Comprehensive Journal of Science
Volume (10), Issue (37), (NOV. 2025)
SICST2025, www.sicst.ly
ISSN: 3014-6266

مجلة العلوم الشاملة
عدد خاص بالمؤتمر الدولي الثالث للعلوم والتقنية
المجلد (10)، العدد (37)، (نوفمبر2025)
ردمد: 3014-6266

تحسين أداء الخلطات الاسفلتية باستخدام المواد المعاد تدويرها

خالد عبدالله ابراهيم عبدالوافي[1]

تقنيات هندسية المعهد العالي لتقنيات الهندسية طرابلس ليبيا

High Institute of Engineering Technologies, Tripoli

Kh-tiha75@yahoo.com

Received: 30-09-2025; Revised: 10-10-2025; Accepted: 31-10-2025; Published: 25-11-2025

الملخص:

ركز هذا البحث على دراسة تأثير استخدام المواد المعاد تدويرها في تحسين خصائص الخلطات الإسفلتية. تم استعراض أنواع المواد المعاد تدويرها مثل الإطارات المستعملة، البلاستيك المعاد تدويره، والركام المعاد تدويره، ودورها في تحسين الأداء الميكانيكي للخلطات الإسفلتية. من خلال التحليل النظري، تم التأكد من أن إضافة هذه المواد تساهم في تحسين مرونة الخلطات، وتقليل التشققات، وزيادة قدرتها على التحمل.

كما تم دراسة الفوائد البيئية والاقتصادية لاستخدام هذه المواد، حيث تبين أن استخدام المواد المعاد تدويرها يقلل من النفايات ويخفض التكاليف المرتبطة بإنتاج وصيانة الخلطات الإسفلتية. ومع ذلك، تظل بعض التحديات التي تتعلق بتفاعل المواد المعاد تدويرها مع الإسفلت وكيفية تحسين التفاعل بين المكونات، وهي أمور تستدعي المزيد من البحث والتحليل.

ختامًا، يوصي البحث بتشجيع استخدام المواد المعاد تدويرها في صناعة الخلطات الإسفلتية كجزء من الممارسات المستدامة في بناء الطرق.

الكلمات المفتاحية: الخلطات الإسفلتية، المواد المعاد تدويرها، الإسفلت، الإطارات المستعملة، الركام المعاد تدويره، البلاستيك المعاد تدويره، تحسين خصائص الخلطات، الاستدامة البيئية، أداء الخلطات الإسفلتية، التفاعلات بين المواد، إعادة التدوير، الاقتصاد البيئي.

Abstract:

This research focused on studying the effect of using recycled materials in improving the properties of asphalt mixtures. The types of recycled materials such as used tires, recycled plastic, and recycled aggregates were reviewed, and their role in improving the mechanical performance of asphalt mixtures. Through theoretical analysis, it was confirmed that adding these materials contributes to improving the flexibility of mixtures, reducing cracks, and increasing their endurance.

The environmental and economic benefits of using these materials were also studied, as it was shown that using recycled materials reduces waste and lowers the costs associated with the production and maintenance of asphalt mixtures. However, some challenges remain related to the interaction of recycled materials with asphalt and how to improve the interaction between the components, which require further research and analysis.

Finally, the research recommends encouraging the use of recycled materials in the asphalt mixture industry as part of sustainable practices in road construction.

Keywords: Asphalt mixtures, recycled materials, asphalt, used tires, recycled aggregates, recycled plastic, improving mixture properties, environmental sustainability, mixture performance Asphalt, material interactions, recycling, environmental economics.

مقدمة:

في ظل التزايد المستمر في كميات النفايات وتأثيرها السلبي على البيئة، أصبح استخدام المواد المعاد تدويرها في مختلف التطبيقات الهندسية خيارًا مستدامًا يسهم في تقليل الأثر البيئي وخفض تكاليف الإنتاج. ومن بين هذه التطبيقات، شهدت صناعة الطرق تطورًا ملحوظًا في استخدام المواد المعاد تدويرها لتحسين خصائص الخلطات الإسفلتية وتعزيز أدائها.

تُستخدم المواد المعاد تدويرها مثل المطاط المعاد تدويره من إطارات السيارات، والبلاستيك المعاد تدويره، ورُكام الخرسانة المعاد تدويره، ومسحوق الزجاج المكسور، في الخلطات الإسفلتية بهدف تحسين مقاومة الرصف للعوامل البيئية والأحمال المرورية. وقد أثبتت الدراسات أن إضافة هذه المواد يسهم في زيادة مرونة الإسفلت، وتحسين مقاومة التشققات والتخدد، فضلًا عن تحسين أداء الطريق على المدى الطويل.

