Wadi AlShatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

The First Conference on Roads and Traffic Accidents - November 23th , 2024, Brack Alshatti - Libya

RESEARCH ARTICLE **ROAD AND TRANSPORTION ENGINEERING**

Enhanced Performance of Asphalt Mixtures by Adding Recycled Rubber from Damaged Car Tires

Hassan Salem[1,*], Manssour Bin Miskeen [2], Youssef Salem[1]

[1]Department of Civil Engineering, College of Engineering, Wadi Alshatti University, Libya
[2]Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Engineering, Wadi Alshatti University, Libya

ARTICLE HISTORY
Conference date:
23 November 2024
Online 11 February 2025

KEYWORDS:
Libyan roads;
Flexible Paving;
Stability;
Flow;
Recycled Rubber.

ABSTRACT

Due to the problems that the Libyan road network is exposed to, such as cracks and ruts resulting from increased loads on the roads. Therefore, research and development in this field aims to improve the properties of asphalt and enhance its performance on roads through the use of innovative technologies and improved materials. In this research, the properties of asphalt mixtures modified with rubber resulting from recycling damaged rubber car tires were studied, in order to improve their performance in terms of stability and flow, which enhances their ability to deal with expansion and contraction resulting from thermal changes and traffic movement on the roads. The results showed that when rubber was added to the asphalt mixture, all properties of the asphalt mixture improved, as the stability value increased by 15.8% when rubber was added, while the flow value decreased by adding rubber. By 14.5%. The results also showed that the best percentage of bitumen was 5.6%, and the best percentage of rubber added to the asphalt mixture was 9%. After extracting bitumen from the modified mixture with 9% rubber, it was found that the percentage of effective bitumen was 5.9%, which was 0.3% more than the optimum percentage of bitumen. Therefore, the percentage of bitumen decreased by 0.3% to be within the specifications. Based on the research results, we recommend using 9% rubber in the modified mixture in the asphalt mixture industry in Libya due to its benefits on the durability of the pavement, resistance to rutting, and reducing road maintenance. Adding rubber reduces the costs of road maintenance and paving by reducing the percentage of bitumen in the asphalt mixture.

تحسين أداء الخلطات الأسفلتية عن طريق إضافة المطاط المعاد تدويره من إطارات السيارات التالفة

حسن عويدات سالم[1]، منصور بن مسكين[2]، يوسف حسن سالم[1]

الكلمات المفتاحية
الطرق الليبية
الرصف المرن
الثبات
الإنسياب
المطاط المعاد تدويره

الملخص

نظرا للمشاكل التي تتعرض لها شبكة الطرق الليبية كالشقوق والتخدد الناتجة عن زيادة الأحمال على الطرق. لذلك، يهدف البحث والتطوير في هذا المجال إلى تحسين خواص الأسفلت وتعزيز أدائها في الطرق من خلال استخدام تقنيات مبتكرة ومواد محسنة. تم في هذا البحث دراسة خواص الخلطات الإسفلتية المعدلة بالمطاط الناتج عن إعادة تدوير إطارات السيارات المطاطية التالفة، ودلك لتحسين أدائها من حيث االثبات والإنسياب مما يعزز قدرتها على التعامل مع التمدد والإنكماش الناجم عن التغيرات الحرارية والحركة المرورية على الطرق. إظهرت النتائج عند إضافة المطاط للخلطة الأسفلتية إلى تحسن في جميع خصائص الخليط الإسفلتي حيث تزداد قيمة الثبات عند إضافة المطاط بنسبة 15.8% بينما تتناقص قيمة الإنسياب بإضافة المطاط. بنسبة 14.5%، كما تبين من النتائج أن أفضل نسبة للبيتومين هي 5.6% و كانت أفضل نسبة مطاط مضافة للخليط الإسفلتي هي 9%. بعد استخلاص البيتومين من الخلطة المعدلة بنسبة 9% من المطاط تبين أن نسبة البيتومين الفعال كانت 5.9% كانت تزيد عن النسبة المثلى للبيتومين ب 0.3%. و بالتالي تتناقص نسبة البيتومين بنسبة 0.3% لتكون ضمن حدود المواصفات، و بالاستناد على نتائج البحث نوصي باستخدام نسبة 9%من المطاط في الخلطة المعدلة في صناعة الخلطة الإسفلتية في ليبيا لما لها من فوائد على ديمومة الرصف و مقاومة التخدد وتقليل صيانة الطرق. حيث أن إضافة المطاط يقلل من تكاليف صيانة ورصف الطرق عن طريق تقليل نسبة البيتومين في الخليط الأسفلتي.

المقدمة

في الوقت الحاضر ومع تطور أنواع المركبات وأحجامها والطلب المتزايد على نقل الأفراد والبضائع التي تشكل أحمال كبيرة على الطرق يمكن أن تؤدي إلى ظهور العديد من المشاكل في الطبقة السطحية من الرصف لذلك كان الميل إلى محاوله تحسين الطبقة السطحية وزيادة كفاءتها وكذلك تحسين أدائها وزيادة مقاومتها للاحمال وذلك باضافة مواد مختلفة الى الخلطات الاسفلتية منها البوليمرات، المواد المعدنية، الصوف الزجاجي، المطاط وغيرها من المواد المضافة [1].

نتيجة النمو السريع و تزايد عدد المركبات في ليبيا أصبحت مخلفات الإطارات مصدر قلق بيئي رئيسي. تعتبر الطرق من أهم عناصر البنية التحتية التي تلعب دور حيوى في حياتنا اليومية ويعتبر استخدام فتات المطاط المعدل في انشاء الطرق الإسفلتية من الحلول الذكية لأجل التطور المستدام من خلال

*Corresponding author: h.awadat@wau.edu.ly
https://doi.org/

اعادة استعمال المواد المستهلكة مما يقلل من تكلفة التصنيع ويسهام ايضا في التقليل من التلوث البيئي الناتج عن مخلفات إطارات السيارات. في السنوات الأخيرة زاد الطلب على الخلطات الإسفلتية الساخنة رافقه زيادة في قيمة ضغط الاطارات على الرصف نتيجة الحمولات المرورية المستخدمة في عمليات النقل بالاضافة إلى تأثير تغير الظروف البيئية والتى سببت فى ظهور العيوب المختلفة من تخدد وتشققات الطرق فى ليبيا. كما ان كميات كبيرة من الإطارات المطاطية المستهلكة التى يتم تجميعها سنويا تمثل مشكلة في إدارة المخلفات الصلبة (الثلوث) وخاصة عند التخلص منها بالحرق علي الصحة العامة والبيئة [2-3]. اكتسب إستخدام فتات المطاط مؤخرا إهتماماً من قبل البحاث في العديد من الدراسات حيث أظهر الإسفلت المعدل تحسناً في أداء الأرصفة مقارنة مع المادة الإسفلتية الرابطة الأساسية مما أدى إلى تقليل التشققات وتعزيز اللزوجة الالتصاق والخصائص الإنسيابية لمادة الإسفلت المطاطي [2-3].

نظرا للمشاكل التي تتعرض لها شبكة الطرق الليبية كالشقوق والتخدد الناتجة عن زيادة الاحمال على الطرق تم في هذا البحث دراسة خواص الخرسانة البيتومينة المعدلة بالمطاط. لذلك فإن الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة تأثير إضافة المطاط المعاد تدويره من إطارات السيارات التالفة إلى الخلطة الإسفلتية. وذلك لتحسين أدائها من حيث االثبات والإنسياب مما يعزز قدرتها على التعامل مع التمدد والإنكماش الناجم عن التغيرات الحرارية والحركة المرورية على الطرق في الطبقات السطحية (طبقات التغطية البيتومينية) من الرصف المرن.

مشاكل شبكة الطرق الليبية

شبكة الطرق تعاني من مشاكل بيئية وتشغيلية

- المشاكل البيئية وتتمثل في درجات الحرارة
- المشاكل التشغيلية وتتمثل في زيادة الأحمال
- التقادم

من خلال الدراسات السابقة للأضرار السائدة بالرصف الأسفلتي في المناطق الحارة والجافة في ليبيا يتضح بأن الأضرار السائدة بساحات الرصف عبارة عن تشققات بسطح الرصف الأسفلتي يمكن تصنيفها إلى ثلاثة أنواع كما موضح في الشكل (1-3) وهي:

1. تشققات طولية: تتركز هذه التشققات بفواصل الإنشاء الطولية.
2. تشققات عرضية: تتواجد هذه التشققات على مسافات متباعدة بكامل ساحات الرصف الأسفلتي وبالأخص عند فواصل الإنشاء العرضية.
3. تشققات متشعبة: تنتشر هذه التشققات على كامل سطح الرصف على هيئة مربعات كبيرة .نسبياً جميع هذه التشققات حرارية تبدأ عند سطح الرصف الأسفلتي وينمو عرضها وعمقها مع مرور الزمن

الشكل 1: طريق هون – سبها

الشكل 2: طريق جالو – الكفرة (Road Elkofra- Jalou).

