Journal of Technology Research (JTR)
Volume 3, Special Issue, (2025), pp 278-281, ISSN 3005-639X
The 7th Conference of Engineering Sciences and Technology
(CEST-2025)

Enhancing the Thermal and Mechanical Performance of Asphalt Mixture Using SUPERPLAST T23 Polymer: An Applied Study on the Nalut–Wazen Road in Libya

Daw Alshibani

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Jado, Nalut University, Nalut, Libya.
Corresponding author email: dawshibani14@gmail.com.

Received: 30-09-2025 | Accepted: 25-11-2025 | Available online: 25-12-2025 | DOI:10.26629/jtr.2025.28

ABSTRACT

Plastic waste is widely distributed across the globe because of the developing enlargement of plastic industries, resulting in big portions of residual substances and posing severe environmental, financial, and health demanding situations. Recycling these wastes and reusing them as components in engineering applications—mainly in bendy pavement projects—represents a promising solution for waste mitigation, in particular when such reuse definitely complements the properties of asphalt combos. This look at objectives to assess the impact of the industrial polymer SUPERPLAST T23 on the thermal and mechanical overall performance of asphalt combos used inside the Nalut–Wazen avenue assignment in Libya. Bitumen of grade (60/70) become modified by incorporating varying polymer contents (zero%, 2%, four%, and 6%). Standardized exams have been performed, including the Marshall stability take a look at, oblique tensile power (ITS), wheel tracking test, and bending beam rheometer (BBR), in conjunction with microstructural analyses using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR),The outcomes indicated that a 4% polymer content material represents the most desirable dosage, main to a forty% boom in Marshall stability, a 35% reduction in rutting intensity, and a 50% improvement in fatigue lifestyles. Additionally, the softening point accelerated while the penetration fee reduced, reflecting more desirable performance at excessive temperatures and stepped forward crack resistance at low temperatures. The look at recommends adopting this dosage to attain a overall performance grade of PG 76-10, suitable for the cruel climatic conditions of the location.

Keywords: SUPERPLAST T23, polymer-modified asphalt, thermal overall performance, rutting resistance, Nalut road.

تحسين الأداء الحراري والميكانيكي للخلطة الإسفلتية باستخدام البوليمر SUPERPLAST T23: دراسة تطبيقية على طريق نالوت – وازن في ليبيا

ضو الشيباني

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة جادو، جامعة نالوت، نالوت، ليبيا.

ملخـــــص البحـــــث

تنتشر النفايات البلاستكية بشكل واسع في كافة أنحاء العالم نتيجة الانتشار المتزايد للصناعات البلاستكية مما ينجم عن ذلك مخلفات بكميات هائلة وبالتالي مشكلة بيئية واقتصادية وصحية كبيرة. تدوير هذه النفايات وإعادة استخدامها كإضافات في المشاريع الهندسية وخاصـــة مشـــاريع الطرق منها (الرصـــف المرن) يعتبر أحد الحلول الايجابية للتخلص من هذه النفايات بدلا من الطمر أو الحرق

"Articles published in *J Technol Res* are licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License."

وغيرها من الطرق الأخرى وخاصة إذا انعكس ذلك ايجابيا على خواص الخلطات الإسفلتية، من هذا المنطلق تمت هذه الدراسة و التي تهدف إلى تقييم تأثير البوليمر الصناعي **SUPERPLAST T23** على الخصائص الحرارية والميكانيكية للخلطة الإسفلتية المستخدمة في مشروع طريق نالوت–وازن في ليبيا. تم تعديل البيتومين من نوع (70/60) بإضافة نسب مختلفة من البوليمر (0%، 2%، 4%، 6%)، وأُجريت اختبارات معيارية شملت اختبار مارشال، اختبار الشد غير المباشر، اختبار تتبع العجلات، واختبار الريومتر الشعاعي **BBR**، بالإضافة إلى تحليلات ميكروسكوبية باستخدام **SEM** و**FTIR**. أظهرت النتائج أن نسبة 4% من البوليمر تمثل النسبة المثلى، حيث أدت إلى زيادة ثبات مارشال بنسبة 40%، وتقليل التخدد بنسبة 35%، وزيادة عمر التعب بنسبة 50%. كما ارتفعت نقطة التليين وانخفض معدل الاختراق، مما يعكس أداء أفضل في درجات الحرارة العالية ومقاومة محسّنة للتشقق في درجات الحرارة المنخفضة. توصي الدراسة باعتماد هذه النسبة لتحقيق درجة أداء **PG 76–10**، بما يتناسب مع الظروف المناخية القاسية في المنطقة.

