







RESEARCH ARTICLE

ROAD AND HIGHWAY ENGINEERING

Using Marble Dust from the Wadi Al-Shati Area as a Filler Material in Hot Asphalt Mixtures

Basel G. Younes^{1,*}  , Manssour Bin Miskeen²  , Masoud Fekroun¹  

¹Civil Engineering Development, Engineering Faculty, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

²Architecture and Urban Planning Engineering Department, Engineering Faculty, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

ARTICLE HISTORY

Received 16 February 2026

Revised 08 April 2026

Accepted 15 April 2026

Online 21 April 2026

KEYWORDS

Marble dust;
Asphalt mixtures;
Industrial waste recycling;
Highway engineering;
Marble quarry waste.

ABSTRACT

Urban expansion and industrial activities are associated with a significant increase in solid waste generation, which has become an environmental concern due to the difficulty of safe disposal and the high cost of treatment. Consequently, many studies have focused on reusing these wastes in various engineering applications, particularly in road construction. This study aims to evaluate the feasibility of using marble dust as a substitute for conventional filler in hot mix asphalt and to investigate its effect on the properties of the mixture in southern Libya. The reference mix was prepared after conducting the necessary tests on the mixture components and determining the optimum bitumen content. The conventional mineral filler content was 5.15% of the total weight of aggregates used in the asphalt mixture. The filler was then replaced with marble dust at different percentages of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% by weight. The results showed that the incorporation of marble dust had a positive effect on most asphalt mixture properties, as it increased density and stability while reducing air voids, with VMA values remaining within acceptable limits. It was also observed that higher replacement ratios (75%–100%) provided the best performance in terms of the balance between stiffness and flexibility. Furthermore, the findings indicated that marble dust can effectively function as a filler material without negatively affecting the performance of the asphalt mixture. It contributed to improved resistance to permanent deformation, reduced permeability, and enhanced internal cohesion, making it suitable for use in the hot and dry conditions of southern Libya. Based on these findings, it is recommended to adopt marble dust replacement ratios ranging from 75% to 100% as a substitute for conventional filler to achieve improved structural and economic performance of asphalt mixtures.

استخدام غباررخام منطقة وادي الشاطئ كمادة مألثة في الخلطات الإسفلتية الساخنة

باسل غالب يونس^{1,*}، منصور بن مسكين²، مسعود فكرون¹

الكلمات المفتاحية

غبار الرخام
خلطات الأسفلت
إعادة تدوير النفايات الصناعية
هندسة الطرق السريعة
نفايات محاجر الرخام

المخلص

يرتبط التوسع العمراني والنشاط الصناعي بزيادة كبيرة في كميات المخلفات الصلبة، والتي أصبحت تمثل مشكلة بيئية نتيجة صعوبة التخلص الآمن منها وارتفاع تكاليف معالجتها. لذلك اتجهت العديد من الدراسات إلى إعادة استخدام هذه المخلفات في مجالات هندسية مختلفة، وخاصة في مجال إنشاء الطرق. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية استخدام غبار الرخام كبديل للمادة المألثة التقليدية في الخلطات الإسفلتية الساخنة، ودراسة تأثيره على خصائص الخلطة في الجنوب الليبي. تم إعداد الخلطة المرجعية بعد إجراء الفحوصات اللازمة لمكونات الخلطة وتحديد نسبة البيتومين المثلى حيث كانت نسبة المادة المألثة المعدنية (5.15%) من الوزن الكلي للركام المستخدم بالخلطة الإسفلتية. ثم تم استبدال المادة المألثة بغبار الرخام بنسب مختلفة (0%، 25%، 50%، 75%، 100%). أظهرت النتائج أن إضافة غبار الرخام كان لها تأثير إيجابي على معظم خصائص الخلطة الإسفلتية، حيث زادت الكثافة والثبات، وانخفضت الفراغات الهوائية مع بقاء قيم VMA ضمن الحدود المسموح بها. كما تبين أن نسب الاستبدال العالية (75%–100%) أعطت أفضل أداء من حيث التوازن بين الصلابة والمرونة. كما أوضحت النتائج أن غبار الرخام يمكن أن يعمل كبديل فعال للمادة المألثة التقليدية دون التأثير سلباً على أداء الخلطة، بل ساهم في تحسين مقاومة التشوهات وتقليل النفاذية وزيادة التماسك الداخلي، مما يجعله مناسباً للاستخدام في مناطق الجنوب الليبي. وبناءً على ذلك، توصي الدراسة بإمكانية اعتماد نسب استبدال تتراوح بين 75% و100% من غبار الرخام كبديل للمادة المألثة التقليدية للحصول على أداء أفضل للخلطات الإسفلتية من الناحية الإنشائية والاقتصادية.

دولة، إذ تمثل الشريان الرئيس الذي يربط المدن والمناطق ويسهل حركة

الأفراد والبضائع. وتعتمد كفاءة هذه الشبكة على جودة الطبقات الإنشائية

المقدمة

تعد شبكة الطرق من أهم مؤشرات التنمية العمرانية والاقتصادية في أي

*Corresponding author

https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_41

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).



البناء المختلفة) في مشاريع البنية التحتية.

كما يمكن أن تُسهم نتائجه في تقديم حلول عملية لمشكلات الطرق في المناطق ذات المناخ الحار التي تتأثر فيها الخلطات الإسفلتية بالتلدين والتشوه. مما يعكس على عمر الطريق الافتراضي وجودة الخدمة المقدمة للمستخدمين. ان إضافة المادة المألثة الى الخلطات الاسفلتية يعمل على تقليل الفراغات وزيادة التماسك بين مكونات البيتومين الساخن مما يؤخر في عملية تبخر المادة الراتنجية داخل الخلطة الاسفلتية وبالتالي الحفاظ عليه لزمان أطول ينتج ذلك بفعل التماسك الذي يحدث بين المادة المألثة والمخلوط الاسفلتي.

شهدت السنوات الأخيرة اهتماماً متزايداً في الأوساط الأكاديمية والهندسية بالبحث عن مواد بديلة مستدامة لتحسين أداء الخلطات الإسفلتية وتقليل الاعتماد على المواد التقليدية، ومن أبرز هذه المواد غبار الرخام الناتج عن عمليات قطع وصقل الأحجار في مصانع الرخام والجرانيت. يعد هذا الغبار من المخلفات الصلبة ذات التأثير البيئي السلبي، نظراً لصعوبة التخلص منه، مما جعل الاستفادة منه في الخلطات الإسفلتية تمثل توجهاً بيئياً واقتصادياً واعداً.

تُعدّ الدراسات السابقة من الركائز الأساسية في البحوث العلمية والهندسية، إذ تسهم في تكوين خلفية معرفية متكاملة حول موضوع البحث، وتساعد الباحث على فهم التطورات العلمية السابقة، وتحليل النتائج التي توصلت إليها الدراسات المختلفة، فضلاً عن تحديد الفجوة البحثية التي لم يتم تناولها بشكل كافٍ. وفي مجال هندسة الطرق، تكتسب الدراسات السابقة أهمية خاصة نظراً لتعدد المتغيرات المؤثرة في أداء الخلطات الإسفلتية، سواء من حيث نوع المواد المستخدمة أو الظروف المناخية وأحمال المرور [12-16].

ومن هذا المنطلق، ركزت الدراسات السابقة على تقييم تأثير استخدام غبار الرخام كمادة المألثة معدنية على الخصائص الحجمية والميكانيكية للخلطات الإسفلتية، مثل ثبات مارشال، وقيم التدفق، ونسبة الفراغات الهوائية، ومقاومة الرطوبة والتشوه الدائم، إضافة إلى دراسة سلوك هذه الخلطات في الظروف المناخية المختلفة.