الشكل 3: طريق براك -أدري (Road Edri-Brak).

الظروف البيئية في الصحراء الليبية

تتمتع المناطق الصحراوية في ليبيا بارتفاع شديد في درجة حرارة سطح الرصف الأسفلتي والتذبذب الكبير في درجة حرارة الرصف خلال اليوم الواحد، كما أن هذه المناطق تتعرض الى درجات حرارة متباعدة خلال السنة وتصنف المناطق الوسطى والجنوبية في ليبيا كمناطق حارة-جافة حيث يصل التغير في درجة الحرارة لليوم الواحد الى أكثر من (45 م°) يتراوح معدل سقوط الأمطار من 5ملم الى 50 ملم في السنة [4].

المشاكل التشغيلية

تتمثل المشاكل التشغيلية في زيادة اوزان حمولات الشاحنات عن الوزن

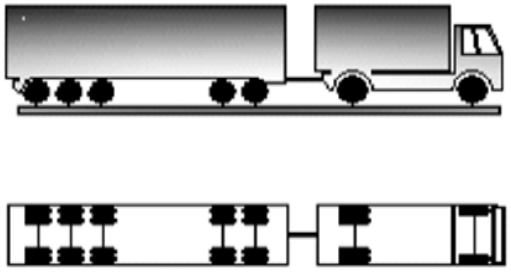
التصميمي للطريق حيث ان عدم وجود الموازين في نقاط مختارة من الطريق وإهمال الإجهادات ذات العلاقة بالحمولات التشغيلية أدى الى حدوث انهيارات مبكرة في جسم الطريق.

الأوزان المحورية القصوى المسموح بها للشاحنات:

وفق التشريع الليبي بالقرار رقم 71 لسنة 1989م. يوضح الشكل (4) الأوزان المحورية المسموح بها للشاحنات:

المحاور	أمامي فردي	خلفي فردي	مزدوج	ثلاثي
عدد الأطارات	2	4	8	12
الحمولة الكلية (طن)	6	10	20	30

ملاحظة: الحمولة الكلية (طن) تسمل وزن الشاحنة. (المصدر: مصلحة الطرق والنقل البري)



الشكل 4: الأوزان المحورية المسموح بها للشاحنات

حيث وصلت الأوزان إلى أضعاف الوزن المسموح به وسجلت بعض المخالفات تفوق ورن 140 طن والأخص الشاحنات القادمة من المنفذ الشرقي (امساعد) والمحملة بمواد البناء والرخام والسيراميك وغيرها. الأمر الذي يؤثر سلباً على الطرقات العامة وكذلك الجسور، علماً بأن أغلب الطرق والجسور تضررت نتيجة ما ذكر أعلاه. يوضح الشكل (5): تأثير الزيادة في الاحمال على جسم الطريق.

الشكل 5: تأثير الزيادة في الاحمال على جسم الطريق.

تقادم الإسفلت (aging Asphalt)

كما ذكر سابقا فإن معظم شبكات الطرق في ليبيا قد تم تنفيذها في السنوات (1972-1985) ونظرا لافتقارها للصيانة الدورية وانتهاء العمر الافتراضي لها سبب ذلك في تقادم الطريق بالإضافة للعوامل المناخية ويكون التقادم على شكلين:

1) التقادم على المدى القصير (short term aging)
2) التقادم على المدى الطويل (long term aging)

1) التقادم على المدى القصير:

هذا النوع من التقادم يحدث خلال فترة التصنيع والإنشاء ويعتمد معدل هذا التقادم على درجة حرارة الخلط حيث يزداد التقادم بزيادة درجة حرارة الخلط.

الاسفلت الذي يخلط عند درجة حرارة أقل من 158 م° يتعرض الى تقادم أقل ويكون أقل تصلباً من الإسفلت الذي يخلط عند درجة حرارة أعلى. وقد يصل النقص في قيمة الغرز للإسفلت المستعاذ الى 60% عندما تزيد درجة حرارة الخلط عن 170 م°.

2) التقادم على المدى البعيد:

يحدث هذا النوع من التقادم نتيجة لتعرض الإسفلت لظروف بيئية مختلفة منها درجة الحرارة، الإشعاع الشمسي، نسبة الرطوبة. معدل تقادم الإسفلت بالمناطق الحارة والجافة أكبر منه في المناطق الأخرى نتيجة للتغير الكبير في درجات الحرارة وكمية الإشعاع الشمسي وشدة جفاف الجو. ويسبب تقادم الإسفلت زيادة لزوجة الإسفلت وزيادة نقطة الليونة ونقص في قيمة الغرز وقيمة الممطولية مما ينتج عنه تصلب الإسفلت والزيادة الكبيرة في جساءة الخلطة الإسفلتية. وفي هذه الحالة يصبح الرصف الأسفلتي معرضاً لحدوث الكلل الحراري إذا ما كان التغير في درجة الحرارة كبير خلال اليوم الواحد كما يحدث في المناطق الصحراوية الجافة. كما أن تصلب المادة الإسفلتية الرابطة وتقادمها يكون رئيسي ومباشر لحدوث تشققات الانكماش والذي ينتج من التغير الحجمي أثناء التقادم وهذه التشققات تنمو بالتدريج مع تقادم الإسفلت والتي تظهر في البداية بفواصل الإنشاء الطولية والعرضية حيث تكون مقاومة الشد لطبقات الرصف أضعف ما يمكن خاصة في ساحات الرصف الواسعة مثل المهابط وساحات وقوف الطائرات.

يمكن تجنب تشققات الإنكماش باستخدام إسفلت ناعم ذو غرز (120-150). ويمكن تجنب التشوهات باستخدام إسفلت صلب 70/60. في المناطق الصحراوية، الظروف البيئية جافة وحارة خلال فصل الصيف وباردة خلال فصل الشتاء. في مثل هذه المواقع استخدام إسفلت ناعم يحل مشكلة تشققات الانكماش ولكن لا يحل مشكلة التشوهات وإذا أستخدم إسفلت صلب يحل مشكلة التشوهات ولكن لا يحل مشكلة التشققات. فاستخدام إسفلت 70/60 حل مشكلة التشوهات وكل الرصف الأسفلتي في الصحراء الليبية خال من التشوهات ولكنه لم يحل مشكلة تشققات الانكماش المنتشرة على كامل الرصف الأسفلتي.

الدراسات السابقة

تمت تجربة استخدام الخلطات الإسفلتية المعدلة بالمطاط منذ القدم ، واستخدمت لأول مرة في هولندا سنة 1909م، وفي الولايات المتحدة الأمريكية عام 1900م بولاية أوهايو وأعطت نتائج جيدة وقام كارلوس ماكدونالد في مدينة فينيكس أريزونا في 1906بالعمل على نطاق واسع بالبيتومين والمواد المطاطية وكانت ذات دور فعال في تطوير الطريقة الرطبة لإنتاج البيتومين المعدل بالمطاط التي أيضا سميت طريقة ماكدونالد (العملية الرطبة وهي إضافة المطاط كنسبة مئوية من وزن البيتومين) و كان كارلوس ماكدونالد أول من استخدم البيتومين المعدل بالمطاط في الخلائط الاسفلتية الحارة وفي تنفيذ المعالجات السطحية عند ترميم وصيانة الأغطية الطرقية. وبحلول عام 1995م كانت مدن ومقاطعات ولاية كاليفورنيا قد نفذت أكثر من 400 مشروع طرقي من البيتومين المعدل بالمطاط. لقد زاد استخدام المطاط في الخلطات الاسفلتية بشكل كبير في السنوات الأخيرة حول العالم وقد استخدمت بنجاح في بناء الطرق وصيانتها واعادة تأهيلها وذلك في الولايات المتحدة وأوروبا لأكثر من 60عام، وقد ذكر أن العديد من الطرق كانت بحالة جيدة بعد عدة سنوات من الخدمة بالمقارنة مع الرصف التقليدي. ومنذ عام

1990 كانت 60%من الطرق في USA كانت تبنى من الرصف المحسن باستعمال المطاط فهي أفضل من الناحية الاقتصادية والبيئية. وفي بحثنا هذا تركز العمل على تعديل البيتومين بإضافة المطاط واستخدمنا المطاط في تصميم خلطات اسفلتية معدلة محققة لشروط تصميم الخلطة الاسفلتية بحيث يحقق مواصفات فنية عالية لهذه الخلطات ويحسن من أدائها وخاصة في الطبقات السطحية (طبقات التغطية البيتومينية) من الرصف المرن.

