African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)
Online ISSN: 2957-644X
Volume 4, Issue 3, 2025
Page No: 23-30
Website: https://aaasjournals.com/index.php/ajapas/index
ISI 2025: 1.126 **SJIFactor 2024: 6.752** **معامل التأثير العربي: 1.62**

تقييم استخدام الأسفلت الرغوي في خلطات إعادة التدوير لتحسين الاستدامة في المشاريع الطرق، مع التركيز على الخصائص الفنية والأثر البيئي

م. عبد السلام محمد الطيب موسى *
قسم البناء والتشييد، المعهد العالي للعلوم والتقنية، بنت بيه، وادي الآجال، ليبيا

Evaluation of the Use of Foamed Asphalt in Recycling Mixes to Enhance Sustainability in Road Projects, Focusing on Technical Properties and Environmental Impact

Abdussalam Mohamed Altiab Moussa *
Higher Institute of Science and Technology, Wadi Al-Ajal, Bint Bayahm, Libya

*Corresponding author: masterabdoul2022@gmail.com

Received: May 08, 2025	Accepted: June 29, 2025	Published: July 10, 2025

الملخص

استخدام الأسفلت الرغوي حلاً مبتكرًا في إعادة تدوير مواد الطرق، حيث يتم إنتاجه من خلال خلط الأسفلت مع الماء والهواء، مما ينتج رغوة خفيفة الوزن. يُستخدم هذا النوع من الأسفلت في تحسين الاستدامة في مشاريع الطرق من خلال تقليل الحاجة للمواد الجديدة، مما يساهم في تقليل استنزاف الموارد الطبيعية ونفايات البناء. كما يعزز من خصائص الخلطات، مثل المرونة والقدرة على التحمل، مما يؤدي إلى عمر أطول للطرق وتقليل تكاليف الصيانة. يساهم استخدام الأسفلت الرغوي في تخفيف الانبعاثات الكربونية نظرًا لأنه يقلل من الحاجة لتسخين المواد في العمليات التقليدية، مما يوفر الطاقة ويقلل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. يمكن استخدامه في مجموعة متنوعة من المشاريع، بما في ذلك الطرق السريعة والممرات الحضرية، مما يجعله خيارًا مرنًا وفعّالاً بيئيًا واقتصاديًا. مع ذلك، تواجه هذه التقنية بعض التحديات، مثل نقص المعايير القياسية واختبارات الأداء الدقيقة، مما يستدعي مزيدًا من الأبحاث لتطوير معايير تصميم موحدة وتأكيد فعاليتها في ظروف مختلفة. تشير التجارب الميدانية إلى أن الأسفلت الرغوي يمكن أن يكون فعالًا في تحسين أداء الطرق وتحمل الأحمال الثقيلة، لكنه يتطلب المزيد من الدراسات لضمان جودته وتوحيد المعايير. يُعد دمج المواد المعاد تدويرها في الخلطات باستخدام الأسفلت الرغوي خطوة مهمة نحو تحقيق الاستدامة في مشاريع الطرق، حيث يقلل من التكلفة، يحافظ على الموارد الطبيعية، ويطيل من عمر الخدمة للبنية التحتية.

الكلمات المفتاحية: الإسفلت الرغوي، الاستدامة، الأثر البيئي، إعادة تدوير.

Abstract

Foamed asphalt is an innovative solution for recycling road materials, produced by mixing asphalt with water and air, resulting in a lightweight foam. This type of asphalt contributes to improving sustainability in road projects in several ways. Foamed asphalt helps reduce the need for new materials, thereby contributing to the depletion of natural resources and construction waste. It enhances the properties of the mixes, such as flexibility and durability, leading to a longer lifespan for roads and reduced maintenance costs. The use of foamed asphalt mitigates carbon emissions, as it decreases the necessity of heating materials in traditional processes. It can be utilized in a variety of projects, including highways and urban pavements, making it a versatile option. However, this technology faces challenges, such as the lack of standardized

guidelines and accurate performance testing, necessitating further research to confirm its effectiveness under different conditions. The utilization of foamed asphalt in recycling mixes is a significant step towards achieving sustainability in road projects, providing an environmentally and economically effective solution.

Keywords: foamed asphalt, sustainability, environmental impact, recycling.