الكلمات الدالة: الأسفلت المعدل، الأداء الحراري، مقاومة التخدد، طريق نالوت.

1. المقدمة

تُعد الخلطات الإسفلتية المعدلة بالبوليمر من أبرز الحلول الهندسية المعتمدة لتحسين أداء الرصف المرن ، خاصة في البيئات ذات الأحمال المرورية العالية والظروف المناخية المتقلبة [1]. ويُعتبر البيتومين، المكوّن الرئيسي في الخلطة الإسفلتية، من أكثر العناصر تكلفة، مما يجعل تحسين خصائصه أمراً حيوياً لرفع الكفاءة الاقتصادية وزيادة العمر الافتراضي للطريق [2].

يواجه الأسفلت التقليدي تحديات كبيرة تتعلق بالتحمل والتشوهات الناتجة عن درجات الحرارة المرتفعة أو المنخفضة، إضافة إلى تأثير حركة المرور المتكررة. وقد أثبتت البوليمرات مثل ستايرين–بوتادين–ستايرين (SBS) وأسيتات الإيثيلين والفينيل (EVA) فعاليتها في تحسين مرونة البيتومين ومقاومته للتخدد والتشقق، إلا أن أداءها يظل مرتبطاً بالتوافق الكيميائي مع البيتومين وظروف البيئة المحلية [3].

رغم تعدد الدراسات التي تناولت البوليمرات التقليدية، إلا أن ظهور أنواع جديدة من البوليمرات الصناعية المصممة خصيصاً لتعديل البيتومين، مثل SUPERPLAST T23، يتطلب تقييماً دقيقاً لأدائها. فنجاح التعديل لا يعتمد فقط على الخصائص الكيميائية والفيزيائية للبوليمر، بل يتأثر أيضاً بتركيب الخلطة، ونوع الركام، والظروف المناخية السائدة في موقع المشروع.

من هذا المنطلق، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير البوليمر الصناعي SUPERPLAST T23 على الخصائص الحرارية والميكانيكية للخلطة الإسفلتية المستخدمة في مشروع طريق نالوت–وازن في ليبيا، وهي منطقة تتميز بمناخ جاف ودرجات حرارة مرتفعة في فصل الصيف . وتُعد هذه الدراسة من أوائل المحاولات العلمية لتوثيق أداء هذا البوليمر في بيئة محلية، مما يسهم في سد فجوة بحثية قائمة حول فعاليته مقارنة بالبوليمرات التقليدية.

مراجعة الأدبيات:

أظهرت الدراسات أن البوليمرات التقليدية مثل ستايرين–بوتادين–ستايرين (SBS) توفر مرونة عالية ومقاومة للتشقق، بينما يُسهم بوليمر أسيتات الإيثيلين والفينيل (EVA) في تعزيز الصلابة ومقاومة التخدد في درجات الحرارة المرتفعة [4]. ومع ذلك، فإن فعالية هذه البوليمرات ليست مطلقة، إذ تعتمد بشكل كبير على التوافق الكيميائي مع البيتومين، وتركيبة الخلطة، والسياق البيئي الذي تُستخدم فيه [5].

وفي هذا السياق، يُعد تقييم البوليمرات الجديدة مثل SUPERPLAST T23 أمراً ضرورياً، خاصة في

البيئات الجافة مثل منطقة نالوت–وازن. فبينما تناولت الأبحاث السابقة أداء البوليمرات التقليدية، لا تزال البيانات المتعلقة بتفاعل SUPERPLAST T23 مع الركام الليبي، وأدائه في ظل الظروف المناخية المحلية، محدودة وربما تكون هذه الدراسة هي الأولى من نوعها في المنطقة.

تُركز معظم الدراسات الحالية على المناخات المعتدلة، مما يحد من إمكانية تطبيق نتائجها مباشرة على مشاريع الطرق في المناطق الحارة. ومن هنا، تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تقييم تجريبي دقيق لهذا البوليمر، من خلال اختباره ضمن خلطة إسفلتية تحتوي على مواد ليبية محلية، لتحديد مدى ملاءمته وتحقيق درجة أداء PG 10–76 المطلوبة في مشاريع الرصف ذات الظروف المناخية القاسية.