في ماليزيا قامت (Mashaan ،2019) باختبارات على مزيج البيتومين المضاف له مطاط وكان البيتومين المستعمل بدرجة غرز (100-80)، هذا البيتومين له استخدام واسع في مختلف المجالات وخاصة في ماليزيا. كانت نسبة المطاط المضافة (4-8-12-16-20) % بالوزن من البيتومين، تم مزج البيتومين والمطاط لمدة ساعة في درجة ال حرارة180 C° وسرعة المزج 200دورة بالدقيقة. أظهرت النتائج انخفاضاً في قيم الاستطالة لعينات الرابط البيتوميني المُعدل بالمقارنة مع الرابط البيتوميني غير المعدل بحوالي (18-57) % لنسبة الرابط (4-20) %على التوالي. قيمة النقصان في الاستطالة يمكن أن تعزى إلى الجزء الزيتي للبيتومين الممتص من قبل بودرة المطاط وارتفاع كتلة جزيئات المطاط، والرابط المعدل أصبح أقسى بالمقارنة مع الرابط غير معدل. أما نتائج اختبار الغرز فقد انخفضت قيمتها مع زيادة نسبة المطاط حتى النسبة 20% ويظهر أن نسبة المطاط لها تأثير كبير على قيم الغرز وزيادة نسبة المطاط تزيد صلابة الرابط البيتوميني المضاف له مطاط وهذا يجعل الرابط أقل تأثراً لدرجة الحرارة ويؤدي إلى مقاومة عالية للتشوه الدائم مثل التخدد. الانخفاض في قيمة الغرز كان (4-20) %لفتات المطاط (16.5-61) %على التوالي، ويبرر هذا السلوك بأن إضافة المطاط تجعل البيتومين أكثر لزوجة وذلك بسبب زيادة الكتلة المطاطية خلال التفاعل وانتفاخ المطاط داخل البيتومين أثناء عملية المزج والتي أدت إلى تناقص درجة الغرز للبيتومين بعد إضافة المطاط.

قام كل من سلطان و فاضل (2011) بدراسة بعنوان تعديل البيتومين المحلي لاستخدامه في خلطات اسفلتية خاصة بمهابط المطارات، جامعة تشرين، سوريا 2011. أجري هذا البحث لتحسين خاصية مقاومة البيتومين للكيروسين، الذي قد تتعرض له طبقة التغطية البيتومينية في المطارات، ولهذا الهدف تم اختيار الـ SBS (Styrene Butadiene Styrene)والEN1 كمحسنات للبيتومين، وأضيف الـ SBS بنسبة 3.5% والـ EN1 بنسبة 6%. أجريت بعض التجارب لتحديد خواص البيتومين المعدل وغير المعدل، وكانت النتائج ضمن حدود المواصفات، تم غمر عينات البيتومين بالكيروسين ولوحظ تحسن واضح في عدم انحلال العينات المعدلة، وتم تجهيز عينات من الخلطة الاسفلتية وفق طريقة مارشال لكل من أنواع البيتومين المستخدم في بحثنا، وأجريت عليها الاختبارات اللازمة وأعدت عينات وفق النسبة المثالية من البيتومين وغمرت بالكيروسين لمدة24 ساعة ورغم أنها لم تحقق شرط ألا يزيد النقص في وزنها بعد الغمر عن 1% إلا أن مقدار التحسن ملموس وجدير بالاهتمام، وقمنا بتجهيز عينات من الخلطة وغمر سطحها العلوي لمدد مختلفة ولم يتجاوز النقص في الوزن 0.24% للخلطات المعدة من بيتومين معدل بالSBS و0.23% للخلطات المعدلة بالEN1 في حين كان النقص في وزن العينات غير المعدلة 2.4% أي أن مقدار التحسن هو بحدود عشرة أضعاف. وقد بينت نتائج هذه الدراسة، أن البيتومين الخام قد انحل بنسبة 90% عند الزمن 60دقيقة في حين البيتومين المعدل بنسبة 6% من EMA25 انحل بنسبة تقارب 10% على كامل زمن التجربة [5].

دراسة تم في دولة العراق [6]، استخدم في هذه الدراسة مسحوق الإطارات المستهلكة باستخدام النايتروجين السائل لتجميد قطع الإطارات لغرض سحقها و الحصول على مسحوق ناعم (عابر للمنخل رقم 35 ذو الحجم 500 مايكرون) . استخدم المسحوق كمادة مالئة اضيفت الى قير هيت الطبيعي بنسب وزنية مختلفة (مسحوق مطاط الاطارات - المادة المالئة- -غم- لكل 100غم قير هيت) النسب هي (0، 5، 10، 15، 30). ثم درست خواص قير هيت الطبيعي قبل وبعد اضافة مسحوق الاطارات كانت نسبة الـ 30غم / 100غم قير هيت هي النسبة المثلى والتي من خلالها يمكن لقير هيت ان يحقق كل من المواصفات العالمية (ASTM- D312) والمواصفات العراقية (-88) 1196كمادة تسطيح.

في دراسة تمت في 2014، تم دراسة إمكانية تعديل الخلطات الإسفلتية المستخدمة في مدينة اللاذقية بالمطاط المدور من إطارات السيارات المطاطية المستهلكة، وذلك لتحسين أدائها. بناءً على نتائج هذه الدراسة، نلاحظ في الخلطات البيتومينية المعدلة بالمطاط المدور من إطارات السيارات تحسنا في قيم الثبات وانخفاضا ملحوظا في قيم الانسياب، و هذا ينعكس بشكل ايجابي وجيد على أداء أفضل وديمومة أطول للخلطات البيتومينية. كما أن التحسن في قيم الثبات والنقصان في قيم الانسياب عند إضافة المطاط للخلطة البيتومينية كان متوافقا مع نتائج أبحاث عديدة ومتنوعة تناولت موضوع إضافة المطاط المدور للخلطات البيتومينية. لاحظ زيادة نسبة الإسفلت المثالية في الخلطات المعدلة بالمطاط، فمن أجل البيتومين غير المعدل كانت النسبة المثالية للبيتومين 5.48% ومن أجل البيتومين المعدل بالمطاط بالنسب (5، 10، 15) كانت النسبة المثالية للبيتومين (6.13- 5.93- 5.97) على التوالي. تتميز الخلطات البيتومينية المصنوعة من البيتومين ABوبدرجة غرز (60-70) بخواص جيدة وبقيم ثبات وانسياب جيدة. عند المقارنة بين التركيبين الحبيين للمطاط المستخدم نلاحظ تماثلا في قيم الغرز للبيتومين المعدل بفتات. المطاط وفق التركيب الحبي الأول والتركيب الحبي الثاني عند نسبة المطاط 3% كذلك نلاحظ تماثلا في قيم الاستطالة للبيتومين المعدل بفتات المطاط وفق التركيب الحبي الأول عند النسبة 4%مع قيم الاستطالة للبيتومين المعدل بفتات المطاط وفق التركيب الحبي الثاني عند النسبة 3% [7].

شريفة و هند (2019)، تم دراسة استخدام مخلفات اللدائن (البولي ايثيلين) الى الخلطة الاسفلتية كجزء من الركام الخشن، و ذلك للتخلص من بعض النفايات والمخلفات، وايضا لتحسين خواص الخلطة الاسفلتية وتقليل تكلفة إنشاء الطرق. وقد تم اجراء عدد من الإختبارات للركام وللاسفلت للتاكد من صلاحية استخدامهما، وتم تحضير الخلطة الاسفلتية بإستعمال طريقة مارشال حيث تم مقارنة خلطة عادية بدون اضافة المخلفات مع خلطة بالاضافة بنسب متغيرة للاسفلت حيث أظهرت النتائج تحسنا في خصائص الخلطة الإسفلتية المستخدم بها الأضافة افضل من العادية وخاصة الخلطة عند نسبة الإسفلت 6.55% حيث تم الحصول على أفضل النتائج للخلطة عند هذه النسبة. من النتائج، تقل كثافة مارشال عند إضافة اللدائن مقارنة بالعينات العادية وذلك بسبب مرونة اللدائن و التمدد الذى حصل فى العينة بعد دمكها واستخراجها من القوالب. يزداد الثبات عند اضافة اللدائن مقارنة بالعينات العادية وهذا الإزدياد كان كبيرا جدا بسبب مقاولة اللدائن

للضغط الناتج من الأحمال المسلطة. قلت نسبة الفراغات المملوءة بالاسفلت مقارنة بالعينات العادية وذلك بسبب تغلغل اللدائن في الفراغات. تزداد قيمة الإنسياب ازدياد كبير مقارنة بالعينات العادية وذلك بسب مرونة اللدائن العالية.