المقدمة

الاستدامة في مشاريع الطرق من القضايا الحيوية في العصر الحديث، حيث يزداد الاهتمام بتقنيات إعادة تدوير المواد لتحسين الأداء البيئي. يعد الأسفلت الرغوي تقنية مبتكرة تُستخدم في خلطات إعادة التدوير، حيث يُنتج من خلال دمج الأسفلت مع الماء والهواء، مما يسهل استخدامه مع المواد المعاد تدويرها. يسهم استخدام الأسفلت الرغوي في تقليل الحاجة للمواد الجديدة، مما يقلل من استنزاف الموارد الطبيعية ويحد من النفايات. بالإضافة إلى ذلك، يحسن الأسفلت الرغوي من خصائص الخلطات، مثل المرونة والقدرة على التحمل، مما يؤدي إلى زيادة عمر الطرق وتقليل تكاليف الصيانة. رغم الفوائد العديدة، تواجه هذه التقنية تحديات تتعلق بالمعايير القياسية واختبارات الأداء، مما يستدعي المزيد من البحث والتطوير. تهدف هذه الورقة إلى استكشاف إمكانات الأسفلت الرغوي في تعزيز الاستدامة في مشاريع الطرق، مع التركيز على الفوائد والتحديات المرتبطة باستخدامه. تتزايد الحاجة إلى تحسين استدامة مشاريع الطرق في مواجهة التحديات البيئية والاقتصادية الحالية. يعد الأسفلت الرغوي تقنية مبتكرة تقدم حلولاً فعّالة في هذا السياق، حيث يجمع بين الفوائد الفنية والبيئية. تكمن أهمية هذا البحث في عدة جوانب، يساهم الأسفلت الرغوي في تحسين مرونة الخلطات الإسفلتية وقدرتها على تحمل الأحمال، مما يؤدي إلى طرق أكثر متانة وأطول عمرًا. يساهم استخدام الأسفلت الرغوي في تقليل الانبعاثات الضارة وتقليل الحاجة إلى المواد الخام الجديدة من خلال تعزيز إعادة التدوير، مما يعكس التزام صناعة الطرق بالاستدامة. على الرغم من التكاليف الأولية المرتبطة بالتكنولوجيا، يمكن أن يؤدي الأسفلت الرغوي إلى تقليل تكاليف الصيانة على المدى الطويل، مما يجعله خيارًا اقتصاديًا. يشير البحث إلى الحاجة إلى معالجة العوائق الحالية مثل نقص المعايير القياسية والحاجة إلى مزيد من البيانات التجريبية حول الأداء، مما يساهم في تعزيز استخدام الأسفلت الرغوي في مشاريع الطرق. تم اختيار هذا البحث بسبب الأهمية المتزايدة للاستدامة في صناعة الطرق، وظهور الأسفلت الرغوي كخيار مبتكر يوفر فوائد متعددة. من خلال دراسة خصائص الأسفلت الرغوي وتأثيره البيئي، يمكن تقديم توصيات عملية لتحسين استخدامه، مما يسهم في تحقيق أهداف الاستدامة في مشاريع البنية التحتية. علاوة على ذلك، يسعى البحث إلى تسليط الضوء على الفوائد والتحديات المرتبطة باستخدام هذه التقنية، مما يعزز من فهم المهندسين والمقاولين لأفضل الممارسات في هذا المجال. كما تتزايد الحاجة إلى تحسين استدامة مشاريع الطرق في مواجهة التحديات البيئية والاقتصادية الحالية، مما يجعل البحث في استخدام الأسفلت الرغوي موضوعًا ذا أهمية بالغة. يقدم الأسفلت الرغوي تقنية مبتكرة تجمع بين الفوائد الفنية والبيئية، حيث يُحسن الأداء الفني للخلطات الإسفلتية، مما يؤدي إلى طرق أكثر متانة وأطول عمرًا. كما يساهم في تقليل الانبعاثات الضارة ويعزز إعادة تدوير المواد، مما يعكس التزام صناعة الطرق بالاستدامة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤدي استخدام الأسفلت الرغوي إلى تقليل تكاليف الصيانة على المدى الطويل، رغم التكاليف الأولية المرتبطة بالتكنولوجيا. يهدف هذا البحث إلى تقييم فعالية الأسفلت الرغوي من خلال دراسة خصائصه الفنية وأثره البيئي، وتحديد التحديات التي تعيق استخدامه على نطاق واسع. تتضمن المنهجية مراجعة الأدبيات لجمع المعلومات، وجمع البيانات من المقاولين والمهندسين، وإجراء تجارب مختبرية لتقييم الخصائص الفنية، بالإضافة إلى تحليل دراسات حالة لتقييم الأداء الفعلي. من المتوقع أن تسفر نتائج البحث عن توصيات عملية تعزز استخدام الأسفلت الرغوي في مشاريع الطرق، بما في ذلك تطوير معايير واضحة وإرشادات تطبيقية. كما يهدف البحث إلى زيادة الوعي بين المهندسين والمقاولين حول فوائد هذه التقنية، مما يسهم في تحقيق أهداف الاستدامة في صناعة الطرق.

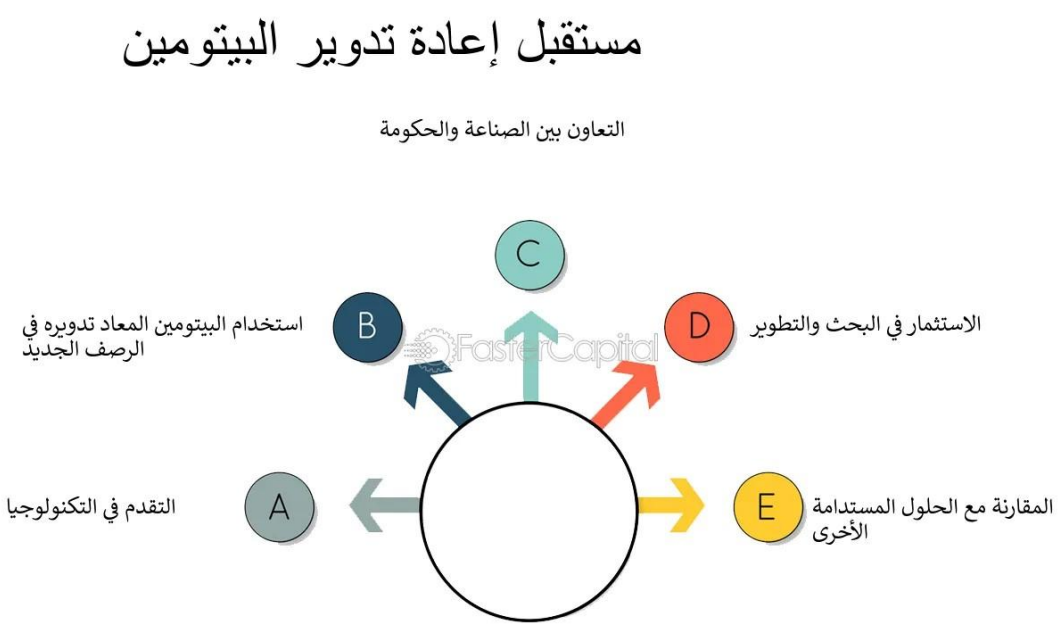
1. مشكلة البحث:

تتمثل مشكلة البحث في عدم القدرة على تحقيق الاستخدام الواسع للأسفلت الرغوي في خلطات إعادة التدوير ضمن مشاريع الطرق، على الرغم من فوائده البيئية والاقتصادية المحتملة. يواجه هذا المجال العديد من التحديات، مثل نقص المعايير القياسية، والتقنيات المتقدمة المطلوبة للإنتاج، وعدم وجود بيانات كافية حول الأداء في ظروف مختلفة. كما توجد مقاومة من قبل بعض المقاولين لتبني هذه التقنية الجديدة، مما يعوق الابتكار والتطور في صناعة الطرق. بالتالي تتطلب هذه المشكلة استكشافًا شاملاً لتحديد العوامل التي تعيق تطبيق الأسفلت الرغوي، بالإضافة إلى دراسة الحلول الممكنة لتعزيز استخدامه وتحقيق استدامة أفضل في مشاريع الطرق.