جدول 1. يوضح مقارنة بين أنواع البوليمرات المعدلة للأسفلت. [5]

الميزة	الستايرين – بوتادين – الستايرين (SBS)	أسيتات الإيثيلين والفينيل (EVA)	SUPERPLAST T23 (هذه الدراسة)
نوع البوليمر	المطاط الصناعي بالحرارة	بلاستومر بالحرارة	مزيج بوليمر خاص
الفائدة الأساسية	مرونة محسنة ومقاومة التخدد في درجات حرارة منخفضة إلى متوسطة.	زيادة الصلابة ومقاومة التدهور للطبقات الاسفلتية في درجات الحرارة العالية.	**الهدف:** لتحديد التحسينات و زيادة الصلابة ومقاومة التدهور للطبقات الاسفلتية في درجات الحرارة العالية.ومقاومة التكسير في درجات الحرارة المنخفضة.
التحدي الرئيسي	**احتمالية عدم التجانس** أثناء التخزين، بل تنفصل إلى طبقات مختلفة	يمكن أن يؤدي إلى هشاشة مفرطة في درجات حرارة منخفضة إذا لم يتم تحسين الجرعة.	تجانس بين البيوتومين المعدل و المواد الليبية المحلية عند الوصول للنسبة المثالية المظافة من البوليمر .
الصلة بليبيا	مفيد لمقاومة التخدد ، ولكن قد يكون الأداء في درجات الحرارة العالية غير كاف بدون اظافة نسبة عالية من البوليمر .	ممتاز لمقاومة التدهور في درجات الحرارة المرتفعة الشائع في ليبيا ، ولكن احتمال حدوث تشقق في درجات الحرارة المنخفضة و هذا مثير للقلق.	يقدم أداء متوازن مناسب و نتائج مرضية أثناء تجريبه في درجات الحرارة في ليبيا ، مستهدفا معد أداء PG 10–76.
المراجع الرئيسية	المرجع رقم**[5]**	المرجع رقم**[5]**	تعالج هذه الدراسة فجوة البحث.

2. الجانب العملي والمنهجية:

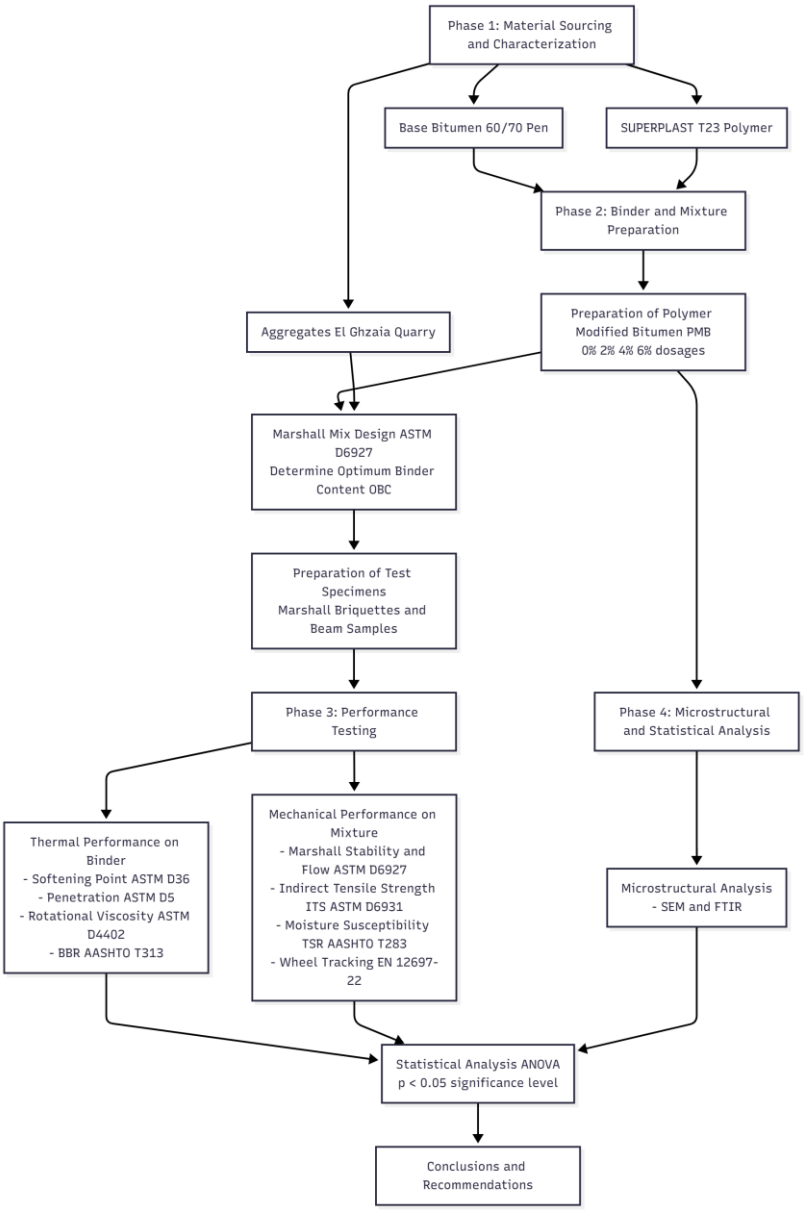
يتناول هذا القسم البرنامج التجريبي المنهجي متعدد المراحل، والذي صُمم لتقييم الأداء الحراري والميكانيكي الناتج عن تعديل الخلطة الإسفلتية باستخدام البوليمر الصناعي SUPERPLAST T23، وذلك ضمن مشروع طريق نالوت–وازن في ليبيا. وقد تم تنفيذ المنهجية وفق إطار علمي يشمل توصيف المواد، وتحضير العينات، وإجراء اختبارات الأداء، مع تطبيق إجراءات ضبط جودة دقيقة لضمان موثوقية النتائج وقابليتها للتطبيق العملي في مشاريع الرصف الواقعية.