الكوت 2021 في دراسته، تم تقييم الخصائص الفيزيائية للأسفلت الأصلي (70/60) والإسفلت المعدل باستخدام اختبارات الاختراق ونقطة التليين واللزوجة والممطولية. تم إجراء اختبارات التصميم المعملية للخلطة الإسفلتية الساخنة باستخدام طريقة مارشال. بناءً على نتائج الدراسة، أن زيادة محتوى فتات المطاط يؤدي إلى انخفاض في عمق الاختراق وبالتالي المساهمة في زيادة صلابة المادة الرابطة المعدلة بفتات المطاط سفلتمقارنة بالا الا تظهر و .صلي نتائج نقطة التليين أن درجة الحرارة المرتفعة مطلوبة لتليين المادة ال دلةالمع رابطة حيث تصبح أكثر صلابة مع زيادة محتوى فتات المطاط. أظهرت كما النتائج زيادة كبيرة في لزوجة الاسفلت المعدل مقارنة بالاسفلت وبالتالي الاصلي يمكن استخدام لزوجة المادة الرابطة الإضافية في خليط الإسفلت المعدل لتقليل التشققات الانعكاسية والتجريد مع تحسين استجابة المادة الرابطة لتغير درجة الحرارة والمتانة على المدى الطويل فضلاً عن قدرتها على الالتصاق بجزيئات الركام في الخلطة الاسفلتية الساخنة و لمقاومة الشيخوخة. في حين قلت قيم استقرار مارشال مع زيادة محتوى فتات المطاط مقارنة بالخلطة المرجعية أما قيم الانسياب زادت وكانت ضمن النطاق المسموح به. وعموماً كانت النتائج الإجمالية مشجعة لاستخدام فتات المطاط كمعدل للأسفلت بنسبة 12%في الخلطات الاسفلتية الساخنة لبناء الطرق في ليبيا لحل مشكلة تشققات الارصفة الناتجة عن احمال المرور[2].

سالم (2024) ، كان الهد ف من هذه الدراسة هو تقييم فعالية تعديل البوليمر بواسطة طريقة الخلطات الإسفلتية عالية الأداء بالطريقة الحجمية والطرق الأوروبية لتصميم الخلطة. بالإضافة إلى توصيف المادة الرابطة بما في ذل ك تحديد معدل الاداء الاسفلتي، شملت الدراسة أيضًا بعض الاختبارات الميكانيكية :حساسية الماء، اختبارات تتبع العجلات ومعامل الصلابة .أظهر الخليط المعدل بمادة ستايرين بوتادين ستايرين المحضر بالطريقة الجافة نتائج أفضل مقارنة بالخرسانة الإسفلتية التقليدية غير المعدلة .لقد تبين أنه كلما زادت كمية المادة المحسن ة المضافة ، كلما زادت قيمة معدل الأداء الأسفلتي لدرجات الحرارة المرتفعة وقلت ظاهرة التخدد . تم اقتراح مبادئ توجيهية لتنفيذ الخرسانة الإسفلتية المعدلة بالبوليمر في ليبيا .يمكن اعتماد تقنية الاداء العالي لتصميم الرصف المرن في ليبيا[8].

سالم (2024) ، تهدف هذه الدراسة إلى تحسين خصائص الأسفلت بإضافة المطاط . برنامج اختبار شامل، تم إجراؤه وفقًا للمعايير الألمانية والأوروبية، أظهر أن الأسفلت المعدل بالمطاط يتمتع بثبات محسّن في درجات الحرارة العالية، وسلوك محسّن في درجات الحرارة المنخفضة، وقدرة ربط محسنة . بشكل محدد، أظهر الأسفلت المعدل بالمطاط زيادة بنسبة 7% في الاستقرار وتقليل بنسبة 46% في عمق التمدد مقارنة بالأسفلت التقليدي . المقاومة المحسّنة للماء والتشققات تعزز فعالية تعديل الأسفلت بالمطاط [9] .

سالم (2024) في دراسته ، إلى طرق تحسين تصميم خلائط الأسفلت لجعل الطرق أقوى وأكثر استدامة. تم دراسة ثلاث طرق تصميم شائعة: مارشال، سوبر بيف، وجي تي إم؛ لمعرفة أيها يعمل بشكل أفضل .من خلال اختبار خلائط الأسفلت المختلفة المصنوعة بهذه الطرق، نكشف اختلافات مهمة في الأداء. تبين النتائج أن طريقة جي تي إم تنتج خلائط أسفلتية تحتوي على عدد أقل من الفراغات ونسبة أقل من البيتومين إلى الركام، مما يجعلها أكثر استقرارًا في الماء ودرجات الحرارة العالية .بالإضافة إلى ذلك، تظهر خلائط جي تي إم ثباتًا أفضل مقارنة بتلك المصنوعة بطرق مارشال وسوبر بيف .في حين ينتج تصميم سوبر بيف خلائط بنسب أقل من البيتومين إلى الركام، فإنها تدوم لفترة أطول تحت الإجهاد المتكرر. ومع ذلك، فإن الخلائط المصنوعة بطريقة مارشال لا تؤدي بشكل جيد عمومًا. توفر هذه الدراسة رؤى قيمة حول تحسين تصميم خلائط الأسفلت لإنشاء طرق تدوم لفترة أطول وأكثر مقاومة [10] .

منهجية البحث

أجريت تجربة باستخدام الأسفلت المعدل بالمطاط في براك، ليبيا. تم تحضير الأسفلت في مصنع الأسفلت، مع أخذ عينات من الأسفلت المعدل وغير المعدل للاختبار. أظهر شياو وآخرون أداء مخاليط الأسفلت المطاطية في الظروف الرطبة والجافة [11].

تم تقييم خصائص الأسفلت المعدل من خلال دراسة مقارنة مع البيتومين العادي، مع التركيز على الاستقرار والسلوك في درجات الحرارة العالية والمنخفضة ومقاومة الماء. تم استخدام طرق الاختبار القياسية التالية للإسفلت الساخن:

اعتمد في هذا البحث سلسلة من التجارب المحددة بالمواصفات التالية:

1. تجربة الغرز للبيتومين Penetration وفق المواصفة AASHTO T-49 في درجة الحرارة 25°C.
2. تجربة تحديد نقطة التلين للبيتومين (softening point tat) وفق المواصفة (AASHTO T-53).
3. تجربة تحديد درجة الوميض والاشتعال للبيتومين fire and Flash Point وفق المواصفة(AASHTO T-48) .
4. تجربة البري طبقا للمواصفة AASHTO T-96.
5. تجربة المكافئ الرملي للركام Equivalent Sand وفق المواصفة T-176 AASHTO.
6. تجربة الوزن النوعي للركام Gravity Specific وفق المواصفة AASHTO T-84.
7. تجربة تحديد نسبة الامتصاص للركام (AASHTO T-85).
8. تجربة المتانة للركام.
9. تجربة مارشال تصميم الخلائط الإسفلتية (Test Marshal) وفق المواصفة (AASHTO T-245)

مراحل العمل وفق التجارب المخبرية كانت كالتالي:

1- تحديد خواص البيتومين غير المعدل (60-70).
2- إجراء التجارب للركام الداخل في تشكيل الخلطات الاسفلتية..
3- قمنا بتحديد خواص الركام المستخدم، حيث تم تحديد التدرج الحبيبي والمكافئ الرملي والبري وفق لوس أنجلوس ونسبة الامتصاص والوزن النوعي.
4- تصميم الخلطات الاسفلتية لتحديد نسبة البيتومين الأمثل.
5- بعد الانتهاء من التجارب على البيتومين وعلى الركام وتحيد مدي مطابقتها للمواصفات المطلوبة، تم البدء في تصميم الخلطة الاسفلتية لتحديد نسبة البيتومين حيث تم خلط الركام المحقق

للمواصفة الفنية المطلوبة بعد تسخينها الى درجة الحرارة المطلوبة مع البيتومين المسخن وفق النسب (3.5، 4، 4.5، 5، 5.5، 6) %، حيث تم اعداد ثلاث قوالب مارشال من كل نسبة ودمكها بجهاز دملك مارشال 75 طرقة على كل وجه.

6- بعد تحديد نسبة البيتومين الامثل نقوم بإضافة المطاط بنسب معينة من وزن البيتومين بالنسب:(5، 6، 7، 8، 9، 10، 11، 12) % لتحديد نسبة المطاط المثالية المضافة وإعداد ثلاث عينات لكل نسبة ودمكها 75 دمكة لكل وجه.

7- وبعد نزع العينات من القوالب تم تحديد الثبات والانسياب للعينات بجهاز مارشال.

الشكل (6) يوضح جهاز تحديد نسبة الثبات والانسياب بطريقة مارشال.