استخدام غبار الرخام كمادة المألثة في الخلطات الإسفلتية

أجريت عام (2005) واحدة من أوائل الدراسات التي تناولت استخدام غبار الرخام كمادة مألثة بديل في الخلطات الإسفلتية المصممة بطريقة مارشال، حيث تم استبدال المادة المألثة الجيرية بغبار الرخام بنسب مختلفة. وأظهرت النتائج زيادة ملحوظة في قيم ثبات مارشال مع تحسن في التماسك الداخلي للخلطة، بينما بقيت قيم التدفق ضمن الحدود المسموح بها حسب المواصفات القياسية. وأرجعت الدراسة هذا التحسن إلى نعومة حبيبات غبار الرخام وقدرته على تحسين المونة الإسفلتية [17].

وفي سنة (2016) تمت دراسة تأثير استبدال المادة المألثة الجيرية بغبار الرخام على الخصائص الميكانيكية للخلطات الإسفلتية، وأظهرت النتائج تحسناً في مقاومة الخلطة للتشوه الدائم وزيادة في التماسك الداخلي، مع توصية باستخدام غبار الرخام بنسبة استبدال معتدلة لتحقيق أفضل توازن بين الثبات والمرونة [18].

وفي السنة (2025) قدّم الباحثون مراجعة علمية شاملة تناولت الخصائص الفيزيائية والكيميائية لغبار الرخام، وأوضحوا أن محتواه العالي من كربونات

المكونة لها، وخصوصاً طبقة الخلطة الإسفلتية التي تتعرض بشكل مباشر لأحمال المرور والعوامل البيئية المختلفة [1,2]. من هذا المنطلق تولي الهندسة المدنية اهتماماً متزايداً بعمليات تصميم وتحسين الخلطات الإسفلتية لضمان أداء أفضل واستدامة أعلى للبنية التحتية [3]. إلا أن الخلطات الإسفلتية التقليدية تواجه عدة تحديات، منها ارتفاع درجات الحرارة في بعض المناطق، والتقدم المبكر نتيجة الأحمال الثقيلة، والتكلفة العالية لموادها الأساسية، فضلاً عن التأثير البيئي الناتج عن استخراج المواد الطبيعية مثل الركام والمادة المألثة المعدنية لذلك برزت في السنوات الأخيرة العديد من الاتجاهات البحثية التي تهدف إلى استخدام مواد بديلة أو مضافة لتحسين أداء الخلطة الإسفلتية وخفض كلفتها وتحقيق مفهوم الاستدامة البيئية [4,5].

من بين هذه المواد، يبرز غبار الرخام كناتج ثانوي من عمليات نشر وتلميع الرخام في المصانع والمحاجر. يُعتبر غبار الرخام من المخلفات الصناعية التي غالباً ما تُطرح في البيئة من دون معالجة، مما يؤدي إلى تلوث الهواء والمياه وتدهور التربة المحيطة بمناطق التصنيع [6,7]. ومع تزايد كميات هذا الغبار في بعض المناطق، أصبح من الضروري البحث عن سبل للاستفادة منه ضمن إطار إعادة التدوير والاستخدام المستدام للموارد.

يمتاز غبار الرخام بتركيب كيميائي غني بالمعادن المختلفة تبعاً لنوعية الرخام المستخرج وبنعومة عالية تجعله قريباً في خصائصه من المادة المألثة التقليدية المستخدمة عادةً في الخلطات الإسفلتية. هذه الخصائص تشير إلى إمكانية استخدام غبار الرخام كبديل جزئي أو كلي للمادة المألثة التقليدية، مما قد ينعكس إيجاباً على تماسك الخلطة وتحسين مقاومتها للتشوهات والثبات تحت الأحمال [8,9]. كما يمكن أن يسهم وجوده في تحسين التماسك بين البيتومين والركام عبر تقليل الفراغات الهوائية وزيادة نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين. إن فكرة إدخال غبار الرخام ضمن مكونات الخلطة الإسفلتية لا تقتصر على البعد التقني فحسب، بل تمتد لتشمل الأبعاد الاقتصادية والبيئية. فمن الناحية الاقتصادية، يسهم استبدال المادة المألثة التقليدية بغبار الرخام في تقليل تكلفة إنتاج الخلطات الإسفلتية، خاصة في المناطق التي يتوفر فيها الرخام كمصدر محلي [10]. أما من الناحية البيئية، فإن استخدام هذه المخلفات الصناعية يقلل من تلوث الهواء والمياه الناتج عن تراكم الغبار، ويساعد في تقليل كميات النفايات الصلبة المتولدة من مصانع الرخام [11].

لذلك يهدف البحث إلى دراسة تأثير إضافة غبار الرخام إلى الخلطات الإسفلتية الساخنة (H.M.A) كمادة مألثة بديلة، من خلال تحليل الخصائص المارشال (مثل الثبات والانسياب) والخواص الحجمية (مثل نسبة الفراغات الهوائية والفراغات المملوءة بالبيتومين والفراغات الكلية في الركام المعدني). كما يسعى البحث إلى تحديد النسبة الأفضل لإضافة غبار الرخام التي تحقق التوازن بين الثبات والمرونة والمتانة، بما يتوافق مع متطلبات المواصفات القياسية للطرق في المناخ الحار والجاف (الجنوب الليبي)

يكتسب هذا البحث أهميته من كونه يربط بين تحسين الأداء الهندسي للخلطة الإسفلتية وتحقيق الاستدامة البيئية من خلال استثمار نفايات الرخام، وهو ما ينسجم مع الاتجاهات الحديثة في مجال هندسة المواد والطرق التي تركز على إعادة التدوير لبعض المواد (الاسفلت، الرخام، مواد

الهندسية والفيزيائية بهدف ضمان جودة ومتانة الخلطة النهائية [23].

- التحليل المنخلي (Sieve Analysis): يهدف هذا الاختبار إلى تحديد توزيع أحجام جزيئات الركام والتأكد من مطابقتها للتدرج المطلوب حسب المواصفات القياسية ASTM C136 أو (AASHTO T27)، كما موضح في الشكل (1). يساعد التدرج الصحيح في تحقيق كثافة عالية وتقليل الفراغات الهوائية في الخلطة.



الشكل 1: التحليل المنخلي للركام

- الوزن النوعي والامتصاص: يُجرى هذا الاختبار لتحديد الكثافة الظاهرية والحقيقية ونسبة الامتصاص للركام، مما يساعد في حساب الكثافة الحجمية للخلطة الأسفلتي، كما موضح في الشكل (2). تُستخدم المواصفات ASTM C127 للركام الخشن و ASTM C128 للركام الناعم [24].



الشكل 2: اختبار الوزن النوعي والامتصاص للركام

- مقاومة التفتت (Los Angeles Abrasion Test): يهدف الاختبار إلى قياس مقاومة الركام للتآكل والتفتت الناتج عن الاحتكاك أثناء الخلط والرصيف وحركة المرور، الشكل (3) يوضح اختبار مقاومة الركام للتآكل والتفتت. يُجرى وفق المواصفة ASTM C131 أو CS35، ويُعد من أهم مؤشرات متانة الركام [25].
- شكل الحبيبات: يُستخدم لتحديد نسبة الحبيبات المسطحة والمملوطة التي قد تؤثر سلباً على قابلية الدمك ومتانة الخلطة. يُجرى الاختبار حسب المواصفة البريطانية BS 812:105.1 [26].