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير استخدام المواد المعاد تدويرها على خواص الخلطات الإسفلتية، من حيث القوة الميكانيكية، ومقاومة التآكل، والاستدامة البيئية. كما سيتم تسليط الضوء على فوائد استخدام هذه المواد في تقليل استهلاك المواد الخام وتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة، مما يسهم في تطوير حلول مستدامة في قطاع البنية التحتية.

مشكلة البحث :

تعاني الخلطات الإسفلتية التقليدية من عدة تحديات، مثل التشققات المبكرة، والتخدد، وضعف مقاومة العوامل البيئية والأحمال المرورية، مما يؤدي إلى ارتفاع تكاليف الصيانة وانخفاض جودة الطرق. في المقابل، يشكل التراكم المستمر للنفايات الصلبة مثل الإطارات المستعملة والبلاستيك والركام الخرساني تحديًا بيئيًا متزايدًا. من هنا، برزت الحاجة إلى دراسة إمكانية استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية كحل مبتكر يهدف إلى تحسين أدائها، وزيادة عمرها الافتراضي، وتقليل الأثر البيئي والتكلفة الاقتصادية.

السؤال الرئيسي :

- ما مدى تأثير استخدام المواد المعاد تدويرها على تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخلطات الإسفلتية وتعزيز استدامتها البيئية؟

الأسئلة الفرعية :

- ما مدى فاعلية المواد المعاد تدويرها في تحسين مقاومة الخلطات الإسفلتية للتشققات والتخدد والعوامل البيئية المختلفة؟

- ما التأثيرات البيئية والاقتصادية لاستخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية مقارنة بالمواد التقليدية؟

أهداف البحث :

1. تحليل تأثير المواد المعاد تدويرها على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخلطات الإسفلتية، مثل مقاومة التشققات، والتخدد، والتآكل، والاستجابة للعوامل البيئية المختلفة.
2. تقييم أداء الخلطات الإسفلتية المعدلة باستخدام المواد المعاد تدويرها مقارنة بالخلطات التقليدية، من حيث المتانة والكفاءة تحت الأحمال المرورية المختلفة.
3. راسة الفوائد البيئية لاستخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية، مثل تقليل تراكم النفايات الصلبة، وخفض استهلاك الموارد الطبيعية، وتقليل الانبعاثات الكربونية.
4. تحليل الجدوى الاقتصادية لتوظيف المواد المعاد تدويرها في صناعة الإسفلت، من خلال دراسة تكلفة الإنتاج والصيانة والعمر الافتراضي للطرق المحسنة بهذه المواد.
5. اقتراح النسب المثلى لاستخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية، لتحقيق التوازن بين تحسين الأداء وتقليل التكلفة والاستدامة البيئية.

أهمية البحث:

يكتسب هذا البحث أهمية كبيرة لدوره في تحسين جودة الطرق وزيادة عمرها الافتراضي عبر استخدام المواد المعاد تدويرها، مما يعزز مقاومة التشققات والتآكل ويقلل تكاليف الصيانة. كما يساهم في الاستدامة البيئية من خلال تقليل النفايات الصلبة، وخفض استهلاك الموارد الطبيعية، وتقليل التلوث. بالإضافة إلى ذلك، يساعد في تقليل التكاليف الاقتصادية لإنشاء وصيانة الطرق، ويدعم التوجهات الحديثة في صناعة الطرق المستدامة . وأخيرًا، يوفر البحث حلولًا عملية قابلة للتطبيق عبر تحديد أفضل نسب لاستخدام المواد المعاد تدويرها دون التأثير السلبي على الأداء.

فرضية البحث

يفترض هذا البحث أن استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية يسهم في تحسين خصائصها الفيزيائية والميكانيكية، مما يؤدي إلى زيادة مقاومة الطرق للتشققات والتخدد والتآكل، مع تقليل التكاليف الاقتصادية والتأثيرات البيئية السلبية.

كما تفترض الدراسة أن دمج المواد المعاد تدويرها بنسب مدروسة يمكن أن يعزز أداء الخلطات الإسفلتية دون التأثير السلبي على جودتها أو متانتها، مما يجعلها بديلاً مستدامًا وفعالًا للمواد التقليدية المستخدمة في صناعة الطرق.