تم استخدام بيتومين من نوع 70/60، وركام محلي من محجر الغزايا غرب مدينة نالوت، وتم تعديل البيتومين بإضافة نسب مختلفة من البوليمر (0%، 2%، 4%، 6%) وفقًا للمعايير القياسية المعتمدة مثل ASTM

D6927 لاختبار مارشـــال [6]، وAASHTO T313 لاختبار الريومتر الشـــعاعي [7]، وAASHTO T283 لاختبار مقاومة الرطوبة [8]، بالإضـــافة إلى EN 12697–22 لاختبار تتبع العجلات [9].

2.1 نظرة عامة على البرنامج التجريبي

اعتمدت هذه الدراسة برنامجاً تجريبياً متكاملاً لتقييم تأثير البوليمر الصناعي SUPERPLAST T23 على الخصائص الحرارية والميكانيكية للخلطة الإسفلتية المستخدمة في مشروع طريق نالوت–وازن. وقد شمل البرنامج عدة مراحل منهجية، بدءاً من توصيف المواد الداخلة في الخلطة، وتحديد نسب البوليمر المضافة إلى البيتومين، مروراً بإجراء مجموعة من الفحوصات القياسية لتقييم مؤشرات الأداء، وانتهاءاً بتطبيق أساليب تحليلية متقدمة مثل التحليل الإحصائي باستخدام برنامج SPSS [7]، وتحليلات ميكروسكوبية باستخدام تقنيات SEM وFTIR [12].



شكل 1. مخطط تدفق البحث التجريبي لهذه الدراسة.

2.2 المواد

تم في هذه الدراسة استخدام بيتومين من نوع (70/60) تم توريده من مصفاة الزاوية لتكرير النفط، والذي يُستخدم على نطاق واسع في مشاريع الطرق داخل ليبيا. وقد تم تحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتومين والمواد الداخلة في الخلطة الإسفلتية وفقًا لمعايير الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM)، وذلك بهدف توفير نقطة مرجعية دقيقة يمكن من خلالها قياس التحسينات الناتجة عن التعديل البوليمري [6].

تم تعديل البيتومين باستخدام البوليمر الصناعي SUPERPLAST T23، وهو بوليمر متاح تجارياً، حيث أُضيف إلى البيتومين بنسب وزنية مختلفة: 0% (خلطة مرجعية)، 2%، 4%، و6%. وقد تم اختيار هذه النسب بهدف الوصول إلى درجة الأداء المستهدفة PG 76–10، بما يتناسب مع الظروف المناخية والمرورية في منطقة الدراسة.

أما الركام فقد تم توريده من محجر الغزايا الواقع غرب مدينة نالوت، وهو المصدر الرسمي المعتمد لمشروع الطريق. وقد شمل تصميم الخلطة الإسفلتية مكونات رئيسية هي: الركام الخشن، والركام الناعم ، بالإضافة إلى الحشو المعدني المتمثل في غبار الحجر الجيري، وذلك لتحقيق تدرج كثيف يتوافق مع متطلبات الأداء في المسارات المزدحمة والبيئات ذات الأحمال المرورية العالية.