2. أهداف البحث:

1. دراسة خصائص الأسفلت الرغوي وأدائه في خلطات إعادة التدوير مقارنة بالأسفلت التقليدي.
2. استكشاف الأثر البيئي لاستخدام الأسفلت الرغوي، بما في ذلك تقليل الانبعاثات وتقليل استهلاك الموارد.

3. التعرف على العوامل التي تعيق استخدام الأسفلت الرغوي على نطاق واسع، بما في ذلك نقص المعايير والتكنولوجيا المتاحة.
4. وضع استراتيجيات وحلول عملية لتعزيز استخدام الأسفلت الرغوي في مشاريع الطرق، بما في ذلك تطوير معايير وإرشادات واضحة.
5.تعزيز الفهم والمعرفة بين المهندسين والمقاولين حول فوائد الأسفلت الرغوي وتطبيقاته في مشاريع البناء المستدامة.
6. دراسة التكاليف المرتبطة باستخدام الأسفلت الرغوي مقارنة بالخيارات التقليدية، وتقييم العوائد المحتملة على الاستثمار.



الشكل 1 مستقبل إعادة التدوير.

3. المنهجية:
مراجعة شاملة لبعض الدراسات السابقة والمقالات العلمية المتعلقة باستخدام الأسفلت الرغوي، مع التركيز على الخصائص الفنية والأثر البيئي.

4. الدراسات السابقة:
تظهر البحوث العلمية السابقة أن استخدام الأسفلت الرغوي في الخلطات الإسفلتية يقدم تحسينات ملحوظة في الخصائص الفنية والبيئية. فمن الناحية الفنية، تساهم هذه التقنية في تحسين مرونة الخلطات وقدرتها على تحمل الأحمال المرورية الثقيلة، كما تزيد من مقاومة الطرق للتشققات والتآكل، وتعزز التماسك بين مكونات الخلطة. وقد أظهرت الدراسات أن قوة الأسفلت الرغوي تزداد مع زيادة محتوى المواد الناعمة، وأن معاملات المرونة لخلطات الأسفلت الرغوي تتفوق على خلطات الأسفلت الساخن المكافئة في درجات الحرارة العالية. بالإضافة إلى ذلك، يمكن إنشاء طبقات الأسفلت الرغوي حتى في الظروف الجوية المعاكسة، مما يقلل من حساسية الرطوبة للمواد الحبيبية.(A. Saleh1, L. Gáspár.16/03 /2021) من الناحية البيئية، توصلت الدراسات إلى أن استخدام الأسفلت الرغوي يقلل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري أثناء عمليات الإنتاج، حيث يتم إنتاجه عند درجات حرارة منخفضة مقارنة بالأسفلت التقليدي. (Vahit Ilhan. (June 4, 2024) Foamed Bitumen.petronaft). كما يعزز الأسفلت الرغوي من إعادة تدوير المواد، مما يقلل من الحاجة للمواد الخام الجديدة ويحد من النفايات، مما يساهم في خفض البصمة الكربونية لمشاريع الطرق. (A. Saleh1, L. Gáspár.16/03 .2021/) وقد أظهرت بعض الدراسات أن استخدام الأسفلت الرغوي يمكن أن يقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تصل إلى 30٪ مقارنة بإنتاج الأسفلت التقليدي. كما تشير الأبحاث إلى أن هناك بعض التحديات التي يجب التعامل معها، مثل نقص المعايير القياسية التي تنظم استخدام الأسفلت الرغوي، مما يؤدي إلى تباين في جودة المنتجات. كما تتطلب التطبيقات العملية مزيدًا من التجارب الميدانية للحصول على بيانات موثوقة حول الأداء في ظروف مختلفة، مما يشير إلى ضرورة إجراء المزيد من الدراسات لتأكيد الفوائد المحتملة وتطوير استراتيجيات فعالة لتطبيق هذه التقنية في مشاريع الطرق بشكل أوسع.

1. الخصائص الفيزيائية: دراسات أن الاسفلت الرغوي تتميز بخصائص فيزيائية متفوقة، مثل مقاومته للتشققات والتصوير، مما يشكل خيارا مثاليا في ظروف التخطيط. وقد توصل العلماء إلى أن النتيجة النهائية للرغوي يمكن أن تصل إلى 20% مقارنة بالأسفلت التقليدية.

2. الأداء تحت الضغط: دراسات علمية أن الاسفلت الرغوي في الأداء من الأداء تحت الأحمال الثقيلة، حيث تم قياس التحميل في عدة طرق علمية، مما أظهر عدم القدرة على التراجع عن الرغوي على تحمل أعلى من تلك التي تقدم الخلطات التقليدية.

3. الأثر البيئي للكربون: أشارت دراسة أخرى إلى أن استخدام الاسفلت الرغوي حدد من استهلاك الطاقة في عمليات الإنتاج بنسبة تصل إلى 40%، مما يحدد من الانبعاثات. كما تشمل استخدام مواد معاد استهلاكها، مما يجعل الاستدامة.

4. دراسات الحالة الأمريكية: تم إجراء دراسات حالة في عدة دول، مثل الولايات المتحدة وأوروبا، حيث تم استخدام الأسفلت الرغوي في طرق العلوم الرئيسية. ويهدف إلى النتائج في أداء عملية الإنقاذ والحاجة للصيانة على مدار الزمن.

5. تحليل التكلفة: المقارنة بين التكاليف النهائية الرغوي والأسفلت الأصلي أن تكاليف الصيانة أقل في الرغوي، مما يعني دلالة على المدى الطويل، بالرغم من التكاليف الأولية لعملية الإنتاج.