مصطلحات البحث:

1. الخلطات الإسفلتية :خليط من الإسفلت (الأسفلت الساخن أو البارد) مع مواد مثل الركام (الرمل، الحصى، الصخور) التي يتم مزجها بنسب معينة لتكوين سطح مرن ومتين للطرق.
2. المواد المعاد تدويرها :المواد التي تم جمعها وإعادة معالجتها لاستخدامها مرة أخرى في إنتاج مواد جديدة، مثل الإطارات المستعملة، البلاستيك، الركام الخرساني، والمواد الأخرى التي يمكن دمجها في الخلطات الإسفلتية.
3. الإسفلت : مادة لزجة ودهنية يتم استخدامها في رصف الطرق، حيث يعمل على تثبيت الركام وتوفير سطح مقاوم للتآكل والتخدد.
4. مقاومة التشققات :قدرة الخلطات الإسفلتية على مقاومة التشققات الناتجة عن الأحمال المرورية أو الظروف المناخية القاسية مثل الحرارة أو البرودة.
5. مقاومة التخدد :قدرة الخلطات الإسفلتية على مقاومة التغيرات الشكلية التي قد تحدث نتيجة للضغط المستمر الناتج عن حركة المركبات الثقيلة.
6. التآكل :عملية تدهور سطح الطريق نتيجة للتعرض المستمر للعوامل البيئية (مثل الأمطار والحرارة) أو الأحمال الثقيلة.
7. الاستدامة البيئية :ممارسات تهدف إلى تقليل الأثر البيئي الناتج عن الأنشطة البشرية، مثل استخدام المواد المعاد تدويرها لتقليل التلوث واستهلاك الموارد الطبيعية.
8. الركام الخرساني :المواد المكسرة من الخرسانة المستعملة التي يمكن إعادة استخدامها في الخلطات الإسفلتية لتحسين خصائص الأداء.
9. المواد التقليدية :المواد المستخدمة بشكل تقليدي في صناعة الإسفلت مثل الصخور الطبيعية والمواد البترولية التي لم يتم إعادة تدويرها.
10. التكلفة الاقتصادية :تقدير الأموال المطلوبة لإنتاج وصيانة الطرق الإسفلتية، بما في ذلك تكلفة المواد، العمل، والصيانة.
11. المرونة :قدرة المادة على تحمل التشوهات دون أن تتعرض للكسر، وهي من الصفات المطلوبة في الخلطات الإسفلتية لتحمل تغيرات الأحمال البيئية.

منهجية البحث:

1. مراجعة الأدبيات :تحليل الدراسات السابقة حول استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية.
2. تحليل الدراسات السابقة :دراسة تأثير المواد المعاد تدويرها على خصائص الخلطات الإسفلتية من حيث مقاومة التشققات والتآكل.

3. المقارنة بين الخلطات التقليدية والمعاد تدويرها :مقارنة الأداء والخصائص بين الخلطات الإسفلتية التقليدية وتلك التي تحتوي على مواد معاد تدويرها.
4. دراسة التأثيرات البيئية والاقتصادية :تحليل الفوائد البيئية والاقتصادية لاستخدام المواد المعاد تدويرها.
5. استنتاجات وتوصيات :استخلاص استنتاجات وتقديم توصيات بشأن استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية.

الدراسات السابقة:

1. دراسة قام بها كل من د. سوزان شعبان و د. أيمن لفلوف بعنوان إمكانية إعادة استخدام الحصويات المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية

تم في عام 2022 إجراء دراسة لاستكشاف إمكانية الاستفادة من مخلفات الإنشاء والهدم في الخلطات الإسفلتية. حيث أن المنشآت البيتونية في سوريا، نتيجة للظروف المناخية القاسية والحرب المستمرة، تعرضت لعمليات هدم واسعة النطاق، مما أدى إلى تراكم كميات ضخمة من المخلفات، وخاصة الخرسانة.

تعتبر تقنية إعادة استخدام مخلفات المنشآت البيتونية المهدمة قديمة في بعض الدول التي تتعرض لكوارث طبيعية أو ظروف مناخية قاسية، بينما بدأت تأخذ طابعًا حديثًا في دول شهدت نهضة عمرانية كدول الخليج.

تشير الدراسة إلى أن تدوير ومعالجة مكونات الخرسانة المحطمة وإضافتها إلى الخلطات الخرسانية أو الإسفلتية يمكن أن يساهم في تقليل الحاجة للمكونات الطبيعية الجديدة، وبالتالي تقليل الضغط على المقالع. كما أن ذلك يساعد في الحفاظ على المواد للأجيال القادمة ويسهم في تقليل التلوث البيئي.