الكالسيوم (CaCO_3) يسهم في تحسين تعبئة الفراغات وزيادة صلابة الخلطة الإسفلتية، مع التأكيد على أهمية التحكم في نسب الإضافة لتفادي زيادة الهشاشة [19].

أظهرت دراسة حديثة [20] أن استخدام غبار الرخام كبديل جزئي للمادة المائنة في الخلطات الإسفلتية يؤدي إلى تحسين مقاومة التشوه الدائم (Rutting) تحت تأثير الأحمال المرورية المتكررة، حيث يسهم في زيادة صلابة واستقرار الخلطة وتقليل عمق التخدد مقارنة بالخلطات التقليدية. كما بينت النتائج أن هذا التحسن ينعكس إيجاباً على أداء الرصيف وزيادة عمره الخدمي من خلال تقليل معدل التدهور الناتج عن الأحمال ودرجات الحرارة المرتفعة.

أظهرت الدراسة [21] أن استخدام نفايات معامل الرخام كمادة مائنة في الخلطات الإسفلتية الحارة يؤدي إلى تحسين الأداء الميكانيكي للخلطة، حيث يساهم في زيادة مقاومة التشوه الدائم (Rutting) وتقليل ظهور التشققات تحت الأحمال المرورية المتكررة، وذلك نتيجة لتحسين تماسك المكونات وتقليل الفراغات الهوائية داخل الخلطة. كما أن هذا الاستخدام يعزز الاستدامة البيئية من خلال إعادة تدوير المخلفات الصناعية وتقليل الاعتماد على المواد الطبيعية التقليدية في أعمال الطرق.

في سنة (2005) أظهرت نتائج الدراسات التي تناولت استخدام غبار الرخام كمادة مائنة في الخلطات الإسفلتية أن هذا الإضافة تسهم بشكل ملحوظ في تحسين الأداء الميكانيكي طويل الأمد للخلطة، حيث تؤدي إلى زيادة مقاومة التشوهات الدائمة الناتجة عن الأحمال المرورية المتكررة، وتحسين سلوك الزحف (Creep) وتقليل معدلات التغير الدائم في الشكل تحت تأثير الإجهاد المستمر. كما بينت النتائج أن الخلطات المعدلة بغبار الرخام تمتلك قدرة أفضل على مقاومة فشل التعب (Fatigue Resistance) مقارنة بالخلطات التقليدية، مما يعكس إمكانية استخدامها في شبكات الطرق ذات الأحمال المرورية العالية دون تدهور سريع في الأداء [22].

خلاصة الدراسات السابقة

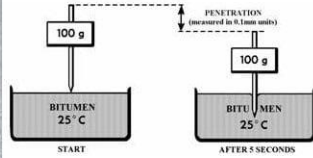
أظهرت الدراسات الموسعة أن غبار الرخام كمادة مائنة يحسن الخصائص الحجمية والميكانيكية للخلطات الإسفلتية، ويوفر بديلاً مناسباً للمادة المائنة التقليدية، خاصة في المناطق التي تتوافر فيها كميات كبيرة من المخلفات. اعتمد هذا البحث على هذه النتائج مع تقديم إضافة علمية جديدة من خلال دراسة تأثير غبار الرخام منطقة وادي الشاطئ كمادة مائنة في الخلطات الإسفلتية الساخنة وفق منهجية علمية تتلاءم مع الواقع المحلي.

المواد وطرق العمل

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تقييم إمكانية الاستفادة من غبار الرخام المتوفر في وسط وجنوب ليبيا كمثبت جزئي أو كلي في الخلطات الإسفلتية، بديلاً عن المواد المستوردة مرتفعة التكلفة. لذلك يهدف هذا الجزء إلى عرض الاختبارات المعمولة التي تم إجراؤها على المواد الداخلة في تركيب الخلطة الإسفلتية، وذلك لتحديد خصائصها الفيزيائية والميكانيكية ومدى مطابقتها للمواصفات القياسية المعتمدة. تشمل هذه المواد الركام الخشن والناعم، مادة المائنة، والبيتومين المستخدم كعامل رابط.

1. اختبارات الركام (Aggregate Tests)

يُعد الركام المكوّن الرئيس للخلطة الإسفلتية، إذ يشكّل ما نسبته (90%–95%) من وزن الخلطة. وتُجرى عليه مجموعة من الاختبارات لتحديد خواصه



الشكل 5: اختبار الاختراق للبيتومين



الشكل 3: اختبار مقاومة الركام للتآكل والتفتت

• اختبار نقطة الليونة (Softening Point): يُستخدم لتحديد درجة الحرارة التي يبدأ عندها البيتومين بفقدان تماسكه، باستخدام طريقة حلقة وكرة. (ASTM D36) [31].

• اختبار الوزن النوعي (Specific Gravity): يُقاس لتحديد كثافة البيتومين ومساعدته في حساب الفراغات الهوائية، حسب ASTM D70 [32].

• اختبار اللزوجة (Viscosity Test): يُجرى لتقييم مقاومة البيتومين للجريان عند درجات حرارة مختلفة (ASTM D2171 أو D4402) [33].

4. اختبارات الخلطة الإسفلتية (Mixture Tests)

بعد تحديد نسب المكونات، تُخلط العينات بنسب بيتومين مختلفة وتُجرى عليها اختبارات مارشال لتحديد الخصائص الميكانيكية والحجمية للخلطة.

• اختبار مارشال للثبات والانسياب: يُحدد الثبات (Stability) الذي يمثل مقاومة العينة للتحميل، والانسياب (Flow) الذي يمثل مقدار التشوه تحت الحمل. [34] يُجرى الاختبار وفق المواصفة ASTM D6927. الشكل (6) يوضح اختبار مارشال للخلطة الإسفلتية.



الشكل 6: اختبار مارشال للخلطة الإسفلتية.

• الكثافة والفراغات الحجمية: يتم حساب الخصائص التالية:

1. الفراغات الهوائية (Air Voids, AV)

2. الفراغات بين الحبيبات المعدنية (VMA)

3. الفراغات المملوءة بالبيتومين (VFB)

وتُستخدم هذه القيم لتحديد نسبة البيتومين المثلى (Optimum)

2. اختبارات مادة المالئة (Filler Tests)

تُستخدم المادة المالئة (مثل غبار الحجر الجيري أو غبار الرخام) ملء الفراغات بين حبيبات الركام الدقيقة وتحسين التماسك بين البيتومين والركام [5,4].

• التحليل المنخلي (Sieve Analysis): يُجرى للتحقق من أن المادة المالئة تمر بالكامل من منخل رقم (200) بفتحات (0.075 مم)، وذلك وفق المواصفة ASTM D546 [27].

• الكثافة النوعية (Specific Gravity): يُقاس لتحديد نسبة المواد الصلبة ولحساب الحجم النوعي للخلطة الإسفلتية، باستخدام المواصفة ASTM D854 [28]. الشكل (4) يوضح الاختبارات للمادة المالئة.



الشكل 4: اختبار التحليل المنخلي والكثافة النوعية للمادة المالئة

3. اختبارات البيتومين (Bitumen Tests)

يُعد البيتومين العامل الرابط الرئيسي في الخلطة الإسفلتية، وتُجرى عليه مجموعة من الاختبارات لتحديد خواصه ومدى ملاءمته للظروف المناخية المحلية.

• اختبار الاختراق (Penetration Test): يقيس مدى صلابة البيتومين عند درجة حرارة (25°C)، كما موضح في الشكل (5). ويُستخدم الاختبار لتصنيفه حسب درجة الاختراق. (ASTM D5) [29].