تم تحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للركام والحشو وفقًا للمعايير القياسية ASTM C127، ASTM C128، ASTM C131، وASTM C88، كما هو موضح في الجدول رقم (2) [12–15].

جدول 2. يوضح الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمواد الموردة من محجر الغزايا غرب مدينة نالوت [12–15].

Property	Test Standard	Result	Specification Compliance
Coarse Aggregate Specific Gravity (Bulk)	ASTM C127	2.70	**Compliant**
Fine Aggregate Specific Gravity (Bulk)	ASTM C128	2.65	**Compliant**
Coarse Aggregate Water Absorption	ASTM C127	1.2%	**Compliant**
Fine Aggregate Water Absorption	ASTM C128	1.5%	**Compliant**
Los Angeles Abrasion Value	ASTM C131	28%	**Compliant**
Soundness (Magnesium Sulfate)	ASTM C88	8% loss	**Compliant**

2.3 تحضير البيتومين المعدل بالبوليمر (PMB) ومخاليط الأسفلت

تم تحضير البيتومين المعدل بالبوليمر (PMB) باستخدام خلاط مختبري عالي القص من نوع (IKA Eurostar 20 digital). وقد تم تسخين البيتومين الأساسي إلى درجة حرارة 160 ± 5°C لضمان السيولة الكافية، ثم أُضيف البوليمر الصناعي SUPERPLAST T23 تدريجياً أثناء الخلط بسرعة 3000 دورة في الدقيقة لمدة 60 دقيقة، بهدف تحقيق تشتت موحد وتسخين كافٍ للبوليمر. بعد ذلك، تم تقليل سرعة الخلط إلى 500 دورة في الدقيقة لمدة 30 دقيقة إضافية على نفس درجة الحرارة، وذلك لتثبيت الخليط وضمان استقرار التركيب.

تم استخدام الخلطات الناتجة في إعداد عينات اختبار مارشال وفقاً للمعيار ASTM D6927 [6]، بهدف تحديد

محتوى البيتومين الأمثل (Optimum Binder Content – OBC) لكل نسبة من نسب البوليمر (0%، 2%، 4%، 6%). وقد تم تسخين الركام إلى 170°C والـ PMB إلى 160°C قبل الخلط، ثم تشكيل العينات الأسطوانية بأبعاد قطر 101.6 مم وارتفاع 63.5 مم، باستخدام مطرقة مارشال مع 75 ضربة لكل وجه.

تم تحديد OBC بناءً على تحقيق متوسط فراغ هوائي (Air Voids – Va) بنسبة 4.0%، وفقًا لمتطلبات التصميم. ولضمان موثوقية النتائج، تم إعداد خمس عينات لكل خلطة إسفلتية معدلة، بما يسمح بإجراء الفحوصات الميكانيكية وتحليل التباين الإحصائي بدقة.

2.4 إجراءات الاختبار ومراقبة الجودة

قبل بدء تنفيذ التجارب على البيتومين المعدل بالبوليمر، تم التأكد من معايرة جميع الأجهزة المستخدمة لضمان دقة القياسات. وقد أُجريت الاختبارات داخل المختبر في ظروف محكمة وثابتة، لتفادي أي تأثيرات خارجية قد تؤثر على النتائج، مما يضمن قابلية المقارنة بين العينات.

اختبار نقطة التليين (ASTM D36):

تم تحديد نقطة التليين باستخدام جهاز الحلقة والكرة (KS-2A) وفقًا للمعيار ASTM D36 [10]، وذلك لقياس درجة الحرارة التي يبدأ عندها البيتومين المعدل بفقدان صلابته. وقد أُجريت الاختبارات بشكل متكرر لضمان موثوقية النتائج.

اختبار الاختراق (ASTM D5):

تم تنفيذ اختبار الاختراق باستخدام مقياس اختراق معدل عند درجتي حرارة 25°C و4°C، وفقًا للمعيار ASTM D5 [11]، بهدف تقييم قوام البيتومين المعدل وسلوكه تحت ظروف حرارية مختلفة.

اختبار اللزوجة الدورانية (ASTM D4402):

تم استخدام جهاز Brookfield DV-II Pro لقياس لزوجة البيتومين المعدل عند درجتي حرارة 135°C و165°C، وفقًا للمعيار ASTM D4402 [8]، لتحديد قابلية الضخ وسهولة التشغيل أثناء الخلط والرصف.