توصلت الدراسة إلى أن خشونة سطح الحبيبات المعاد تدويرها تتطلب استخدام نسبة رابط مرتفعة تصل إلى 5.75%، فيما أظهرت نتائج الخليط الإسفلتي المنتَج أنه يحقق الحد الأدنى المطلوب من الثبات. كما كانت قيمة السيلان 2.5 ملم، وهي مقبولة رغم أنها منخفضة نسبياً بالنسبة لنسبة الرابط المرتفعة، وكانت نسبة الفراغات الهوائية ودرجة الامتلاء مقبولة أيضًا، لكنها أقل من المعدلات المثالية بالنسبة لنسبة الرابط.

البعد(المقياس)	القيمة التي توصلت إليها الدراسة	ملاحظة / تعليق
نسبة الرابط (Binder) المستخدمة	5.75٪	نسبة مرتفعة بسبب خشونة سطح الحبيبات المعاد تدويرها
ثبات الخليط الإسفلتي	يحقق الحد الأدنى المطلوب	الثبات مقبول ضمن المعايير
قيمة السيلان (Flow)	2.5 مم	مقبولة لكنها منخفضة بالنسبة لنسبة الرابط العالية
نسبة الفراغات الهوائية	مقبولة	أقل من المعدل المثالي لنسبة الرابط المستخدمة
درجة الامتلاء	مقبولة	لكنها أقل من الخلطات المثالية

2. أطروحة دكتوراه بالجامعة المستنصرية للطالب أحمد سليم عبد اللطيف تبحث تحسين كفاءة الخلطات الإسفلتية الباردة لغبار إفران الأسمنت2020

تناولت أطروحة دكتوراه في كلية الهندسة بالجامعة المستنصرية، دراسة تحسين كفاءة الخلطات الإسفلتية الباردة باستخدام غبار إفران الأسمنت بالإضافة إلى الركام الكونكريتي المكسر.

هدفت الأطروحة إلى دراسة إمكانية استخدام المواد المعاد تدويرها كبديل مستدام وفعال لتحسين كفاءة الخلطات الإسفلتية الباردة، التي تتسم عادةً بوجود فجوات هوائية وضعف في قوامها في الأيام الأولى بعد المزج. كما تناولت الدراسة تصميم الخلطات الأمثل باستخدام الركام الكونكريتي المكسر المدور وغبار مرسبات معامل الإسمنت بهدف تحقيق أفضل أداء لهذه الخلطات.

تضمنت الأطروحة إجراء تجربة لتطبيق طريقة التصميم المركب الوسطى مع منهجية سطح الاستجابة، وتحليل تأثير المعاملات المختلفة مثل محتوى الإسفلت المستحلب والماء قبل المزج على الخصائص الميكانيكية والأداء للخلطات. كما تمت مقارنة النتائج مع النماذج المخمنة إحصائيًا، بالإضافة إلى تحليل البروتوكولات المختلفة وتأثيراتها على سلوك وقوة الخلطات الإسفلتية.

أوضحت الأطروحة أن الخلطات الإسفلتية الباردة تعتبر بديلاً فعالًا للخلطات الإسفلتية الحارة في جميع أنحاء العالم، نظرًا لمميزاتها العديدة مثل انخفاض التكاليف الاقتصادية، وتقليل استهلاك الطاقة، وتقليل التأثير البيئي. كما أنها تعتبر أقل خطورة على العاملين، ولها مرونة ومقاومة جيدة للتشققات، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في الطرق ذات الحركة المرورية المنخفضة أو المتوسطة.

توصلت نتائج الأطروحة إلى أن زيادة مدة الإنضاج ودرجة الحرارة تؤديان إلى تعزيز قوة وصلابة الخلطات الإسفلتية الباردة، مما يساهم في تحسين كفاءتها.

المحور / البند	الوصف	الملاحظات / النتائج
هدف الدراسة	دراسة إمكانية استخدام غبار أفران الأسمنت والركام الكونكريتي المكسر لتحسين كفاءة الخلطات الإسفلتية الباردة.	تحقيق بدائل مستدامة تقلل من التكاليف والاستهلاك الطاقي.
منهجية البحث	تطبيق طريقة التصميم المركب الوسطى ومنهجية سطح الاستجابة لتحليل المتغيرات المؤثرة على الأداء.	تم تحليل تأثير محتوى الإسفلت المستحلب والماء قبل المزج.
الاستجابة (Response)	تحسين الخصائص الميكانيكية مثل القوة، الصلابة، والثبات.	أظهرت النتائج تحسناً في الأداء عند زيادة مدة الإنضاج ودرجة الحرارة.
فعالية الخلطات الإسفلتية	الخلطات الباردة أثبتت كفاءتها كبديل للخلطات الحارة.	تتميز بانخفاض الكلفة، تقليل التأثير البيئي، وتحسين الأمان للعاملين.
الاستنتاج العام	زيادة مدة الإنضاج ودرجة الحرارة تعزز قوة الخلطات وتزيد من كفاءتها.	الخلطات مناسبة للطرق ذات الحركة المرورية المنخفضة والمتوسطة.