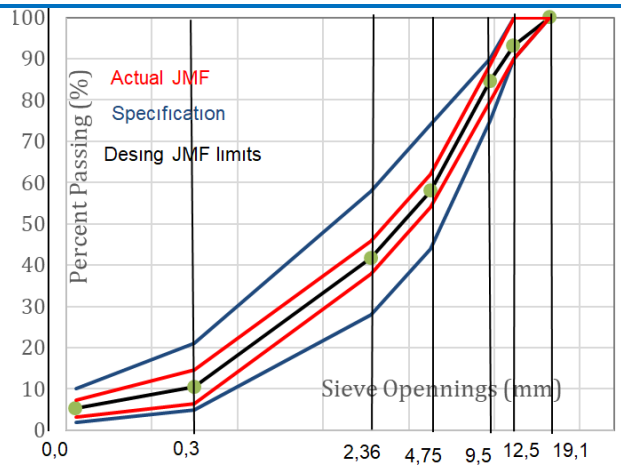
الشكل 6: جهاز تحديد نسبة الثبات والانسياب بطريقة مارشال.

إعداد العينة

التحضير المعملي

كان تصميم خليط الأسفلت وفقًا للمواصفات المستخدمة في ليبيا كما هو موضح في الشكل (7). وكان البيتومين عبارة عن بيتومين ذو درجة اختراق 70/60. وكان محتوى المادة الرابطة 5% بالوزن.

لتصنيع مخاليط الأسفلت، تم استخدام خلاطة معملية وفقًا (لـ DIN EN 12697-35) المخاليط البيتومينية - طرق اختبار الأسفلت المختلط الساخن - الجزء 35: الخلط المعملي. بعد الخلط عند درجة حرارة 170 درجة مئوية، تم تحضير عينة مارشال وعينة (ألواح) وفقًا (لـ DIN EN 12697-35) المخاليط البيتومينية - طرق اختبار الأسفلت المختلط الساخن - الجزء 33: العينة المعدة بواسطة ضاغط الأسطوانة. باستخدام هذه المعدات، من الممكن إنتاج عينات في المختبر بخصائص مماثلة تقريبًا لتلك الموجودة في طبقات الأسفلت على الطريق [13].



الشكل 7: تصميم خليط الأسفلت وفقًا للمواصفات المستخدمة في ليبيا

إختبارات الركام

الإختبارات التي تم اجرائها على الركام هي اختبار التحليل المنخلي، التهشيم، اختبار الصدم، اختبار البري (لوس انجلوس). والجدول التالية تبين نتائج الإختبارات التي اجريت على الركام حيث كانت قيم كل الإختبارات ضمن المواصفات المسموح بها للطبقة السطحية المستخدمة في الرصف [12] .

نتائج اختبارات الركام

التحليل المنخلي للركام:

اتبع البحث الإرشادات الخاصة بالتدرج الكلي لمخاليط الأسفلت AC-13 وAC-20 وAC-25. تتطلب طريقة Superpave عادةً اختيار ثلاثة تدرجات مختلفة للتحسين، ولكن من أجل الاتساق في المقارنة، اختارت هذه الدراسة نفس التدرج المستخدم في طرق Marshall وGTM.

اختبار كتل الطين للركام

الهدف من هذا الإختبار لتحدد الكمية التقريبية للكتل الطينية المواد القابلة للتفتت في الركام. حيث كانت نتائج هذا الإختبار ضمن المواصفات كونها لم تتجاوز حدود المواصفة (≥ 1) [14-16] . الجدول (1) يوضح نتائج اختبار كتل الطين للركام.

اختبار نسبة التفلطح في الركام

الهدف من هذه الاختبارات للتعرف على شكل حبيبات الركام و تحديد نسبة الأشكال غير المرغوبة في العينة مثل الركام المفلطح أو الممطول أو الزاوي. من خلال النتائج الموضحة في الجدول (2) تشير إلى ان نسبة التفلطح للركام كانت ضمن الحدود المسموح بها، حيث كانت نسبة الاستطالة و التفلطح لا تزيد عن 25 % حسب حدود المواصفات [14-15].

الجدول 1: نتائج اختبار كتل الطين للركام.

حجم الحبوب	وزن العينة W1 (غرام)	غربال الاختبار (مم)	الوزن المتبقي على الغربال W2	نسبة الطين من العينة P1=100*[(W1-W2) /W1]	تدرج المواد (٪) P0		نسبة الطين من المادة (P0xP1) /100	حدود المواصفات
3-8	1500.0	2,36	1495.0	0.33	20.0	32.3	0.11	1 ≥
8-11	1754.0	4,76	1752.0	0.11	16.0	25.8	0.03	
11-25	1505.0	4,76	1499.5	0.37	26.0	41.9	0.15	
> 37,5		4,76			62.0			
المجموع							0.29	

الجدول 2: يوضح نتائج اختبار نسبة التفلطح في الركام.

المنخل	وزن الركام المختبر (جم)	وزن التسطيح (جم)	التسطيح	نسبة التسطيح %	حدود المواصفات
1" - 3/4"	3202.0	680.0	21.237	1.115	
3/4" - 1/2"	2284.0	240.0	10.508	4.650	
1/2" - 3/8"	1289.0	222.5	17.261	4.186	لاتتجاوز
3/8" - 1/4"	530.0	102.0	19.245	5.052	25 %
المجموع	7305.0	1244.5		15.002	

اختبار التآكل للركام Aggregate impact

اختبار التآكل هو عملية تستخدم في الهندسة لتقييم مقاومة المادة للتآكل السطحي الناجم عن الحركة الميكانيكية، مثل الاحتكاك أو الكشط أو التآكل. هدفها الأساسي هو التنبؤ بعمر المواد في ظروف العالم الحقيقي حيث قد تتعرض للتآكل. اظهرت نتائج هذا الإختبار أن المتوسط 8.72 ، هذه النتيجة ضمن حدود المواصفات < 10% قوي بشكل استثنائي 10-20% قوي 10-30% مناسب لسطح الطريق >35% ضعيف [14-15].

الجدول 3: يوضح اختبار التآكل Aggregate impact.

العينة	1	2	حدود المواصفات
وزن العينة المختبرة (جم) W1	501	502	< 10% قوي بشكل
المتبقي على غربال 2.36 مم بعد التجربة (جم)	458	457.5	استثنائي
مقاومة التآكل 100 * [W1-W2] \ (W1)	8.58	8.86	10-20% قوي 10-30% مناسب لسطح الطريق
المتوسط	8.72		>35% ضعيف

اختبار مقاومة التآكل في لوس أنجلوس

الغرض من هذا الإختبار لحساب نسبة التآكل للمواد الحصوية باستخدام جهاز لوس انجلس للتآكل. من نتائج هذا الإختبار الموضحة في الجدول (4) كان متوسط نسبة التآكل 16.8% ضمن حدود المواصفات، حيث لم تتجاوز 30% [14-15].

الجدول 4: يوضح اختبار التآكل في لوس أنجلوس.

العينة	1	2	حدود المواصفات
وزن العينة المختبرة (جم) W1	5005	5012	
المتبقي على غربال 1.60 مم بعد التجربة (جم)	4155.5	4175	< 30%
مقاومة التآكل 100 * [W1-W2] \ (W1)	17	16.7	
المتوسط	16.8		

اختبار مكافئ الرمل

تم اجراء هذا الإختبار لتحديد نسبة الرمل أو المواد الناعمة ونسبة الجبيبات كنسبة حجمية ضمن مزيج التربة.يجرى هذا الإختبار على التربة الخشنة لأن وجود مواد ناعمة يغير في سلوكيتها بشكل ملحوظ، حيث تجرى هذه التجربة على المواد المارة من المنخل رقم 4 أي الجبيبات بقطر أقل من 4.76 مم. وكانت النتائج كما موضحة في الجدول (5) ضمن حدود المواصفة، أي لا تقل عن 45% [14-15].

الجدول 5: يوضح اختبار مكافئ الرمل.

العينة	1	2
قراءة الرمل A	9.50	9.50
قراءة الطين B	12.50	12.25
مكافئ الرمل SE = (A/B) x 100	76.0	77.6
المتوسط	76.8	
حدود المواصفة	لا تقل عن 45%	

اختبار الامتصاص للركام

كان الغرض من هذا الإختبار لقياس مسامية الركام وكمية الماء التي قد يمتصها الركام من الخلطة الإسفلتية. وكانت النتائج 1.73 كما موضحة في الجدول (6) ضمن حدود المواصفة،أي لم تتجاوز < 2.5 [14-15].

ASTMC127 - ASTMC128 -ASTM C138 - BS EN 12350-6-BS 812 PART2 - BS EN 1097-6

الجدول 6: يوضح نتائج اختبار الامتصاص للركام.