• اختبار الليونة (Ductility Test): يُحدد قدرة البيتومين على التمدد دون انقطاع عند درجة حرارة (25°C) وفق المواصفة ASTM D113 [30].

● غبار الرخام: تم توريد مادة غبار الرخام من محجر جي القارة من ناتج عمليات قص ونشر كتل الرخام. تم اجراء الاختبارات اللازمة عليها وكانت كما موضحة في الجدول (3):

الجدول 3: نتائج اختبارات غبار الرخام المورد من محجر جي القارة

النتيجة	نوع الاختبار
2.67	الوزن النوعي الحجمي
2.68	الوزن النوعي الحجمي المشبع جاف السطح
2.69	الوزن الظاهري
0.25	الامتصاص

الاختبارات الكيميائية

تم اجراء الاختبار الكيميائي على عينة غبار الرخام وذلك باستخدام (XRF) و أظهرت النتائج كما هو موضحة بالجدول (4).

الجدول 4: نتائج الاختبار الكيميائي على عينة غبار الرخام

رقم	المكون	النسبة (%mass)	ملاحظات
1	CaO	87.8	أكسيد الكالسيوم
2	SiO ₂	5.87	ثاني أكسيد السيليكون
3	Al ₂ O ₃	3.84	أكسيد الألومنيوم
4	SO ₃	0.883	كبريتات
5	TeO ₂	0.534	تيلوريوم
6	Fe ₂ O ₃	0.323	أكسيد الحديد
7	TiO ₂	0.218	أكسيد التيتانيوم
8	NiO	0.0969	نيكل
9	Cr ₂ O ₃	0.0524	كروم
10	CuO	0.048	نحاس
11	SrO	0.0468	سترونشيوم
12	Pm ₂ O ₃	0.0452	بروميثيوم
13	MnO	0.0386	منغنيز
14	Tb ₄ O ₇	0.0376	تربيوم
15	Dy ₂ O ₃	0.0235	ديسبروسيوم
16	ZnO	0.0231	زنك
17	Er ₂ O ₃	0.0202	إربيوم
18	Co ₂ O ₃	0.0178	كوبالت
19	Yb ₂ O ₃	0.0118	بيتربيوم
20	Ta ₂ O ₅	0.0106	تانتالوم
21	Lu ₂ O ₃	0.0102	لوتيتيوم
22	ZrO ₂	0.0039	زركونيوم
23	WO ₃	0.0002	تنغستن

التجارب المعملية

تحديد الخلطة الاسفلتية المرجعية

لقد تم اختيار التدرج الحبيبي لمكونات الخلطة الاسفلتية بحيث تكون الركام المستخدم ضمن حدود المواصفات حسب الجدول (5).

الجدول 5: نتائج اختيار التدرج الحبيبي لمكونات الخلطة الاسفلتية

Sieve Size	Specification		
	Lab JMF	MAX	MIN
in (No.)	mm		
3/4"	19.000	100.000	100.000
1/2"	12.500	93.900	100.000
3/8"	9.500	85.900	90.000
NO.4	4.750	54.300	62.000
NO.8	2.360	35.600	43.000

(Bitumen Content) حسب طريقة مارشال [35]. الشكل (7) يوضح اختبارات الكثافة والفراغات الحجمية.



الشكل 7: اختبارات الكثافة والفراغات الحجمية

النتائج والمناقشة

خواص المواد المستخدمة

الاسفلت: تم استخدام درجة اختراق الاسفلت 70/60 لهذا النوع من مواد الرابط الاسفلتي حيث تم توريد الاسفلت من شركة فياض برقن وتم اجراء الاختبارات اللازمة عليها وكانت كما موضحة في الجدول (1).

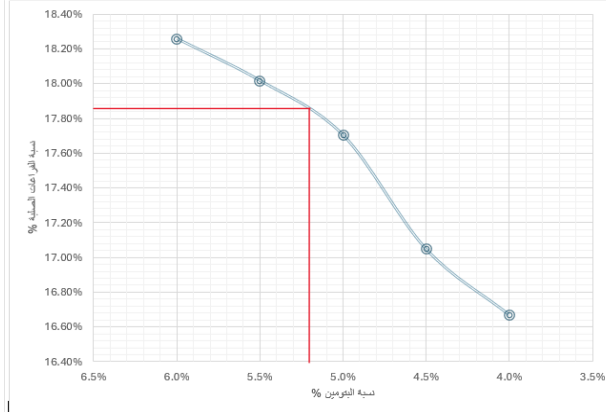
الجدول 1: نتائج اختبارات الاسفلت التي تم توريدها من شركة فياض

نوع الاختبار	الوحدة	النتيجة	حدود المواصفات
الوزن النوعي	gr/cm ²	1.017	1.06-1.01
درجة الوميض	درجة مئوية	320	230-
الاختراق عند 25°C	mm	61	70-60
نقطة التلين	درجة مئوية	48	56-46

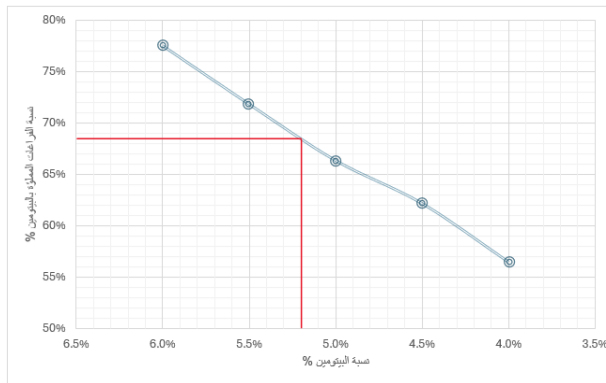
● الركام : تم توريد الركام من موقع كسارة تابعة لشركة فياض برقن الواقعة على طريق براك الشويرف بمنطقة البرطمة. تم اجراء الاختبارات اللازمة عليها وكانت كما موضحة في الجدول (2).

الجدول 2: نتائج اختبارات الركام الذي تم توريده من كسارة شركة فياض

النتيجة	نوع الاختبار
2.71	الوزن النوعي الحجمي
2.77	الوزن النوعي الحجمي المشبع جاف السطح
2.91	الوزن الظاهري
2.64	الامتصاص
2.63	الوزن النوعي الحجمي
2.74	الوزن النوعي الحجمي المشبع جاف السطح
2.96	الوزن الظاهري
3.68	الامتصاص
16.3	مقاومة التفتت (Los Angeles Abrasion)
%0.14	نسبة الكتل الطينية و الكتل القابلة للتفتت
%4.2	اختبار الاستطالة



الشكل 11: نسبة الفراغات الصلبة بالبيتومين المستخدمة بالخلطة الاسفلتية



الشكل 12: نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين بالخلطة الاسفلتية

الجدول 6: نتائج اختبارات الخلطة الاسفلتية بتغيير نسبة البيتومين المستخدمة

الخاصية	نسبة البيتومين %				
	%6	%5.5	%5	%4.5	%4
التدفق (مم) Flow	3.94	3.84	3.70	3.48	3.32
الثبات (KN) Stability	9.59	10.32	10.88	10.52	10.06
كثافة العينة Gma	2.282	2.283	2.282	2.302	2.308
الكثافة النظرية Gmm	2.380	2.405	2.427	2.460	2.488
نسبة الفراغات الهوائية (%) (A.V)	4.098%	5.699%	5.949%	6.441%	7.280%
نسبة الفراغات الصلبة (VMA)(%)	18.26%	18.020%	17.703%	17.048%	16.670%
نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين (VFB)	77.550%	71.87%	66.395%	62.219%	56.521%