أوجه التشابه والاختلاف بين دراستي:

أوجه التشابه:

1. استخدام المواد المعاد تدويرها: كلا الدراستين تركز على استخدام المواد المعاد تدويرها لتحسين خواص الخلطات الإسفلتية. في دراستك، يتم استخدام مخلفات الإنشاء والهدم، بينما في أطروحة الطالب أحمد سليم عبد اللطيف يتم استخدام غبار إفران الأسمنت والركام الكونكريتي المكسر.
2. تحسين الخلطات الإسفلتية: تهدف كلتا الدراستين إلى تحسين كفاءة الخلطات الإسفلتية. في دراستك، يتم تحسين الخلطات باستخدام حصويات معاد تدويرها، بينما في أطروحة الدكتوراه يتم تحسين كفاءة الخلطات الإسفلتية الباردة باستخدام غبار الإفران والركام الكونكريتي.
3. الفوائد البيئية والاقتصادية: تركز كلتا الدراستين على تقليل التكاليف الاقتصادية وتقليل التأثيرات البيئية من خلال تقليل الحاجة للمواد الطبيعية والتخلص من النفايات.
4. المعايير الميكانيكية: كلتا الدراستين تتضمنان تحليل الخصائص الميكانيكية للأداء، مثل قوة التحمل والمرونة.

أوجه الاختلاف:

1. نوع المواد المعاد تدويرها: في دراستك، يتم استخدام مخلفات البناء والخرسانة الناتجة عن عمليات الهدم، بينما في أطروحة الطالب أحمد سليم عبد اللطيف يتم استخدام غبار إفران الأسمنت مع الركام الكونكريتي المكسر.
2. نوع الخلطات الإسفلتية: دراستك تركز على الخلطات الإسفلتية المدمجة باستخدام المواد المعاد تدويرها بشكل عام، في حين أن أطروحة الطالب تتعلق بالخلطات الإسفلتية الباردة التي يتم تعديلها باستخدام غبار الإفران.
3. طريقة التصميم: في دراستك، تركز على استخدام نسبة رابط مرتفعة بسبب خشونة سطح الحبيبات المعاد تدويرها، بينما في أطروحة الطالب يتم استخدام طريقة التصميم المركب الوسطى ومنهجية سطح الاستجابة لتحسين الخلطات.
4. الخصائص المراد تحسينها: في دراستك، يتم التركيز على تحسين الثبات وكفاءة السيلان ودرجة الامتلاء، بينما في الأطروحة، يتم التركيز على تحسين كفاءة الخلطات الإسفلتية الباردة بشكل عام، بما في ذلك تحسين الاستقرار والصلابة والمرونة.

الإطار النظري:

الخلطات الإسفلتية

1. الخلطات الإسفلتية الساخنة:

تُعتبر الخلطات الإسفلتية الساخنة (Hot Mix Asphalt – HMA) الأكثر استخدامًا في بناء الطرق حول العالم. تتكون هذه الخلطات من ركام (حصى ورمل) وأسفلت يتم تسخينهما إلى درجات حرارة تتراوح بين 150 و190 درجة مئوية قبل الخلط. يتميز هذا النوع من الخلطات بقدرته على تحمل الأحمال الثقيلة والعوامل الجوية، مما يجعله مثاليًا للطبقات السطحية للطرق. بالإضافة إلى ذلك، يتمتع الأسفلت الساخن بمرونة عالية، مما يقلل من تشكل التشققات ويطيل عمر الطريق. ومع ذلك، فإن عملية إنتاج الخلطات الساخنة تتطلب طاقة كبيرة وتنتج انبعاثات غازية، مما دفع الباحثين إلى تطوير بدائل أكثر استدامة. (Roberts et al., 1996)

2. الخلطات الإسفلتية الدافئة:

الخلطات الإسفلتية الدافئة (Warm Mix Asphalt – WMA) هي تطور حديث في صناعة الطرق يهدف إلى تقليل استهلاك الطاقة وتقليل الانبعاثات الضارة. يتم إنتاج هذه الخلطات عند درجات حرارة أقل من الخلطات الساخنة، عادة بين 100 و140 درجة مئوية. يتم تحقيق ذلك باستخدام مواد مضافة أو تقنيات خاصة تخفض لزوجة الأسفلت، مما يسهل عملية الخلط والدمج. من فوائد هذه الخلطات تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وأكسيد النيتروجين، بالإضافة إلى تحسين ظروف العمل للعاملين في الموقع. ومع ذلك، يجب التأكد من أن الخلطات الدافئة تحقق نفس متانة الخلطات الساخنة قبل استخدامها على نطاق واسع. (Hurley & Prowell, 2006)

3. الخلطات الإسفلتية الباردة:

تُستخدم الخلطات الإسفلتية الباردة (Cold Mix Asphalt – CMA) في المناطق التي يصعب فيها تسخين المواد أو في حالات الصيانة الطارئة. يتم إنتاج هذه الخلطات باستخدام أسفلت مستحلب أو مذيبات خاصة تسمح بتصلب الخلطة دون الحاجة إلى درجات حرارة عالية. تُعتبر هذه الخلطات مثالية للأماكن النائية أو في الأجواء الباردة حيث يصعب استخدام الخلطات الساخنة. ومع ذلك، فإن الخلطات الباردة عادة ما تكون أقل متانة من الخلطات الساخنة أو الدافئة، مما يحد من استخدامها في الطرق الرئيسية ذات الأحمال المرورية العالية. (Kandhal & Mallick, 1997)

4. الخلطات الإسفلتية المعاد تدويرها:

الخلطات الإسفلتية المعاد تدويرها (Recycled Asphalt Pavement – RAP) هي خيار صديق للبيئة يُستخدم بشكل متزايد في مشاريع الطرق. يتم إعادة استخدام الأسفلت القديم بعد طحنه ومعالجته، مما يقلل من الحاجة إلى مواد جديدة ويقلل من النفايات. يمكن أن تحتوي الخلطات المعاد تدويرها على ما يصل إلى 30–40% من المواد المعاد استخدامها دون التأثير على جودة الطريق. بالإضافة إلى الفوائد البيئية، فإن استخدام الخلطات المعاد تدويرها يقلل من تكاليف البناء. ومع ذلك، يتطلب ذلك ضوابط دقيقة لضمان جودة المواد المعاد استخدامها. (Copeland, 2011)

5. الخلطات الإسفلتية عالية الأداء:

الخلطات الإسفلتية عالية الأداء (High-Performance Asphalt – HPA) تُصمم خصيصًا لتحمل الأحمال المرورية الثقيلة والعوامل الجوية القاسية. تُستخدم هذه الخلطات في الطرق السريعة والمطارات والمناطق الصناعية. تحتوي هذه الخلطات على مواد مضافة مثل البوليمرات أو الألياف لتحسين مقاومتها للتشقق والتآكل. بالإضافة إلى ذلك، تتميز هذه الخلطات بمرونة عالية وقدرة على تحمل التغيرات الحرارية. على الرغم من تكلفتها العالية نسبيًا، فإنها توفر عمرًا أطول للطرق وتقلل من تكاليف الصيانة على المدى الطويل. (Brown et al., 2009)

2. المواد المعاد تدويرها:

تُعتبر المواد المعاد تدويرها (Recycled Materials) من العناصر الأساسية في صناعة الطرق الحديثة، حيث يتم إعادة استخدام الأسفلت القديم (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP) والمواد الأخرى مثل الإطارات المطاطية المعاد تدويرها (Crumb Rubber) والزجاج المطحون. تُسهم هذه المواد في تقليل الاعتماد على الموارد الطبيعية وتقليل النفايات الناتجة عن أعمال الهدم وإعادة التأهيل. يتم طحن الأسفلت القديم وإضافته إلى الخلطات الجديدة بنسب محددة لضمان جودة الطريق. (Copeland, 2011)

3. خصائص الخلطات الإسفلتية المعدلة بالمواد المعاد تدويرها:

تتميز الخلطات الإسفلتية التي تحتوي على مواد معاد تدويرها بعدة خصائص فريدة. أولاً، تحسن هذه المواد من مقاومة التشقق والتآكل بسبب وجود الأسفلت القديم الذي يحتوي على مواد لاصقة معتادة على الظروف الجوية. ثانيًا، يمكن أن تزيد من مرونة الخلطة الإسفلتية، خاصة عند إضافة الإطارات المطاطية المعاد تدويرها. ومع ذلك، يجب مراعاة نسب الإضافة بعناية، حيث يمكن أن تؤدي النسب العالية إلى تقليل متانة الخلطة إذا لم يتم معالجتها بشكل صحيح. (Williams et al., 2013)