6. التحديات التطبيقية: هناك بعض الأبحاث تواجه تحديات فيما يتعلق بنقصها القياسي لاستخدامها مع الرغوي، مما يتطلب قراءة من البحث الرئيسي، بما في ذلك الجودة والمنتج دائما في ظروف مختلفة.

7. تأثير على الرطوبة: يعد الدراسات أن الاسفلت الرغوي يعرف من خلطات الاسفلت للرطوبة، مما يؤدي إلى تحسين الأداء في الظروف المناخية الرطبة، وهذا نتيجة كبيرة في المناطق ذات المناخ المتغير. وتؤكد هذه الدراسات على الفوائد الصحية لاستخدام حاسوبي الشامل، ولكنها تشير أيضاً إلى ضرورة قراءة الأبحاث العلمية وإرشادات تطبيقاته في مشاريع الشفاء بشكل واسع.

1.4 مزايا استخدام البيتومين الرغوي:

يُقدم البيتومين الرغوي مزايا عديدة مقارنةً بالإسفلت التقليدي. هذه المزايا تجعله الخيار الأمثل لمشاريع بناء وإعادة تأهيل الطرق الحديثة:

1- تحسين قابلية التشغيل: تجعل عملية الرغوة البيتومين أكثر قابلية للتشغيل في درجات حرارة منخفضة، مما يسهل عملية الخلط والضغط.

2- فعّال من حيث التكلفة: إن استخدام البيتومين الرغوي يمكن أن يقلل من تكاليف البناء بسبب انخفاض متطلبات الطاقة والقدرة على استخدام المواد المعاد تدويرها.

3- الفوائد البيئية: يتطلب إنتاج البيتومين الرغوي تسخينًا أقل، مما يُقلل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. كما يُتيح استخدام رصف الأسفلت المُعاد تدويره (RAP)، مما يُعزز إعادة التدوير.

4- الأداء المعزز: تتميز الطرق المبنية باستخدام البيتومين الرغوي بمقاومة أفضل للتشوه والتشقق، مما يؤدي إلى عمر خدمة أطول.

5- محتوى رابط منخفض: تسمح عملية الرغوة بمحتوى رابط أقل مع الحفاظ على خصائص الأداء أو تحسينها.

2.4 تطبيقات البيتومين الرغوي:

يعتبر البيتومين الرغوي متعدد الاستخدامات ويمكن استخدامه في تطبيقات مختلفة، بما في ذلك:

إعادة تأهيل الرصيف: مثالي لمشاريع إعادة التدوير الباردة في الموقع (CIR) واستصلاح العمق الكامل (FDR) .

البناء الجديد: مناسب للطبقات الأساسية والأساسية في بناء الطرق الجديدة.

تثبيت المواد الهامشية: يمكن استخدامها لتثبيت التجمعات والتربة الهامشية، وتعزيز خصائصها البنيوية.

3.4 التحليل المقارن:

الجدول رقم 1: التحليل المقارن.

الأسفلت التقليدي	البيتومين الرغوي	الميزة
أعلى (160-180 درجة مئوية)	أقل (100-120 درجة مئوية)	درجة حرارة الإنتاج
يتطلب درجات حرارة أعلى	أفضل في درجات الحرارة المنخفضة	قابلية العمل
انبعاثات أعلى، إعادة تدوير أقل	انخفاض الانبعاثات، المزيد من إعادة التدوير	التأثير البيئي
اعلى	أدنى	التكلفة
المتانة القياسية	متانة محسنة	الاداء

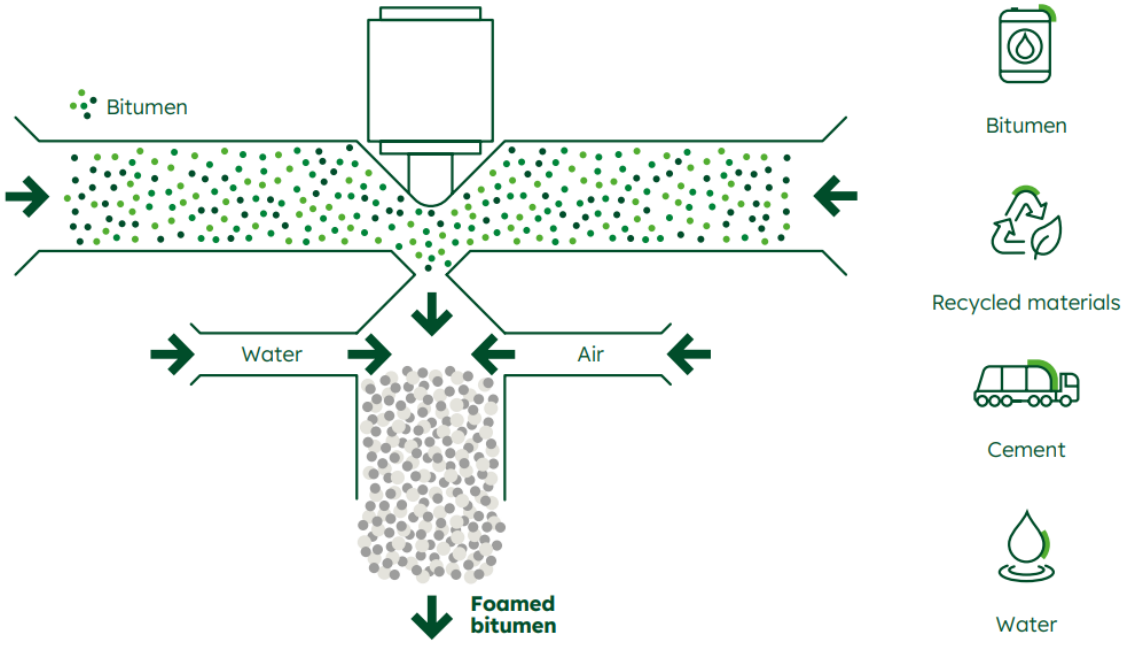
4.4: التحليل المقارن لطبقات الرصف:

الجدول رقم 2: ولتوضيح تأثير البيتومين الرغوي على جودة بناء الطرق، ننظر إلى التحليل المقارن التالي لطبقات الرصف.