الركام	نسبة الامتصاص	حدود المواصفات
mm 3-0	2.20	
mm 8-3	1.95	< 2.5
mm 11-8	1.82	
mm 25-11	1.73	

نتائج اختبار البيتومين

لدونة البيتومين ASTM D113-18 – AASHTO T 51-15:

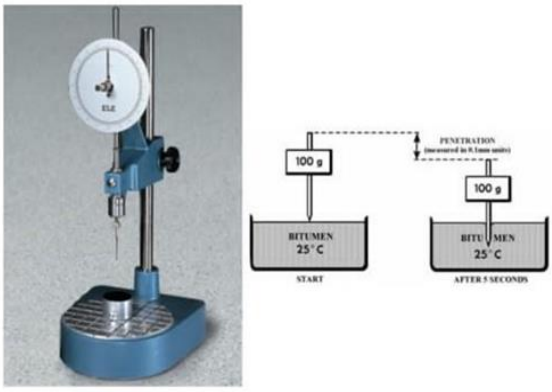
حيث من هذا الإختبار هو لمعرفة قابلية المواد الإسفلتية للسحب المرن، تقاس بمقدار الإستطالة في درجة حرارة 25 ± 0.5 درجة مئوية، مقدار الأستطالة هو أحد المؤشرات اللازمة لمعرفة نوع الإسفلت. تقاس قابلية البيتومين للسحب بالمسافة بالسافة بالسنتيمتر (سم) التي ستستطيل بها عينة البيتومين قبل أن تنكسر عندما يتم سحبها. كانت نتائج هذا الإختبار الموضحة في الجدول (7) ضمن حدود المواصفات حيث كانت 120 [14-15].

الجدول 7: يوضح نتائج اختبار اللدونة.

رقم العينة	الوحدة	1	2	3
درجة الحرارة داخل الخزان	° C	25	25	25
درجة اللدونة	Cm	100	100	100
متوسط اللدونة	Cm		120	
حدود المواصفات	Cm		Min. 100	

اختراق البيتومين ASTM D5 - AASHTO T-49 - EN 1426:

يحدد اختبار اختراق البيتومين صلابة أو نعومة البيتومين من خلال قياس العمق في المليمتر والتي ستخترق الإبرة المحملة القياسية عمودياً في خمس ثوان بينما يتم الخفاظ على درجة حرارة عينة البيتومين عند 25 درجة مئوية. الشكل (7) وضح جهاز اختبار اختراق البيتومين. كما موضح في الجدول (8) كان متوسط الإختراق 60.6 [14-15].



الشكل 7: يوضح جهاز اختبار اختراق البيتومين

الجدول 8: نتائج اختبار الاختراق.

رقم العينة	1	2
الاختراق عند 25 درجة مئوية (100 غرام، 5 ثوان)	60.5	60.5
	60.6	61.0
	60.4	60.7
متوسط الاختراق	60.6	

نقطة التليين ASTM D36-95 - AASTHO T-53:

في ظل طريقة الحلبة والكرة (ASTM D36)، تسمى درجة الحرارة التي يتم عندها تنعيم البيتومين بالتسخين، والتشوه تحت الوزن المحدد للكرة الفولاذية وأسقاطها إلى السطح السفلي بمسافة 25.4 مم، نقطة البيتومين معبراً عنها بالدراجات المئوية. نتائج هذا الإختبار ضمن حدود المواصفات حيث كان متوسط نقطة التلين 50.3 [14-15] كما موضح في الجدول (9).

الجدول 9: يوضح نتائج نقطة التليين.

عينة	نقطة التليين	المتوسط	حدود المواصفات
1	50.1	50.3	Min.46 C°
2	50.4		

نقطة الوميض – نقطة النار ASTM D92 – AASHTO M20:

تحدد طرق اختبار نقطة الوميض أدنى درجة حرارة ينتج عندها المذيب خليطاً قابل للإشتعال بالقرب من سطحه. الغرض من هذا الإختبار لتحديد ما إذا كان الخليط الإسفلتي قابل للإشتعال، أي تحديد درجة الحرارة التي تومض أو تشتعل عندها الخليطة الإسفلتية. كما موضح في الجدول (10) كانت نتائج هذا الإحتبار 340°، أي ضمن حدود المواصفات والتي ≤ 220 C° [14-15].

الجدول 10: يوضح نتائج نقطة الوميض – نقطة النار.

العينة	1	2
نقطة الوميض	320	320
المتوسط	320	
نقطة النار	340	340
المتوسط	340	
حدود المواصفات	≤ 220 C°	

اختبار قوة التقشير

تم أخذ 100 جرام من الركام بين مناخل 9.5 ملم إلى 6.3 ملم، ثم يضاف 5 جرام من البيتومين ويخلط عند درجة حرارة 140 درجة، ثم ضعه في حاوية بترولية وقم بتبريده في درجة حرارة الغرفة لمدة ساعة كحد أقصى، ثم يتم حفظه في ماء بدرجة حرارة 60 درجة لمدة 24 ساعة، ثم يتم إخراجه وتغيير الماء الموجود بداخلها وفحصها بصريا. الجدول (11) يوضح نتائج اختبار التقشر. و الشكل (8) صورة توضح العينة بعد انهاء الاختبار.

الجدول 11: نتائج اختبار التقشر.

الاختبار	النتيجة
نسبة التقشر	%100

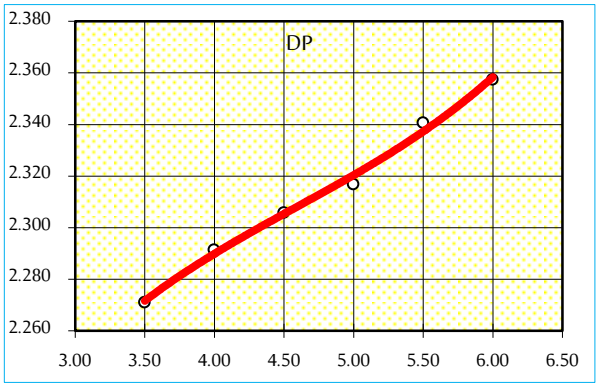
الشكل 8: صورة توضح العينة بعد انهاء الاختبار

ملخص خصائص الخليط الأسفلتي مع تغير نسبة البيتومين

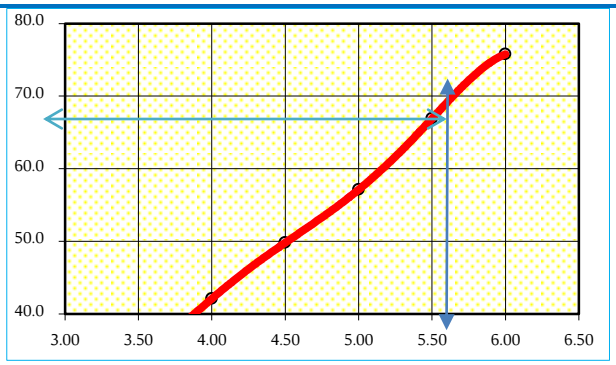
من نتائج الخليط الأسفلتي مع تغير نسبة البيتومين تم الحصول على النتائج التالية في الجدول (12) والأشكال (9-14)، حيث تزداد الكثافة بزيادة نسبة البيتومين ،كما تقل نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين بزيادة نسبة البيتومين في الخليط الإسفلتي. من خلال التجارب والنتائج لاختبار مارشال تم تحديد نسبة البيتومين الأمثل وكانت 5.6% [14-15].

الجدول 12: يوضح ملخص خصائص الخليط الأسفلتي مع تغير نسبة البيتومين.

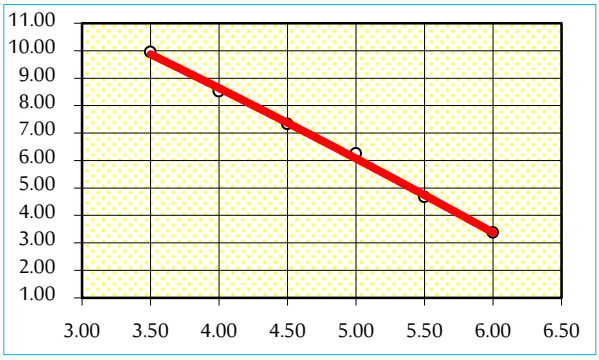
الخصائص	الكثافة	الفراغات المملوءة بالبيتومين %	فراغات الهواء %	فراغات الركام %	الثباتية	الانسياب
% 3.5	2.271	34.0	9.94	15.06	1053	3.61
% 4	2.291	42.1	8.52	14.71	1090	3.64
% 4.5	2.306	49.8	7.32	14.59	1129	3.33
% 5	2.317	57.1	6.25	14.58	1163	2.62
% 5.5	2.341	66.9	4.67	14.11	1183	2.88
% 6	2.357	75.8	3.37	13.91	1129	3.49



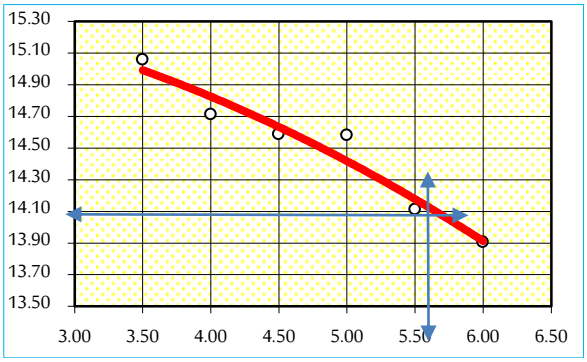
الشكل 9: منحني يوضح نتائج الكثافة بتغير نسبة البيتومين.