4. الفوائد البيئية لاستخدام المواد المعاد تدويرها:

يُعد استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية خطوة مهمة نحو تحقيق الاستدامة البيئية. أولاً، تقلل هذه الممارسة من كمية النفايات التي يتم إرسالها إلى مكبات النفايات. ثانيًا، تقلل من الحاجة إلى استخراج المواد الخام مثل الحصى والرمل، مما يحافظ على الموارد الطبيعية. ثالثًا، تقلل من انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن عمليات التصنيع والنقل. وبالتالي، تسهم هذه الممارسة في تقليل البصمة الكربونية لصناعة الطرق. (Shen et al., 2007)

5. الفوائد الاقتصادية:

يُعد استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية ممارسة اقتصادية مفيدة. أولاً، تقلل من تكاليف المواد الخام، حيث أن الأسفلت المعاد تدويره أقل تكلفة من الأسفلت الجديد. ثانيًا، تقلل من تكاليف التخلص من النفايات، حيث يتم إعادة استخدام المواد بدلاً من التخلص منها. ثالثًا، يمكن أن تقلل من تكاليف الصيانة على

المدى الطويل بسبب تحسين خصائص الخلطة الإسفلتية. هذه العوامل تجعل استخدام المواد المعاد تدويرها خيارًا جذابًا من الناحية الاقتصادية. (Copeland, 2011)

6. تحديات استخدام المواد المعاد تدويرها في الإسفلت:

على الرغم من الفوائد العديدة، فإن استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية يواجه عدة تحديات. أولاً، يمكن أن تختلف جودة المواد المعاد تدويرها بشكل كبير، مما يتطلب فحوصات دقيقة لضمان جودتها. ثانيًا، قد تحتاج الخلطات التي تحتوي على نسب عالية من المواد المعاد تدويرها إلى إضافات خاصة لتحسين أدائها، مما يزيد من التكلفة. ثالثًا، قد تكون هناك قيود تقنية في بعض المناطق تتعلق بمعالجة المواد المعاد تدويرها. أخيرًا، قد يواجه القطاع مقاومة من بعض المقاولين الذين يفضلون استخدام المواد التقليدية. (Williams et al., 2013)

7. التوجهات المستقبلية:

يتجه مستقبل صناعة الطرق نحو زيادة استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية. أولاً، يتم تطوير تقنيات جديدة لتحسين جودة المواد المعاد تدويرها، مثل استخدام الإنزيمات والمواد المضافة لتحسين التصاق الأسفلت. ثانيًا، يتم العمل على وضع معايير عالمية لضمان جودة الخلطات التي تحتوي على مواد معاد تدويرها. ثالثًا، يتم تشجيع الحكومات والقطاع الخاص على تبني هذه الممارسات من خلال الحوافز الاقتصادية والتشريعات البيئية. أخيرًا، يتم التركيز على زيادة الوعي بأهمية الاستدامة في صناعة الطرق. (Shen et al., 2007)

الاستنتاج

من خلال الدراسة النظرية المتعلقة باستخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية، تم التأكد من أن هذه المواد تلعب دورًا مهمًا في تحسين خصائص الخلطات من حيث المرونة، مقاومة التشققات، وقوة التحمل تحت الأحمال الثقيلة. إضافة المواد المعاد تدويرها، مثل الإطارات المستعملة والركام المعاد تدويره، إلى الخلطات الإسفلتية يساهم في تعزيز الأداء بشكل ملحوظ، مما يساهم في تحسين خصائص الخلطات الإسفلتية بما يتماشى مع الفرضية التي تشير إلى أن استخدام هذه المواد يُحسن من خصائص الخلطات الإسفلتية بشكل عام.

كما أظهرت الدراسة أن تطبيق هذه المواد يحقق فوائد بيئية واقتصادية كبيرة، إذ يساعد في تقليل النفايات وتقليل استهلاك الموارد الطبيعية، مما يتماشى مع النتائج التي تبين الفوائد البيئية والاقتصادية المرتبطة باستخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية. هذه النتائج تعكس أيضًا الإجابة على التساؤل المتعلق بمدى التأثير الإيجابي لهذه المواد على تحسين خصائص الخلطات الإسفلتية، وهو ما تم تأكيده من خلال الأدلة المتاحة.

ومع ذلك، لا تزال بعض التحديات قائمة في تطبيق هذه المواد، مثل التفاعلات المحتملة بين المواد المعاد تدويرها والإسفلت. ولكن مع التحكم في النسب والمعالجة الجيدة لهذه المواد، يمكن التغلب على هذه الصعوبات،

وهو ما يجيب بشكل غير مباشر على التساؤل المتعلق بالقيود والتحديات المرتبطة باستخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية.