رصف الأسفلت التقليدي	رصف البيتومين الرغوي	نوع الطبقة
المرونة والمتانة القياسية	مرونة ومتانة محسنة	الطبقة السطحية
قوة قياسية، مقاومة أقل للرطوبة	قوي ومقاوم للرطوبة	الطبقة الأساسية
الضغط والاستقرار القياسي	تحسين الضغط والاستقرار	الطبقة الأساسية الفرعية
يقتصر على المعالجات السطحية	فعالة في CIR وFDR	إعادة التأهيل

تظهر البحوث العلمية السابقة أن استخدام الأسفلت الرغوي في الخلطات الإسفلتية يقدم تحسينات ملحوظة في الخصائص الفنية والبيئية. فمن الناحية الفنية، تساهم هذه التقنية في تحسين مرونة الخلطات وقدرتها على تحمل الأحمال المرورية الثقيلة، كما تزيد من مقاومة الطرق للتشققات والتآكل، وتعزز التماسك بين مكونات الخلطة. وقد أظهرت الدراسات أن قوة الأسفلت الرغوي تزداد مع زيادة محتوى المواد الناعمة، وأن معاملات المرونة لخلطات الأسفلت الرغوي تتفوق على خلطات الأسفلت الساخن المكافئة في درجات الحرارة العالية (MDPI, 2022). بالإضافة إلى ذلك، يمكن إنشاء طبقات الأسفلت الرغوي حتى في الظروف الجوية المعاكسة، مما يقلل من حساسية الرطوبة للمواد الحبيبية. كما أن الأسفلت الرغوي يزيد من قوة القص ويقلل من حساسية الرطوبة للمواد الحبيبية. من الناحية البيئية، توصلت الدراسات إلى أن استخدام الأسفلت الرغوي يقلل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري أثناء عمليات الإنتاج، حيث يتم إنتاجه عند درجات حرارة منخفضة مقارنة بالأسفلت التقليدي. كما يعزز الأسفلت الرغوي من إعادة تدوير المواد، مما يقلل من الحاجة للمواد الخام الجديدة ويحد من النفايات، مما يساهم في خفض البصمة الكربونية لمشاريع الطرق. وقد أظهرت بعض الدراسات أن استخدام الأسفلت الرغوي يمكن أن يقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تصل إلى 30٪ مقارنة بإنتاج الأسفلت التقليدي، بالإضافة إلى ذلك، يقلل استخدام الأسفلت الرغوي من استهلاك الطاقة في عمليات الإنتاج والتطبيق، مما يساهم في خفض البصمة الكربونية لمشاريع الطرق (PetroNaft Petroleum Products, 2024). مع ذلك تشير الأبحاث إلى أن هناك بعض التحديات التي يجب التعامل معها، مثل نقص المعايير القياسية التي تنظم استخدام الأسفلت الرغوي، مما يؤدي إلى تباين في جودة المنتجات، والحاجة إلى مزيد من التجارب الميدانية للحصول على بيانات موثوقة حول الأداء في ظروف مختلفة (ResearchGate, 2015). بعض الباحثين حددوا أن مواد قاعدة الأسفلت الرغوي تكون عرضة للرطوبة، خاصة قبل إنشاء طبقة الأسفلت الخرساني .الأسفلت الرغوي هو تقنية حديثة تستخدم في صناعة الطرق، حيث يتم خلط البيتومين الساخن مع الهواء، مما ينتج عنه مادة خفيفة ومرنة. يمتاز الأسفلت الرغوي بعدة خصائص فنية تجعله خيارًا مفضلًا في خلطات إعادة التدوير مقارنة بالأسفلت التقليدي. أولاً، يتمتع بمرونة عالية تساعده على التكيف مع التغيرات في درجات الحرارة والأحمال المرورية، مما يقلل من فرص التشققات والتآكل. كما أن مقاومته للتآكل تفوق تلك الموجودة في الأسفلت التقليدي، مما يعزز من عمر الخدمة للطرق. عندما يتعلق الأمر بالأداء في خلطات إعادة التدوير، يوفر الأسفلت الرغوي كفاءة اقتصادية من خلال تقليل تكاليف المواد الجديدة، مما يجعله خيارًا جذابًا على المدى الطويل. بالإضافة إلى ذلك، يدعم استخدامه إعادة تدوير المواد، مما يقلل من الحاجة للموارد الخام الجديدة ويحد من النفايات، وبالتالي يساهم في تقليل البصمة الكربونية لمشاريع الطرق. عند مقارنة الأسفلت الرغوي بالأسفلت التقليدي، يتضح أن الأسفلت الرغوي يقدم أداءً أفضل تحت الأحمال الثقيلة، مما يجعله مناسبًا للاستخدام في الطرق السريعة والمناطق ذات الحركة المرورية العالية. ورغم أن تكاليف الإنتاج الأولية للأسفلت الرغوي قد تكون أعلى، فإن الفوائد الناتجة عن تقليل تكاليف الصيانة وزيادة عمر الخدمة تجعل منه خيارًا مفضلًا. يُعتبر الأسفلت الرغوي خيارًا مبتكرًا وفعالًا لتحسين أداء خلطات إعادة التدوير، ويعكس التزام صناعة الطرق بالاستدامة والتقنيات الحديثة (Vahit Ilhan.(June 4, 2024) Foamed Bitumen.petronaft) استخدام الأسفلت الرغوي في صناعة الطرق يمثل خطوة هامة نحو تحقيق الاستدامة البيئية، حيث يوفر عدة فوائد تتعلق بتقليل الانبعاثات واستهلاك الموارد. تتمثل إحدى الفوائد الرئيسية في تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، إذ يتم إنتاج الأسفلت الرغوي عند درجات حرارة منخفضة مقارنة بالأسفلت التقليدي، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة وغازات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن عمليات الإنتاج. تشير الدراسات إلى أن استخدام الأسفلت الرغوي يمكن أن يقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تصل إلى 30٪. بالإضافة إلى ذلك، يعزز الأسفلت الرغوي إعادة تدوير المواد، حيث يمكن دمج كميات أكبر من المواد المعاد تدويرها في الخلطات الإسفلتية دون التأثير على الأداء. هذا يقلل من الحاجة للموارد الخام الجديدة، مما يساعد على الحفاظ على الموارد الطبيعية