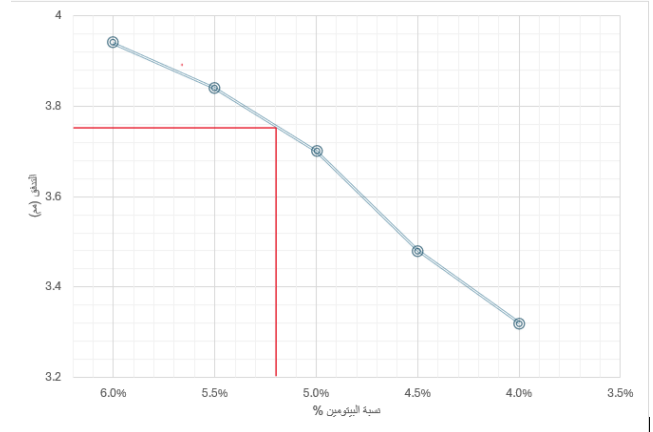
ثانياً: تحليل سلوك الخلطة مع زيادة نسبة البيتومين

1. التدفق (Flow)

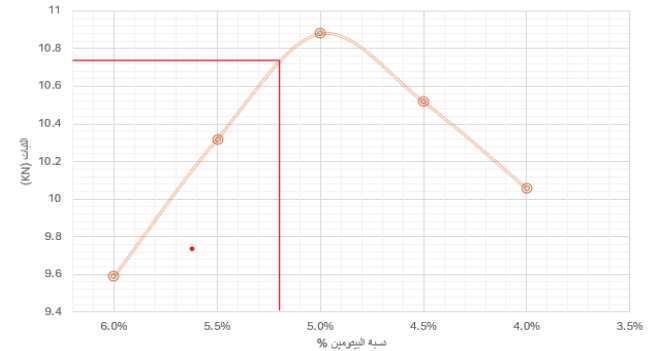
يرتفع تدريجياً من 3.32 مم عند 4% بيتومين إلى 3.94 مم عند 6% القيم جميعها ضمن النطاق المقبول (عادة 2-4 مم للطرق ذات المرور المتوسط

NO.16	1.180	20.200	27.000	14.000
NO.30	0.600	14.100	20.000	9.000
NO.50	0.300	10.500	15.000	5.000
NO.100	0.150	8.010	11.000	3.000
NO.200	0.075	5.150	8.000	2.000

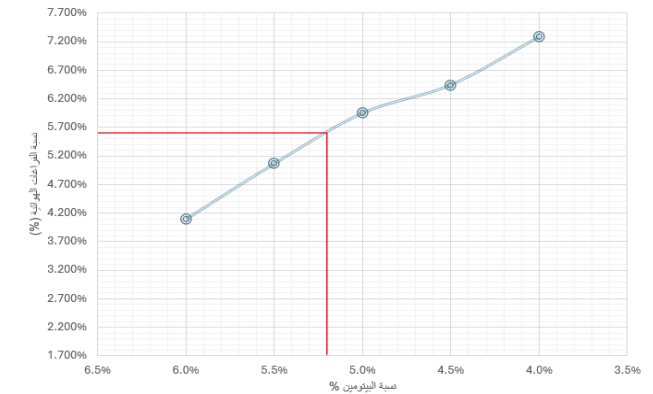
تم تحديد نسبة البيتومين المستخدمة بالخلطة الاسفلتية من وزن العينة الكلية وكانت النسب كما يلي : نسبة البيتومين (4% ، 4.5% ، 5% ، 5.5% ، 6%) وكانت النتائج كما موضحة في الأشكال (من 8 إلى 12).



الشكل 8: نسبة التدفق للبيتومين المستخدمة بالخلطة الاسفلتية



الشكل 9: نسبة الثبات للبيتومين المستخدمة بالخلطة الاسفلتية



الشكل 10: نسبة الفراغات الهوائية بالبيتومين المستخدمة بالخلطة الاسفلتية

مناقشة نتائج الاختبارات

اولاً: عرض مختصر للبيانات

يستعرض الجدول (6) نتائج اختبارات الخلطة الاسفلتية بتغيير نسبة البيتومين المستخدمة

بعض الخصائص حتى حد معين، ثم تبدأ هذه الخصائص بالتدهور عند الزيادة المفرطة.

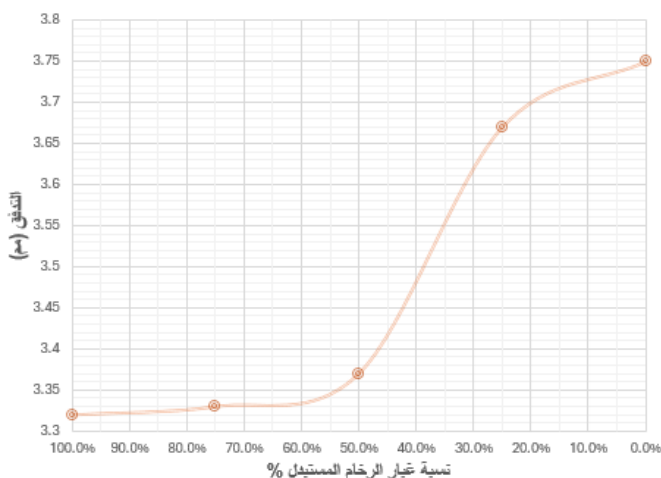
حيث سُجّلت أعلى قيمة للثبات عند نسبة بيتومين تقارب 5%، ثم انخفضت تدريجياً مع زيادة المحتوى، نتيجة زيادة سماكة غشاء البيتومين حول حبيبات الركام مما يقلل من الاحتكاك الداخلي بينها. في المقابل، ازداد التدفق بشكل تدريجي مع زيادة محتوى البيتومين بسبب زيادة ليونة الخلطة، بينما انخفضت نسبة الفراغات الهوائية نتيجة امتلاء الفراغات بالمادة الرابطة. وبناءً على تحليل منحنيات الثبات والتدفق والفراغات الهوائية، تم تحديد نسبة بيتومين تقارب 5.2% تحقق فراغات هوائية بحدود 4%، مع الحفاظ على قيم الثبات والتدفق ضمن الحدود المسموح بها وفق المواصفات القياسية.

وعليه، تم اعتماد هذه النسبة كنسبة البيتومين المثلى (OBC) للخلطة المرجعية، لما توفره من توازن مناسب بين المتانة والمرونة، وضمان أداء جيد تحت ظروف الخدمة المختلفة.

رابعاً: تصميم الخلط الاسفلتية المثلى وإجراء الاستبدال المادة المائلة المعدنية بغير الرخام

بعد تحديد نسبة البيتومين المثلى، تم إعداد خلطة إسفلتية باستخدام هذه النسبة، بعد ذلك جرى استبدال المادة المائلة التقليدية والتي كانت نسبته (5.15%) من الوزن الكلي للركام المستخدم بالخلطة الإسفلتية بغير الرخام بالنسب التالية (0%، 25%، 50%، 75%، 100%) من الوزن، بهدف دراسة السلوك التدريجي لتأثير غبار الرخام على بنية الخلطة الإسفلتية وتحليل التغيرات الميكانيكية والحجمية عند الانتقال من الاستبدال الجزئي إلى الاستبدال الكلي. كما تسمح هذه النسب بتحديد نقطة التحول التي يبدأ عندها الأداء في التحسن أو التراجع، مما يسهل تحديد النسبة المثلى بدقة علمية.

تم إعداد خمس عينات اختبار لكل نسبة من غبار الرخام المستبدل، وبذلك بلغ العدد الكلي للعينات (25) عينة. واعتمد في التحليل على المتوسط الحسابي لنتائج العينات لكل نسبة عند مناقشة النتائج واستخلاص الاستنتاجات وكانت النتائج موضحة بالأشكال (17-13).