بناءً على ذلك، يمكن القول إن فرضية البحث التي تفترض أن المواد المعاد تدويرها تساهم في تحسين خصائص الخلطات الإسفلتية قد تم التحقق منها بنجاح، كما تم إثبات أن هذه المواد توفر فوائد بيئية واقتصادية حقيقية في إطار تصميم الخلطات الإسفلتية.

التوصيات:

1. **إجراء المزيد من الأبحاث العملية** :يُوصى بإجراء دراسات عملية لتحديد النسب المثلى للمواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية، حيث يمكن أن تختلف هذه النسب بناءً على نوع المادة ونوع الطريق وظروف البيئة المحلية.
2. **تحفيز استخدام المواد المعاد تدويرها في الصناعة** :يجب تشجيع الصناعات والمصانع على استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية من خلال توفير حوافز بيئية واقتصادية. هذا من شأنه أن يساهم في التقليل من النفايات وتشجيع ممارسات الاستدامة.
3. **تطوير تقنيات معالجة المواد المعاد تدويرها** :من الضروري تطوير تقنيات جديدة لتحسين عملية معالجة المواد المعاد تدويرها، مما يجعلها أكثر توافقًا مع الإسفلت ويزيد من فعاليتها في تحسين أداء الخلطات الإسفلتية.
4. **التطبيقات المستقبلية للمواد المعاد تدويرها** :يجب أن تستمر الأبحاث في استكشاف التطبيقات الجديدة التي يمكن للمواد المعاد تدويرها أن تدخل فيها، مثل استخدام الأنواع المختلفة من البلاستيك أو المعادن المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية لتعزيز أدائها.

الخاتمة

في ختام هذا البحث، يمكن التأكيد على أن استخدام المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية يمثل خطوة هامة نحو تحسين الأداء البيئي والاقتصادي لصناعة الأسفلت. فقد أظهرت الدراسات النظرية أن إضافة المواد المعاد تدويرها، مثل الإطارات المستعملة والركام المعاد تدويره، يمكن أن يعزز خصائص الخلطات الإسفلتية بشكل ملحوظ، مما يؤدي إلى تحسين مرونة الخلطات، مقاومة التشققات، وقوة التحمل للأحمال. بالإضافة إلى ذلك، تسهم هذه المواد في تقليل استهلاك المواد الطبيعية، تقليل النفايات، وبالتالي تقليل التكاليف المرتبطة بإنتاج الأسفلت وصيانته.

على الرغم من الفوائد الكبيرة التي يمكن أن توفرها المواد المعاد تدويرها، فإن هناك تحديات متعلقة بكيفية تفاعل هذه المواد مع الإسفلت وضبط النسب المثلى لاستخدامها. لذا، من الضروري إجراء المزيد من الدراسات العملية

لتحديد أفضل طرق المعالجة والخلط، لضمان الحصول على خلطة إسفلتية عالية الجودة. بناءً على النتائج، فإن البحث يساهم في تعزيز استخدام هذه المواد في الطرق الإسفلتية كممارسة مستدامة.

المراجع :

[1] شعبان، س.، &لفلوف، أ. (2022). دراسة إمكانية إعادة استخدام الحصويات المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية. مجلة جامعة حماة، المجلد 5، العدد 11. استرجع من https://hama-univ.edu.sy/ojs/index.php/huj/article/view/1266

[2] عبد اللطيف، أحمد سليم (2020). تحسين كفاءة الخلطات الإسفلتية الباردة لغبار أفران الأسمنت. أطروحة دكتوراه، كلية الهندسة، الجامعة المستنصرية، بغداد، العراق.

[3] Copeland, A. (2011). Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice (Report No. FHWA-HRT-11-021). Federal Highway Administration.

[4] Hurley, G. C., & Prowell, B. D. (2006). Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt. National Center for Asphalt Technology, 06-02.

[5] Kandhal, P. S., & Mallick, R. B. (1997). Pavement recycling guidelines for state and local governments. National Center for Asphalt Technology, 97-123.

[6] Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction. Lanham, MD: NAPA Research and Education Foundation.

[7] Shen, J., Amirkhanian, S., & Miller, J. A. (2007). Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(5), 376-384. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(376)

[8] Williams, B. A., Willis, J. R., & Ross, T. C. (2013). Recycling asphalt pavements: A strategy revisited. National Asphalt Pavement Association.