ويحد من النفايات. علاوة على ذلك، يسهم استخدام الأسفلت الرغوي في تقليل استهلاك المياه والموارد الأخرى خلال عملية الإنتاج، مما يعكس التزام الصناعة بالتحول نحو ممارسات أكثر استدامة. باستخدام الأسفلت الرغوي، يمكن للمشاريع أن تحقق نتائج بيئية إيجابية، مما يعزز من كفاءة الموارد ويقلل من الأثر البيئي السلبي لصناعة الطرق. يمثل الأسفلت الرغوي خيارًا مبتكرًا يسهم في تحقيق أهداف الاستدامة البيئية، من خلال تقليل الانبعاثات واستهلاك الموارد.
(https://www.heidelbergmaterials.co.uk/en/products/asphalt/evobuild-foamed-asphalt)



الشكل 2 حقن الماء والهواء في البيتومين الساخن تحت ضغط عالٍ.

رغم الفوائد العديدة للأسفلت الرغوي، إلا أن هناك عدة عوامل تعيق استخدامه على نطاق واسع في صناعة الطرق. يُعتبر نقص المعايير القياسية من أبرز التحديات، حيث تفتقر العديد من الدول إلى إرشادات واضحة ومحددة بشأن استخدام الأسفلت الرغوي، مما يؤدي إلى تباين في جودة المنتجات وأدائها. هذا النقص في المعايير قد يثير مخاوف حول سلامة الطرق وموثوقيتها. كما تواجه التكنولوجيا المتاحة بعض القيود، حيث لا تتوفر في بعض المناطق المعدات اللازمة لإنتاج الأسفلت الرغوي بكفاءة. قد تحتاج التقنيات المستخدمة إلى تحديثات أو تحسينات لتلبية متطلبات الأداء الحديثة. أيضًا يتطلب الأمر تدريبًا متخصصًا للعمال والفنيين لضمان استخدام الأسفلت الرغوي بشكل صحيح وفعال، مما قد يمثل عائقًا في بعض الدول التي تفتقر إلى الكفاءات الفنية اللازمة. قد تكون التكلفة الأولية للإنتاج مرتفعة مقارنة بالأسفلت التقليدي، مما يجعل بعض الجهات المالكة للمشاريع hesitate في اعتماد هذه التقنية. كل هذه العوامل تسهم في إبطاء انتشار استخدام الأسفلت الرغوي، رغم إمكانياته الكبيرة في تحسين الأداء البيئي والاقتصادي لصناعة الطرق.(CSIR TRANSPORTEK.1999).
لتعزيز استخدام الأسفلت الرغوي في مشاريع الطرق، يمكن اتباع عدة استراتيجيات وحلول عملية. من الضروري تطوير معايير وإرشادات واضحة خاصة بالأسفلت الرغوي، تشمل تفاصيل عن تصميم الخلطات، وطرق الإنتاج، واختبارات الأداء. يمكن أن تسهم هذه المعايير في تحقيق مستوى عالٍ من الجودة والسلامة، مما يزيد من ثقة الجهات المالكة للمشاريع في استخدام هذه التقنية. يجب تشجيع البحث والتطوير في مجال تكنولوجيا الأسفلت الرغوي. يمكن دعم الجامعات ومراكز البحث لتطوير تقنيات جديدة وتحسين العمليات الحالية، مما يسهل استخدام الأسفلت الرغوي في ظروف مختلفة. ينبغي توفير التدريب المناسب للعمال والفنيين، مما يضمن أن يكون لديهم المعرفة اللازمة للتعامل مع الأسفلت الرغوي بشكل فعال. يمكن تنظيم ورش عمل ودورات تدريبية لتعريفهم بأفضل الممارسات والتقنيات الحديثة. من المهم تقديم حوافز مالية للجهات المالكة للمشاريع لتشجيع اعتماد الأسفلت الرغوي، مثل تخفيضات ضريبية أو دعم مالي لتكاليف الإنتاج الأولية. من خلال هذه الاستراتيجيات، يمكن تعزيز استخدام الأسفلت الرغوي بشكل فعال، مما يسهم في تحسين الأداء البيئي والاقتصادي لصناعة الطرق.https://www.wirtgen-group.com/en-ug/products/wirtgen/technologies/recycling-and-soil-stabilisation/foamed-bitumen/ دراسة التكاليف المرتبطة باستخدام الأسفلت الرغوي مقارنة بالخيارات التقليدية أمرًا حيويًا لفهم جدوى هذه التقنية. في البداية، يمكن أن تكون التكاليف الأولية لإنتاج الأسفلت الرغوي أعلى قليلاً من تلك الخاصة بالأسفلت التقليدي، بسبب الحاجة إلى معدات متخصصة وعمليات إنتاج دقيقة. ومع ذلك، يتطلب الأسفلت الرغوي درجات حرارة أقل أثناء الإنتاج، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة وتقليل انبعاثات الكربون، وهو ما يمكن أن

ينعكس بشكل إيجابي على التكاليف التشغيلية على المدى الطويل. عند تقييم العوائد المحتملة على الاستثمار، يجب أخذ عدة عوامل في الاعتبار. أولاً، يتمتع الأسفلت الرغوي بمرونة عالية تعزز من عمر الخدمة، مما يقلل من الحاجة إلى الصيانة المتكررة والإصلاحات. هذا يعني توفيرًا في التكاليف على المدى الطويل. بالإضافة إلى ذلك، يدعم الأسفلت الرغوي إعادة تدوير المواد، مما يقلل من الحاجة إلى المواد الخام الجديدة وبالتالي تقليل التكاليف المرتبطة بالاستخراج والمعالجة. تظهر الدراسات أن العوائد على الاستثمار في استخدام الأسفلت الرغوي يمكن أن تكون إيجابية، حيث تشير التقديرات إلى إمكانية تحقيق وفورات تصل إلى 15-50% في تكاليف الصيانة على مدى عمر المشروع. لذا، بالرغم من التكاليف الأولية، فإن الفوائد الاقتصادية والبيئية طويلة الأجل تجعل من الأسفلت الرغوي خيارًا جذابًا ومربحًا لمشاريع الطرق المستدامة. Greg . Udelhofen (Dec 31, 2008)