الشكل 13: قيمة التدفق بتغيير نسبة الرخام المستبدل

والعالي)

هذا مؤشر مباشر على ازدياد مرونة الخلطة. ويُعزى ذلك إلى ارتفاع محتوى المادة الرابطة، التي تُكسب الخلطة سلوكاً أكثر لدونة، ويُعد هذا الاتجاه ضرورياً لتحقيق التوازن التصميمي.

2. الثبات (Stability)

- يزداد الثبات تدريجياً مع زيادة نسبة البيتومين من 10.06 KN عند 4% بيتومين لتبلغ قيمة عظمى مقدارها 10.88 KN عند 5%، ثم يبدأ بالانخفاض عند النسب الأعلى.
- هذا السلوك طبيعي إذ إن الزيادة الأولية في محتوى البيتومين في البداية تُحسن التماسك بين حبيبات الركام وتعزز الترابط الداخلي للخلطة مما يزيد مقاومتها للأحمال.
- لكن بعد حد معين تصبح الخلطة لينة وضعيفة ويُعزى إلى زيادة سماكة طبقة البيتومين حول الحبيبات، مما يؤدي إلى تقليل الاحتكاك الداخلي.

3. كثافة العينة (Bulk Density)

- تُظهر الكثافة الحجمية انخفاضاً تدريجياً مع زيادة نسبة البيتومين حتى 5%، ثم تميل إلى الاستقرار النسبي عند القيم الأعلى. ويُعزى هذا السلوك إلى استبدال جزء من الركام عالي الكثافة ببيتومين أقل كثافة، مما يؤدي إلى انخفاض الكثافة الكلية للخلطة.

4. نسبة الفراغات الهوائية (A.V)

- تُظهر النتائج انخفاضاً مستمراً في نسبة الفراغات الهوائية من (7.28%) إلى (4.10%) مع زيادة نسبة البيتومين، وهو ما يعكس قدرة البيتومين على ملء الفراغات بين الحبيبات وتقليل حجم الهواء المحبوس داخل الخلطة. ويُعد هذا السلوك من أهم المؤشرات التصميمية، حيث إن الوصول إلى نسبة فراغات هوائية بحدود (4%~) يُمثل شرطاً أساسياً لتحقيق التوازن بين المتانة ومقاومة التشوه، ويشير إلى قرب الوصول إلى نسبة البيتومين المثلى.

5. نسبة الفراغات الصلبة (VMA)

- تزداد نسبة الفراغات الهوائية تدريجياً مع زيادة محتوى البيتومين، وهو ما يدل على زيادة الحجم الكلي للفراغات داخل الهيكل الاسفلتي. ويُعزى ذلك إلى زيادة سماكة طبقة البيتومين المغلفة للحبيبات، مما يؤدي إلى إبعادها نسبياً عن بعضها البعض.

وتُعد هذه الزيادة مؤشراً إيجابياً، حيث توفر مساحة كافية لاحتواء البيتومين مع الحفاظ على متانة الهيكل الاسفلتي.

6. نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين (VFB%)

- تُظهر نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين زيادة ملحوظة مع زيادة نسبة البيتومين، مما يدل على ارتفاع نسبة الفراغات التي تم ملؤها بالبيتومين داخل الخلطة. ويعكس ذلك تحسن التماسك الداخلي وتقليل النفاذية. إلا أن القيم المرتفعة جداً قد تؤدي إلى زيادة حساسية الخلطة للتشوهات الدائمة، مما يتطلب تحقيق توازن دقيق بين هذه الخاصية وباقي الخصائص.

ثالثاً: تحديد نسبة البيتومين المثلى (Optimum Bitumen Content)

(OBC)

ان تحديد نسبة البيتومين المثلى لا يعتمد على خاصية منفردة، بل يستند إلى تحقيق توازن بين الخصائص الميكانيكية والحجمية للخلطة الإسفلتية. وقد أظهرت نتائج اختبار مارشال أن زيادة محتوى البيتومين تؤدي إلى تحسين

مناقشة نتائج الاختبارات

أولاً: عرض مختصر للبيانات

يستعرض الجدول (7) نتائج اختبارات الخلطة الاسفلتية بتغيير نسبة غبار الرخام المستبدل.

الجدول 7: نتائج اختبارات الخلطة الاسفلتية بتغيير نسبة غبار الرخام المستبدل

الخاصية	نسبة غبار الرخام المستبدل %				
	%100	%75	%50	%25	%0
التدفق (مم) Flow	3.32	3.33	3.37	3.67	3.75
الثبات (KN)	11.09	9.86	9.55	9.17	10.66
Stability					
كثافة العينه Gma	2.34	2.32	2.31	2.30	2.31
الكثافة النظرية	2.46	2.45	2.46	2.44	2.46
Gmm					
نسبة الفراغات	%4.87	%5.28	%6.18	%6.07	%5.91
الهوائية (%) (A.V)	%17.18	%17.55	%18.33	%18.23	%18.10
نسبة الفراغات الصلبة (%) (VMA)	%71.66	%69.89	%66.30	%66.74	%67.36
نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين (VFB)					

ثانياً: تحليل سلوك الخلطة مع زيادة نسبة البيتومين

توضح النتائج التجريبية أثر استخدام نسب مختلفة من غبار الرخام (0%، 25%، 50%، 75%، 100%) على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للخلطة الإسفلتية المصممة بطريقة مارشال. وقد هدفت هذه المناقشة إلى تحليل التغيرات التي طرأت على الخصائص الأساسية للخلطة وتفسيرها وفقاً للمفاهيم العلمية المتعلقة بدور المواد المالئة في تحسين أداء الخلطات الإسفلتية.

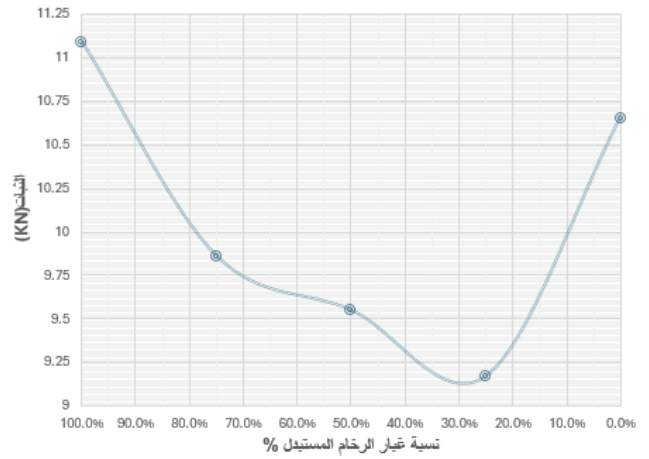
أولاً: التدفق

أظهرت النتائج انخفاض قيمة التدفق من 3.75 مم نسبة استبدال (0%) إلى 3.32 مم عند نسبة (100%). تشير هذه القيم إلى أن الإضافة الجزئية لغبار الرخام حسنت من قابلية الخلطة للتشوه المرن بفعل تحسين التماسك بين البيتومين والركام.

