases containing steel slag. Construction and Building Materials, 248, 118710.
16. Li, J., Yu, J., Wu, S., & Xie, J. (2022). The mechanical resistance of asphalt mixture with steel slag to deformation and skid degradation based on laboratory accelerated heavy loading test. Materials, 15(3), 911.
17. Neves, J., & Crucho, J. (2023). Performance evaluation of steel slag asphalt mixtures for sustainable road pavement rehabilitation. Applied Sciences, 13(9), 5716.
18. Nketiah, C. A., et al. (2024). Replacement of conventional aggregates and fillers with steel slag in dense-graded asphalt mixtures. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies.
19. Wu, et al. (2025). Performance evaluation of asphalt mixtures containing steel slag aggregate and recycled rubber.
20. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). *Guide Specifications for Highway Construction* (4th ed.). Washington, DC: AASHTO.
21. Asphalt Institute. (2014). *MS-2 asphalt mix design methods* (7th ed., Manual Series No. 02). Asphalt Institute.