5- الاستنتاجات:

1. **تحسين الخصائص الفني:** يظهر أن الأسفلت الرغوي يُحسّن من مرونة الخلطات وقدرتها على تحمل الأحمال المرورية الثقيلة، كما يزيد من مقاومة الطرق للتشققات والتآكل، مما يعزز التماسك بين مكونات الخلطة.
2. **زيادة القوة:** أظهرت الدراسات أن قوة الأسفلت الرغوي تزداد مع زيادة محتوى المواد الناعمة، وأنه يتفوق على الخلطات التقليدية في درجات الحرارة العالية.
3. **الاستدامة البيئية:** يُقلل استخدام الأسفلت الرغوي من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بنسبة تصل إلى 30% مقارنة بالإنتاج التقليدي، ويخفض استهلاك الطاقة في عمليات الإنتاج بنسبة تصل إلى 40%.
4. **إعادة التدوير:** يُعزز الأسفلت الرغوي من إعادة تدوير المواد، مما يقلل من الحاجة للمواد الخام الجديدة ويحد من النفايات، مما يُساهم في خفض البصمة الكربونية لمشاريع الطرق.
5. **تحديات التطبيق:** يُواجه استخدام الأسفلت الرغوي تحديات تتعلق بنقص المعايير القياسية، مما يؤدي إلى تباين في جودة المنتجات. كما تتطلب التطبيقات مزيدًا من التجارب الميدانية للحصول على بيانات موثوقة حول الأداء.
6. **تحليل التكلفة:** على الرغم من ارتفاع التكاليف الأولية للإنتاج، فإن الفوائد الاقتصادية طويلة الأجل، مثل تقليل تكاليف الصيانة، تجعل الأسفلت الرغوي خيارًا جذابًا لمشاريع الطرق المستدامة.
7. **تطبيقات متعددة:** يُستخدم الأسفلت الرغوي في تطبيقات متنوعة مثل إعادة تأهيل الرصيف والبناء الجديد، مما يجعله خيارًا مرنًا وفعالًا.
8. **التحسينات في الأداء:** يُظهر الأسفلت الرغوي أداءً أفضل تحت الأحمال الثقيلة، مما يجعله مناسبًا للاستخدام في الطرق السريعة والمناطق ذات الحركة المرورية العالية.
9. **التدريب والدعم:** يُعد توفير التدريب المناسب للعمال والفنيين أمرًا ضروريًا لضمان الاستخدام الفعال للأسفلت الرغوي، وتقديم حوافز مالية يمكن أن يشجع الجهات المالكة على اعتماده.

6- المناقشة:

تعتبر تقنية الأسفلت الرغوي خيارًا مبتكرًا في صناعة الطرق، حيث تقدم مزايا متعددة تجعلها مهمة في تحسين جودة الطرق واستدامتها. تشير الدراسات إلى أن الأسفلت الرغوي يُعزز من مرونة الخلطات وقدرتها على تحمل الأحمال الثقيلة، مما يزيد من مقاومة الطرق للتشققات والتآكل (Saleh & Gáspár, 2021). هذه الخصائص تجعل الأسفلت الرغوي خيارًا مثاليًا في مشاريع إعادة التأهيل والبناء الجديد. من الناحية البيئية، يُقلل استخدام الأسفلت الرغوي من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، حيث يُنتج عند درجات حرارة منخفضة مقارنة بالأسفلت التقليدي، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة (Ilhan, 2024). كما يُعزز الأسفلت الرغوي من إعادة تدوير المواد، مما يقلل من الحاجة للمواد الخام الجديدة ويحد من النفايات، وبالتالي يساهم في خفض البصمة الكربونية لمشاريع الطرق (PetroNaft, 2024). مع ذلك، يُواجه استخدام الأسفلت الرغوي تحديات تتعلق بنقص المعايير القياسية، مما قد يؤدي إلى تباين في جودة المنتجات (ResearchGate, 2015). كما تتطلب التطبيقات العملية مزيدًا من التجارب الميدانية للحصول على بيانات موثوقة حول الأداء في ظروف مختلفة، مما يشير إلى ضرورة إجراء المزيد من الدراسات لتأكيد الفوائد المحتملة (CSIR TRANSPORTEK, 1999). دراسة الحالة على الطريق السريع 166 تُظهر كيف أن الأسفلت الرغوي يُقلل من تكاليف البناء ويُسرع من عملية التنفيذ، مما يعكس فعاليته كحل مستدام (Udelhofen, 2008). كما أن الابتكارات في تكنولوجيا الأسفلت الرغوي، مثل استخدام مواد معاد تدويرها، تُعزز من استدامته وتُقلل من الأثر البيئي (MDPI, 2022). ومن هذه المناقشات، يُعتبر الأسفلت الرغوي تقنية واعدة تتطلب مزيدًا من البحث والتطوير لتوسيع نطاق استخدامها وتحقيق أقصى استفادة منها في مشاريع الطرق الحديثة.