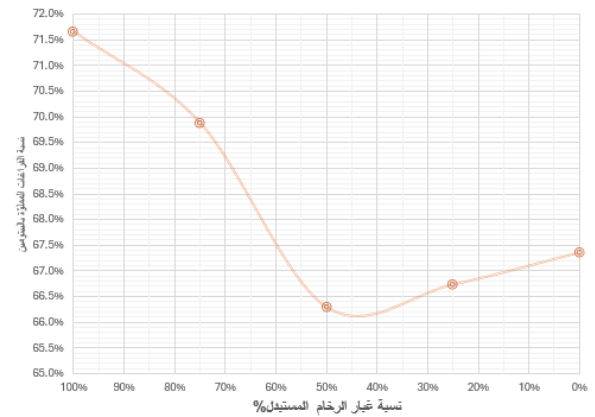
إلا أن الزيادة الكبيرة في النسبة المضافة جعلت الخلطة أكثر تماسكاً وأقل مرونة نتيجة لانخفاض المسامية وازدياد الدمك الداخلي. ويُستنتج من ذلك أن تأثير غبار الرخام على التدفق يعتمد على تحقيق توازن بين المرونة والثبات الهيكلي.

ثانياً: الثبات

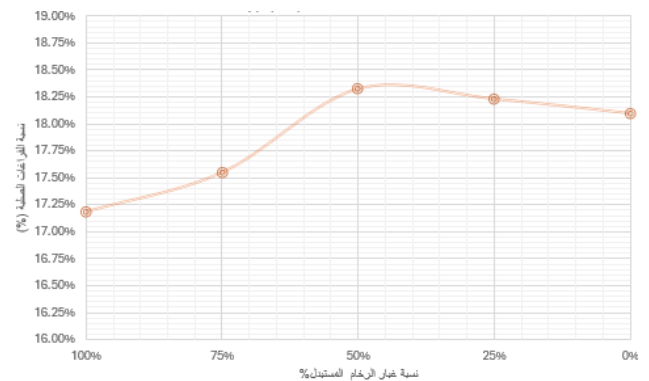
تشير نتائج اختبار الثبات إلى انخفاض القيمة من 10.66 كجم عند الخلطة المرجعية إلى 9.17 كجم عند نسبة 25%، ثم ارتفاعها تدريجياً لتصل إلى 11.09 كجم عند نسبة 100%. ويمكن تفسير ذلك بأن الإضافة الأولية للغبار تؤدي إلى زيادة نسبة المواد الناعمة، مما يقلل من الاحتكاك الداخلي، في حين أن الزيادات الأعلى ساهمت في تحسين التدرج الحجمي وملء الفراغات، مما رفع مقاومة القص والانضغاط. وبناءً عليه، فإن غبار الرخام بنسبة مرتفعة يعزز الثبات بشكل واضح، وهو ما يتوافق مع ما توصلت إليه دراسات سابقة حول دور المواد المالئة المعدنية في تحسين مقاومة التشوهات



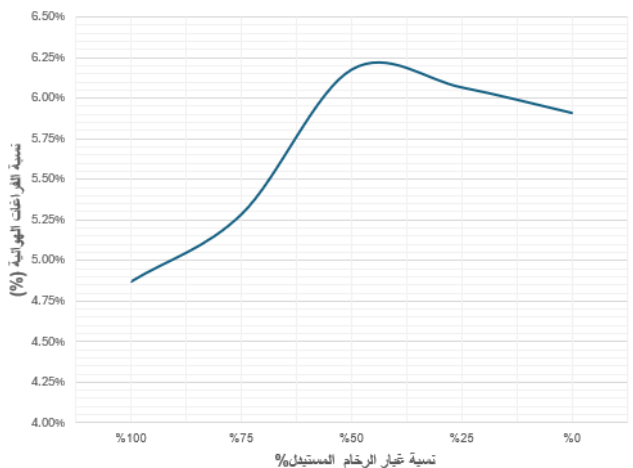
الشكل 14: قيمة الثبات بتغيير نسبة الرخام المستبدل



الشكل 15: نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين بتغيير نسبة الرخام المستبدل



الشكل 16: نسبة الفراغات الصلبة بتغيير نسبة الرخام المستبدل



الشكل 17: نسبة الفراغات الهوائية بتغيير نسبة الرخام المستبدل

استخدام غبار الرخام كمادة مالئة فعالة في الخلطات الإسفلتية.

ثالثًا: الكثافة العينية

الخلاصة

بناءً على النتائج، يمكن القول إن تأثير غبار الرخام كان إيجابيًا على معظم الخصائص الميكانيكية للخلطة الإسفلتية. فقد أدى إلى زيادة الكثافة والثبات وتقليل الفراغات الهوائية مع الحفاظ على قيم VMA ضمن الحدود التصميمية المقبولة. وأظهرت الخلطات التي تحتوي على نسب تتراوح بين 75% و100% من غبار الرخام أفضل أداء من حيث التوازن بين الثبات والمرونة.

لوحظ ارتفاع منتظم في الكثافة العينية من 2.31 إلى 2.34 بزيادة نسبة غبار الرخام. ويُعزى هذا الارتفاع إلى قدرة الجزيئات الدقيقة لغبار الرخام على ملء الفراغات البينية بين الركام، مما يؤدي إلى تحسين الدمك وتقليل المسامية. وتُعد هذه النتيجة مؤشرًا إيجابيًا على تحسن بنية الخلطة، حيث إن ارتفاع الكثافة يرتبط بزيادة الترابط الداخلي واستقرار المزيج الإسفلتي رابعًا: الكثافة النظرية

يتضح من مجمل النتائج أن غبار الرخام يمتلك خصائص فيزيائية تسمح له بالعمل كمادة مالئة فعالة يمكن أن تحل محل الفلر التقليدي دون التأثير السلبي على أداء الخلطة. وقد ساهم في تحسين مقاومة التشوهات الدائمة وزيادة الترابط الداخلي وتقليل النفاذية، مما يجعله خيارًا عمليًا واقتصاديًا مناسبًا، خاصة في البيئات الحارة والجافة. ومن ثم، يمكن التوصية باعتماد نسب استبدال تتراوح بين 75% و100% من غبار الرخام للحصول على أفضل أداء إنشائي للخلطات الإسفلتية.

لم يطرأ تغير ملحوظ على الكثافة النظرية (تراوحت بين 2.44 و2.46)، مما يدل على أن تأثير غبار الرخام اقتصر على تحسين الكثافة الفعلية دون التأثير على الوزن النوعي الكلي للخلطة. ويشير ذلك إلى أن التغيرات ناتجة بالأساس عن إعادة توزيع الحبيبات الدقيقة وتحسين تجانس المزيج خامسًا: نسبة الفراغات الهوائية

التوصيات

استناداً إلى النتائج المستخلصة من دراسة تأثير غبار الرخام على خصائص الخلطة الإسفلتية المصممة بطريقة مارشال، يمكن تقديم التوصيات التالية:

1. اعتماد غبار الرخام كمادة مالئة في الخلطات الإسفلتية
2. تحديد النسب بين (75%-100%) المثالية للاستبدال
3. يوصى بالحفاظ على الفراغات الهوائية ضمن النطاق 3-5% لتجنب مشكلات نفاذية الماء والهواء،
4. يوصى بإجراء اختبارات الأداء للخلطات الإسفلتية المستخدم فيها غبار الرخام كمادة مالئة.
5. دراسة تأثير الغبار على الأداء طويل المدى: يُنصح بإجراء اختبارات إضافية مثل مقاومة التشقق الحراري، الانضغاط تحت الأحمال المتكررة، ومقاومة الانزلاق لضمان استقرار الخلطة على المدى الطويل عند استخدام غبار الرخام.