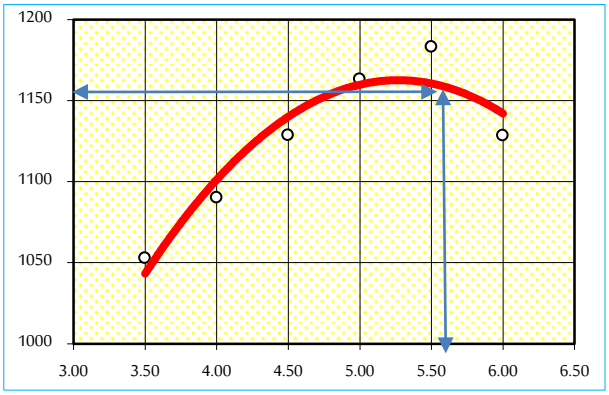
الشكل 10: منحني يوضح نتائج الفراغات المملوءة بالبيتومين بتغير نسبة البيتومين.



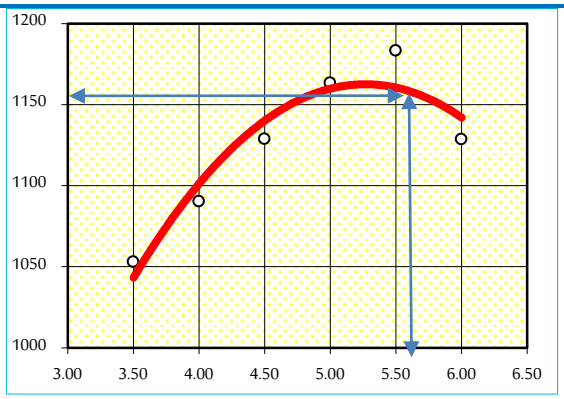
الشكل 11: منحني يوضح نتائج فراغات الهواء بتغير نسبة البيتومين.



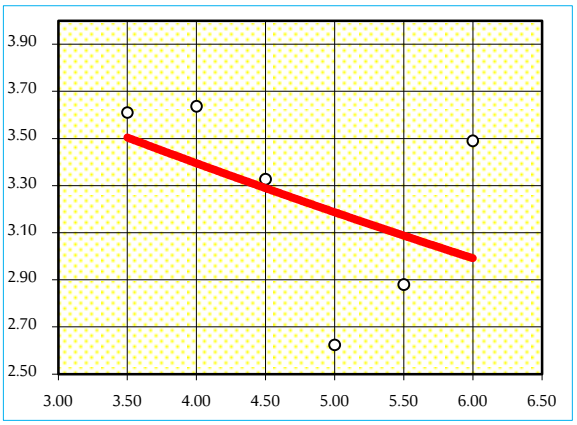
الشكل 12: منحني يوضح نتائج فراغات الركام بتغير نسبة البيتومين.



الشكل 13: منحني يوضح نتائج الثباتية بتغير نسبة البيتومين.



الشكل 14: منحني يوضح نتائج الثباتية بتغير نسبة البيتومين.



الشكل 14: منحني يوضح نتائج الانسياب بتغير نسبة البيتومين.

خصائص الخلطة المرجعية

من خلال الجدول (13) يوضح خصائص الخلطة المرجعية والتي فيها نسبة البيتومين وكانت 5.6% وكانت نتائج الإحتبارات على هذه الخلطة كما موضح بالجدول التالي:

الجدول 13: يوضح خصائص الخلطة المرجعية.

الخصائص	الوحدة	1	2	3
نسبة البيتومين في الخلطة	%		5.6	
نسبة البيتومين الفعال	%		5.3	
ارتفاع العينة	مم	65	64.5	64.5
متوسط ارتفاع العينة	مم		64.7	
وزن العينة في الهواء	جم	1185.6	1188.6	1190.3
وزن العينة في الهواء مشبعة	جم	1190	1191.5	1193.7
وزن العينة في الماء	جم	684	685	685.7
حجم العينة	سم3	506	506.5	508.0
الكثافة للعينة	جم\سم3	2.343	2.347	2.343
متوسط الكثافة للعينة	جم\سم3		2.344	
الكثافة النظرية للعينة	جم\سم3		2.452	
فراغات الهواء	%		4.4	
فراغات الركام	%		14.1	
الفراغات المملوءة بالبيتومين	%		68.7	

الثباتية	كجم	1196	1176	1211
معامل التصحيح		0.975	0.975	0.964
الثباتية المعدلة	كجم	1166	1147	1167
متوسط الثباتية	كجم		1160	
الانسياب	مم	3.15	3.25	3.30
متوسط الانسياب	مم		**3.23**	

جدول ملخص خصائص الخلطات باختلاف نسبة المطاط

من خلال النتائج تبين أن أفضل نسبة زيادة للمطاط هي 9%. وبعد اجراء استخلاص للبيتومين كانت نسبة البيتومين في الخلطة 5.9%، وحدود المواصفة للخلطة هي 5.6% ±0.3%، وبهذه النتيجة اقتربنا من خطر زيادة نسبة البيتومين في الخلطة والذي قد يسبب التخدد (Rutting) في الطرق، وعليه تم تقليل نسبة البيتومين لي 5.3% لتجنب هذا الخطر. الجدول (14) يوضح ملخص خصائص الخلطات باختلاف نسبة المطاط.

الجدول 14: يوضح ملخص خصائص الخلطات باختلاف نسبة المطاط.

الخصائص	الكثافة	فراغات الهواء%	فراغات الركام %	الفراغات المملوءة بالبيتومين %	الثباتية	الانسياب
المرجعية	2.344	4.4	14.1	68.7	1160	3.23
%5	2.356	3.9	13.6	71.2	1154	2.77
%6	2.362	3.7	13.4	72.6	1206	2.61
%7	2.36	3.8	13.5	72.1	1241	2.7
%8	2.356	3.9	13.6	71.3	1279	2.72
%9	2.353	4	13.7	70.7	1343	2.76
%10	2.367	3.5	13.2	73.7	1358	2.72
%11	2.365	3.6	13.3	73.3	1377	2.71
%12	2.377	3.1	12.9	76.1	1423	2.79

خصائص الخلطة بنسبة بيتومين 5.3% ومطاط 9%

من الجدول (15) يوضح خصائص الخلطة بنسبة بيتومين 5.3% ومطاط 9%. كانت نتائج استخلاص البيتومين أو المحتوى الفعال 5.6% ، حيث هذه النسبة في مرحلة الامان .

الجدول 15: يوضح خصائص الخلطة بنسبة بيتومين 5.3% ومطاط 9%.

الخصائص	الوحدة	1	2	3
نسبة البيتومين في الخلطة	%		5.3	
نسبة البيتومين الفعال	%		65.0	
ارتفاع العينة	مم	65.4	65.4	65.4
متوسط ارتفاع العينة	مم		64.7	
وزن العينة في الهواء	جم	1212.2	1211.6	1182.9
وزن العينة في الهواء مشبعة	جم	1213.4	1212.3	1184.3
وزن العينة في الماء	جم	701.5	700.4	682
حجم العينة	سم3	511.9	511.9	502.3
الكثافة للعينة	جم\سم3	2.368	2.367	2.355
متوسط الكثافة للعينة	جم\سم3		2.362	
الكثافة النظرية للعينة	جم\سم3		2.462	
فراغات الهواء	%		4	
فراغات الركام	%		13.1	
الفراغات المملوءة بالبيتومين	%		69.5	

الثباتية	كجم	1420	1418	1375
معامل التصحيح		0.945	0.958	0.964
الثباتية المعدلة	كجم	1342	1358	1325
متوسط الثباتية	كجم		1342	
الانسياب	مم	2.54	3.32	2.82
متوسط الانسياب	مم		2.89	

مقارنة خصائص الخلطات بنسبة 9% مطاط.