تُظهر الأبحاث أن الأسفلت الرغوي يمكن أن يُحسن من كفاءة استخدام الموارد في مشاريع الطرق، حيث يُسهم في تقليل الاعتماد على المواد الجديدة. هذا يعكس التوجه نحو الاقتصاد الدائري، الذي يُعتبر ضروريًا في مواجهة التحديات البيئية الحالية. كما ان الأسفلت الرغوي يُظهر قدرة ممتازة على التكيف مع الظروف المناخية المتغيرة، مما يجعله مناسبًا لمجموعة واسعة من التطبيقات، بما في ذلك المناطق ذات الحركة المرورية العالية. استخدامه في إعادة تأهيل الطرق يُعتبر خيارًا فعالًا من حيث التكلفة، حيث يتم تقليل فترات الإغلاق المروري، مما يُخفف من تأثيرات الازدحام على المستخدمين. التحديات المتعلقة بالمعايير القياسية تُعتبر عائقًا أمام الاعتماد الواسع للأسفلت الرغوي، حيث قد يؤدي عدم وجود إرشادات واضحة

إلى تباين في الجودة. لذا، فإن تطوير معايير موحدة يُعد أمرًا حيويًا لتسهيل تطبيق هذه التقنية. هناك أيضًا حاجة ملحة لتوفير التدريب والتوجيه الفني للعمال والفنيين، مما يسهم في تحسين جودة التنفيذ. تكامل تكنولوجيا الأسفلت الرغوي مع أساليب البناء المستدامة الأخرى، مثل تقنيات الخلط البارد، يُعزز من فعاليته ويزيد من اعتمادية المنتج النهائي. تشير النتائج إلى أن الأسفلت الرغوي يمثل خطوة نحو المستقبل في صناعة الطرق، حيث يجمع بين الأداء الممتاز والفوائد البيئية والاقتصادية. إن اعتماد هذه التقنية على نطاق أوسع سيُساعد في تحقيق أهداف الاستدامة والبناء المستدام.

7- التوصيات:

1- تطوير معايير واضحة: من الضروري إنشاء معايير وإرشادات واضحة لتنظيم استخدام الأسفلت الرغوي، تشمل تفاصيل تصميم الخلطات، وطرق الإنتاج، واختبارات الأداء. هذا سيساهم في تحسين جودة المنتجات وزيادة الثقة في هذه التقنية.

2- تعزيز البحث والتطوير: يجب دعم الجامعات ومراكز البحث في تطوير تقنيات جديدة لتحسين عمليات إنتاج الأسفلت الرغوي، مما يسهل استخدامه في ظروف مختلفة ويعزز فعاليته.

3- توفير التدريب المناسب: ينبغي تنظيم ورش عمل ودورات تدريبية للعمال والفنيين لتزويدهم بالمعرفة اللازمة للتعامل مع الأسفلت الرغوي بشكل فعال، مما يضمن جودة التنفيذ.

4- تحفيز الجهات المالكة للمشاريع: من المهم تقديم حوافز مالية، مثل تخفيضات ضريبية أو دعم مالي لتكاليف الإنتاج الأولية، لتشجيع اعتماد الأسفلت الرغوي في مشاريع الطرق.

5- تنفيذ تجارب ميدانية: يجب إجراء مزيد من التجارب الميدانية للحصول على بيانات موثوقة حول أداء الأسفلت الرغوي في ظروف مختلفة، مما يساعد على التأكيد على فوائده وتطوير استراتيجيات فعالة لتطبيقه.

6- تحقيق التنسيق بين الجهات المعنية: ينبغي تعزيز التعاون بين الجهات الحكومية، وشركات المقاولات، والباحثين لضمان تبادل المعرفة والخبرات في استخدام الأسفلت الرغوي.

7- توعية المجتمع: من المهم رفع الوعي بفوائد الأسفلت الرغوي وأثره الإيجابي على البيئة، مما يشجع على تبني هذه التقنية في مشاريع البنية التحتية.

الخاتمة

تحسين الخصائص الفنية والبيئية، يُساهم الأسفلت الرغوي في تعزيز مرونة الخلطات وقدرتها على تحمل الأحمال الثقيلة، مما يجعله خيارًا مثاليًا في إعادة التأهيل والبناء الجديد. تتجلى الفوائد البيئية من خلال تقليل انبعاثات الكربون وتعزيز إعادة تدوير المواد، مما يساهم في تقليل البصمة الكربونية لمشاريع الطرق. ومع ذلك، يجب معالجة التحديات المرتبطة بنقص المعايير القياسية والتدريب المتخصص لضمان الاستخدام الفعال لهذه التقنية. إن تبني الأسفلت الرغوي يتطلب تعاونًا وتنسيقًا بين جميع الجهات المعنية، بدءًا من الحكومة وصولًا إلى شركات المقاولات والباحثين. من خلال تنفيذ التوصيات المقترحة، يمكن تعزيز استخدام الأسفلت الرغوي بشكل أكبر، مما يسهم في تحقيق أهداف الاستدامة البيئية والاقتصادية في صناعة الطرق.

المراجع

1- A. Saleh1, L. Gáspár.(16/03 /2021). Advantages and limitations of using foamed bitumen. ATJ.ActaTechnicaJaurinensis page 1. file:///C:/Users/PH/Downloads/14_3_6_587%20(1).pdf

)Vahit Ilhan.(June 4, 2024) Foamed Bitumen.petronaft 2-(https://www.petronaftco.com/foamed-bitumen/#how-foamed-bitumen-improves-road-construction-quality

4- MDPI (2022). "Structural Performance of Foamed Asphalt Base in a Full Depth Reclaimed and Sustainable Pavement." (https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3622)

4- Petroleum Products (2024). "Foamed Bitumen: Environmental Impact and Benefits." [PetroNaft](https://www.petronaftco.com/foamed-bitumen).

5- ResearchGate (2015). "Challenges in Using Foamed Asphalt." [ResearchGate](https://www.researchgate.net).

6- CSIR TRANSPORTEK(June.1999). Foamed Asphalt Mixes.Mix Design Procedure.https://www.viastrade.it/letteratura/bitume/MUTHEN%20MIX%20DESIGN.pdf

7- Greg Udelhofen (Dec 31, 2008).Foamed asphalt provides cost-effective solution on Hwy. 166 project.forconstructionpros. https://www.forconstructionpros.com/pavement-maintenance/maintenance/seal-coating/article/10117274/foamed-asphalt-provides-costeffective-solution-on-hwy-166-project

8- https://www.heidelbergmaterials.co.uk/en/products/asphalt/evobuild-foamed-asphalt

9- https://www.wirtgen-group.com/en-ug/products/wirtgen/technologies/recycling-and-soil-stabilisation/foamed-bitumen/