انخفضت نسبة الفراغات الهوائية من 5.91% إلى 4.87% مع زيادة محتوى غبار الرخام، مما يعكس تحسن الدمك الداخلي وانخفاض المسامية الكلية. ويُعتبر هذا الانخفاض عاملاً مهماً في تحسين مقاومة الخلطة لنفاذية الماء والهواء، وبالتالي زيادة عمرها التشغيلي. كما أن القيمة النهائية للفراغات (3-5%). الهوائية تقع ضمن الحدود القياسية الموصى بها

سادسًا: نسبة الفراغات الكلية في الركام

شهدت قيمة VMA انخفاضًا طفيفًا من 18.10% إلى 17.18% بزيادة نسبة غبار الرخام. ويرجع هذا الانخفاض إلى أن الجزيئات الدقيقة من الغبار ساعدت على تحسين التدرج وتقليل المسافات البينية بين الركام. ورغم هذا التناقص، ظلت القيم ضمن الحدود المسموح بها وفق المواصفات الأمريكية مما يدل على أن الخلطة لا تزال محافظة على توازنها البنيوي ASTM D1559.

سابعًا: نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين ارتفعت نسبة VFB من 67.36% إلى 71.66% بزيادة نسبة غبار الرخام، وهو ما يشير إلى زيادة نسبة البيتومين الموزعة داخل الفراغات، الأمر الذي يؤدي إلى رفع التماسك الداخلي ومقاومة الانفصال والتشقق. ويُعد هذا المؤشر من العلامات الإيجابية التي تدعم

Author Contributions: Younes and Fekroun: Conceptualization, methodology; Miskeen: writing—original draft preparation; All authors have review and editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Funding: "This research received no external funding."

Data Availability Statement: "No data were used to support this study."

Conflicts of Interest: "The authors declare that they have no conflict of interest."

Acknowledgments: "The authors would like to express their appreciation to Wadi Alshatti University, Brack-Libya, for their support during the study."

References

- [1] Y. Huang. *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2004, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1016/B978-0-13-142473-9.X5000-3>

- [2] K. Ogden. *Urban Transport Planning*, Aldershot, UK: Ashgate Publishing, 1992, pp. 5–8. <https://doi.org/10.4324/9781315845463>
- [3] S. Carpenter, S. Ghuzlan, and A. Witczak. "Advanced approaches for asphalt mixture design and performance evaluation," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 1–10, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(1))
- [4] Y. Huang, R. Bird, and O. Heidrich. "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements." *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, no. 14–15, pp. 1358–1373, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.03.002>
- [5] C. Zaumanis, R. Mallick, and R. Frank. "100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis." *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 92, pp. 230–245, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.007>
- [6] M. Tamanna, and M. Khan. "Utilization of marble waste in construction industry: A review." *Construction and Building Materials*, vol. 211, pp. 598–612, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.123>

- [7] T. Moghaddam, M. Soltani, and M. Karim. "Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures." *Scientific Research and Essays*, vol. 7, no. 4, pp. 409–420, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.006>
- [8] A. Awad, S. El-Khodary, and M. Abd El-Aziz, "Utilization of marble dust as filler in hot mix asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 191–198, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.055>
- [9] R. Gupta, and P. Kumar. "Evaluation of marble dust as mineral filler in bituminous mixes." *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 15, no. 8, pp. 741–748, 2014. <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.816603>
- [10] M. Rahman, and M. Siddique. "Utilization of waste marble powder in asphalt concrete mixtures: A sustainable approach." *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 2115–2125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.133>
- [11] S. Krishna, and P. Kumar. "Environmental impacts of marble dust and its utilization in construction materials." *Journal of Environmental Management*, vol. 231, pp. 1–10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.104>
- [12] H. Salem, M. Miskeen, and Y. Salem. "Enhanced Performance of Asphalt Mixtures by Adding Recycled Rubber from Damaged Car Tires." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, no. SI, pp. 1–11, 2025. <https://www.waujpas.com/index.php/journal/article/view/165>
- [13] H. Salem. "Effect of Polymer Modification Bitumen on Performance of Flexible Pavement in Hot Arid Area in Libya." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 57–63, 2023. <https://www.waujpas.com/index.php/journal/article/view/19>
- [14] H. Salem. "Rubber-Modified Asphalt for Enhanced Performance in Extreme Heat." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 2, no. 2, pp. 36–40, 2024. <https://www.waujpas.com/index.php/journal/article/view/78>
- [15] H. Salem. "Study and Comparison of Physical and Mechanical Properties of Highway Base Layer Materials from Different Sources." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 149–155, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_19
- [16] H. Salem. "Enhanced Asphalt Mixture Design for Sustainable Pavements." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 2, no. 2, pp. 31–35, 2025. <https://www.waujpas.com/index.php/journal/article/view/73>
- [17] A. Topal, and B. Sengoz. "Determination of the properties of marble powder for use in asphalt concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 19, no. 5, pp. 335–340. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.002>
- [18] M. Abdelrahman. *Effect of replacing limestone filler with marble dust on the mechanical properties of asphalt mixtures* (Doctoral dissertation, Cairo University), 2016. <https://scholar.cu.edu.eg/?q=eng-maabdellrahman/thesis>
- [19] M. Abbas, and R. Muntean. "Marble powder as a sustainable cement replacement: A review of mechanical properties." *Sustainability*, vol. 17, no. 2, p. 736, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17020736>
- [20] D. Khan, R. Khan, M. Khan, M. Alam, and T. Hassan. "Performance of hot-mix asphalt using polymer-modified bitumen and marble dust as a filler." *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 10, no. 3, pp. 385–398, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.12.002>
- [21] M. Karasahin, and S. Terzi. "Use of marble dust in asphalt mixtures." *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 3, pp. 616–620, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.001>
- [22] A. Topal, and B. Sengoz. "Thermal decomposition study of crystalline limestone using P-wave velocity" *Construction and Building Materials*, vol. 19, no. 5, pp. 335–340, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.002>
- [23] M. Sadeq, and I. Al-Qadi. "Pavement materials and mix design principles." *Transportation Research Record*, vol. 1789, pp. 1–8. <https://doi.org/10.3141/1789-01>
- [24] ASTM International, ASTM C128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, 2015, <https://doi.org/10.1520/C0128-15>
- [25] A. Neville, and J. Brooks. "Aggregate properties and their influence on the durability of pavement materials." *Construction and Building Materials*, vol. 15, no. 2–3, pp. 129–138, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00081-9)
- [26] British Standards Institution (BSI). (1989). *BS 812: Part 105.1 – Testing Aggregates: Methods for determination of particle shape – Flakiness Index*. London, United Kingdom
- [27] ASTM C128 – Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. <https://www.astm.org/c0128-15.html>
- [28] **ASTM International. (2020). ASTM C128 – Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.**
- [29] ASTM International. (2020). *ASTM D5/D5M – Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. West Conshohocken, PA, USA. https://www.astm.org/d0005_d0005m.html
- [30] **ASTM International. (2020). ASTM D113 – Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials**. West Conshohocken, PA, USA. <https://www.astm.org/d0113-17.html> (store.astm.org)
- [31] ASTM International. (2020). *ASTM D36/D36M – Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. West Conshohocken, PA, USA. <https://www.astm.org/d0036m.html> (store.astm.org)
- [32] ASTM International. (2020). *ASTM D70 – Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*. West Conshohocken, PA, USA. https://www.astm.org/d0070_d0070m.html
- [33] ASTM International. (2020). *ASTM D4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. West Conshohocken, PA, USA. <https://www.astm.org/d4402.html>
- [34] ASTM International. (2020). *ASTM D6927 – Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, PA, USA. <https://www.astm.org/d6927.html>
- [35] ASTM International. (2020). *ASTM D6927 – Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, PA, USA. <https://www.astm.org/d6927.html>