من الجدول التالي بعد اجراء الاختبارات تم مقارنة النتائج بين الخلطة المرجعية والخلطات بنسبة 5.6% بيتومين + 9% مطاط و 5.3% بيتومين + 9% مطاط. وكانت النتائج في حدود المواصفات [15-14] .

الجدول 16: يوضح مقارنة خصائص الخلطات بنسبة 9% مطاط.

العينات	الخلطة المرجعية	5.6% بيتومين + 9% مطاط	5.3% بيتومين + 9% مطاط	حدود المواصفات
عدد الضربات	2 x 75.	2 x 75.	2 x 75.	2 x 75.
محتوى البيتومين %	5.60	5.90	5.60	3.5 - 6.5
الكثافة جم\سم3	2.344	2.353	2.362	-
الثباتية كجم	1160	1343	1342	Min.1000
الانسياب مم	3.23	2.76	2.89	2-4
الكثافة النظرية جم\سم3	2.442	2.452	2.462	-
فراغات الهواء %	4.4	4.00	4.00	3-5
الفراغات المملوءة بالبيتومين %	68.70	70.70	69.50	65 – 75
فراغات الركام %	14.10	13.7	13.1	min. 13

مناقشة النتائج

1. تبين من النتائج السابقة أن أفضل نسبة للبيتومين هي 5.6%.
2. كانت أفضل نسبة مطاط مضافة للخليط الأسفلتي هي 9%.
3. بعد استخلاص البيتومين من الخلطة المعدلة بي 9% من المطاط تبين أن نسبة البيتومين الفعال كانت 5.9% كانت تزيد عن النسبة المثلى للبيتومين بي 0.3%.
4. كانت نتائج الثبات للخلطات المعدلة بالمطاط بنسب (5، 6، 7، 8، 9، 10، 11، 12) تزداد عن الخلطة المرجعية بنسب (-0.5، 4، 7، 10.3، 15.8، 17.1، 18.7، 22.7) % على التوالي.
5. كانت نتائج الانسياب للخلطات المعدلة بالمطاط بنسب (5، 6، 7، 8، 9، 10، 11، 12) تتناقص عن الخلطة المرجعية بنسب (14.2، 19.2، 16.4، 15.8، 14.6، 15.8، 16.1، 13.6) % على التوالي.

Author Contributions: "All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication."
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 the Faculty of Engineering, Wadi Alshatti University, Brack-Libya, for their support during the study."

References

[1]. شريفة بن لشهر، هند عمر. تأثير إضافة مخلفات اللدائن على خواص الخلطة الاسفلتية. المؤتمـــر الثاني للعلوم الهندسية والتقنية 29- 30- أكتوبر 2019 جامعة صبراتة - ليبيا
[2]. فؤاد الكوت. تقييم تأثير فتات المطاط المعدل في خصائص الخلطة الإسفلتية الساخنة. المؤتمر الهندسي الثالث تنظيم نقابة المهن الهندسية بالزاوية، 14-15-12-2021.
[3]. Mashaan, N., Ali, A., Karim, M. & Abdelaziz, M. "An overview of crumb rubber modified asphalt." *International Journal of Physical Sciences*, 7(2): 166-170, 2012
[4] شعبية مرزق اللجنة الشعبية للمواصلات والنقل والاتصالات، مشروع صيانة طريق مرزق الفجيج – تراغن أم الأرانب زويله، التقرير النهائي، إعداد مكتب النسر (مهندسون استشاريون) ، النوار، فبراير 2005.
[5] بسام سلطان، عماد فاضل، ديانه عادل مرشد. "تعديل البيتومين المحلي لاستخدامه في خلطات بيتومينية خاصة بمهابط المطارات." *Tishreen University Journal- Engineering Sciences Series*، 23(5). 2011.
[6] سعدون عبيد عيادة، بشار عبد العزيز محمود. "تحسين مواصفات قير هيت كمادة تسطيح بإستخدام مسحوقمطاط الاطارات المستهلكة." *Journal of university of Anbar for Pure science*، 3(3). 2009.
[7] رناء درويش أحمد، رامي حنا ,فاتن فوز. تعديل الخلائط البيتومينية الإسفلتية المستخدمة في محافظة اللاذقية بالمطاط المدور من إطارات السيارات . *Tishreen University Journal-Engineering Sciences Series* 36(3) , 2014.
[8] Salem, H. "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*, 1(2):57-63.2023 .
[9] Salem, H. Rubber-Modified Asphalt for Enhanced Performance in Extreme Heat. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, 2(2):36-40, 2024.
[10] Salem, H. "Enhanced Asphalt Mixture Design for Sustainable Pavements." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, 2(2):31-35, 2024.
[11] Xiao, F.. "Performance of Rubberized Asphalt Mixtures in Wet and Dry Conditions." *Construction and Building Materials*, 23(2), 538-545, 2009.
[12] AASHTO Designation: T51-74, Standard Specification for Highway Materials and Methods of Sampling and testing, part 2. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC -1993.
[13] Abed, A., Thom, N., Lo Presti, D. & Airey, G. "Thermo-rheological analysis of WMA-additive modified binders," Materials and Structures, 53(3), 2020.
[14] Quality controll and test plan - for road works https://methodstatementhq.com/quality-control-in-road-construction-works.html
[15] AASHTO Designation: T49-74, standard specification for Highway Materials and Methods of Sampling and testing, part 2. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC -1993.

6. كانت النتائج في الخلطة المعدلة بي 9% مطاط و5.3% بيتومين متقاربة مع الخلطة المعدلة بنسبة بيتومين 5.6% لهذا فإن الخلطة المعدلة 9% مطاط و5.3% بيتومين أفضل من حيث الاقتصادية.

الخلاصة

لإظهار تحسن خصائص الأسفلت باستخدام المطاط لتعديل الأسفلت، تم إجراء اختبارات مختلفة وفقًا للمواصفات الألمانية والأوروبية، وأظهرت النتائج باستخدام الأسفلت المختلط المختبري المعدل بالمطاط بعض الفوائد مقارنة بالإسفلت القياسي، بما في ذلك زيادة ثبات درجات الحرارة العالية، وتحسين سلوك درجات الحرارة المنخفضة وزيادة قدرة الترابط للإسفلت المعدل بالمطاط.

كان للعينة المضغوطة المختبرية نسبة عالية من الفراغات تعوض تقريبًا عن فوائد تعديل المطاط. وعلى الرغم من نسبة الفراغات العالية، فقد ارتفع ثبات الأسفلت المعدل بالمطاط بنسبة 25٪ وانخفض عمق التآكل بنسبة 20٪. وصلت قوة الشد غير المباشرة وقوة الشد في اختبار الانحناء ثلاثي النقاط مع العينة المعدلة بالمطاط إلى نفس قيم العينة غير المعدلة تقريبًا. وبالتالي، فإن التعديل بالمطاط يعزز خصائص الأسفلت في نطاق درجات الحرارة العالية والمنخفضة، ويحسن الاستقرار وقابلية التشقق ويخفف من قابلية الماء. حتى في الأسفلت غير المضغوط بشكل كافٍ، فإن تعديل المطاط له فوائد كبيرة يمكن إظهارها في الاختبارات المعملية. تحافظ قدرة الترابط المحسنة واللزوجة العالية على خصائص الأسفلت الذي يحتوي على ما يقرب من 9% من الفراغات على مستوى الأسفلت الذي يحتوي على حوالي 6% من الفراغات.

التوصيات

بشرط أن يكون تصميم الخليط مناسبًا وأن تكون عملية الرص والضغط كافية، فإن المطاط المعدل يعطي أسفلتًا عالي الجودة وطويل الأمد يلبي المتطلبات الخاصة للطرق في مناخ صحراوي، مع القدرة على تعويض الانحرافات التي لا مفر منها في المواد والتحضير والرص وضغط الأسفلت. وبالتالي، نوصي باستخدام المطاط لتحسين جودة الأسفلت للطرق الصحراوية.

1. التأكيد على استخدام البيتومين المعدل بالمطاط في صناعة الخلطة الإسفلتية في ليبيا لما لها من فوائد على ديمومة الرصف وتقليل صيانة الطرق.
2. بالاستناد على نتائج البحث نوصي باستعمال نسبة 9%من المطاط في الخلطة المعدلة.
3. ضرورة إجراء الأبحاث والدراسات على تعديل الخلطات الاسفلتية وفق طرق الاختبار الحديثة (طريقة السوبر بيف).
4. اقتراح منهجية مناسبة لتجميع نفايات الإطارات المطاطية، ونقلها إلى مكبات خاصة وتهتم بها المجلس البلدية في الدولة.
5. البحث في إمكانية وجود معامل خاصة تعمل على إعادة تدوير نفايات الإطارات المطاطية حسب الغرض من استخدامها.