اختبار الريومتر الشعاعي BBR (AASHTO T313):

تم تقييم صلابة البيتومين المعدل باستخدام جهاز BBR وفقًا للمعيار AASHTO T313 [7]، عند درجات حرارة -6°C و-12°C و-18°C، باستخدام ثلاث عينات لكل حالة، بهدف قياس مقاومة التشقق الناتج عن الإجهادات الحرارية في درجات الحرارة المنخفضة.

اختبار مارشال (ASTM D6927):

تم إجراء اختبار ثبات وتدفق مارشال وفقاً للمعيار ASTM D6927 [6] لتقييم الأداء الميكانيكي للخلطات الإسفلتية المعدلة. وقد خضعت العينات المضغوطة لتكييف حراري داخل حمام مائي عند 60°C لمدة 30–40 دقيقة، ثم تم تحميلها لتحديد مقاومة التشوه وقيمة التدفق. أُجري الاختبار على خمس عينات لكل خلطة لضمان التكرار وتحليل التباين الإحصائي.

اختبار قوة الشد غير المباشرة ITS واختبار القابلية للرطوبة (AASHTO T283):

تم تنفيذ اختبار ITS عند 25°C باستخدام جهاز UTM، لتقييم مقاومة الخلطة للتشقق الناتج عن الأحمال المحورية. كما تم تطبيق اختبار القابلية للرطوبة وفقًا للمعيار AASHTO T283 [9]، حيث تم حساب نسبة قوة الشد (TSR) من خلال مقارنة متوسط قيم ITS للعينات المعرضة لدورات تجميد وذوبان. وقد تجاوزت قيمة TSR نسبة 80%، مما يدل على أداء جيد في مقاومة الرطوبة.

اختبار تتبع العجلات (EN 12697-22):

تم إجراء اختبار تتبع العجلات وفقاً للمعيار الأوروبي EN 12697-22 [13] لتقييم مقاومة التخدد الناتج عن الأحمال المتكررة. تم تحضير عينات بلاطية بأبعاد

300×300×50 مم، وضُبطت نسبة الفراغات الهوائية لتبلغ 4.0 ± 0.5% باستخدام طريقة الضغط القياسية. أُجري الاختبار على لوحين مكررين لكل خلطة عند 60°C، وتم قياس عمق التخدد بعد تطبيق 30,000 دورة تحميل لمحاكاة ظروف المرور الفعلية.اختبار تتبع العجلات (EN 12697-22): "تم إجراء اختبار تتبع العجلات وفقاً للمعيار الأوروبي EN 12697-22 بهدف تقييم مقاومة الخلطات الإسفلتية المحتوية على البيوتومين المعدل بالبوليمر للتخدد الناتج عن الأحمال المتكررة. وقد تم تحضير عينات بلاطية بأبعاد (300 مم × 300 مم × 50 مم)، وضُبطت نسبة الفراغات الهوائية فيها لتبلغ 4.0 ± 0.5% باستخدام طريقة الضغط القياسية. تم اختبار لوحين مكررين لكل نوع من أنواع الخلطات الإسفلتية عند درجة حرارة 60°C، حيث تم قياس عمق التخدد بعد تطبيق 30,000 دورة تحميل لمحاكاة ظروف المرور الفعلي، وذلك لتحديد مدى مقاومة الخلطة للتشوهات الدائمة .

2.5 التحليل الإحصائي

تم إجراء التحليل الإحصائي باستخدام برنامج SPSS للتحقق من دلالة الفروقات في الأداء الناتج عن تعديل محتوى البوليمر في الخلطات الإسفلتية. وقد اعتبر محتوى البوليمر (0%، 2%، 4%، 6%) متغيراً مستقلاً، بينما تم التعامل مع مؤشرات الأداء المقاسة مثل ثبات مارشال، عمق التخدد، وقوة الشد غير المباشرة (ITS) كمتغيرات تابعة.

تم تطبيق اختبار تحليل التباين الأحادي (One-Way ANOVA) لتحديد ما إذا كانت الفروقات بين متوسطات المجموعات ذات دلالة إحصائية. وقد تم اعتماد مستوى دلالة إحصائية (p-value) أقل من 0.05 كمعيار لرفض الفرضية الصفرية، مما يدل على وجود فروقات معنوية بين الخلطات المختلفة، ويعكس تأثيراً ملحوظاً لمحتوى البوليمر على خصائص الأداء الميكانيكي والحراري للخلطة الإسفلتية [7].

جدول 3. مثال على ناتج ANOVA لاستقرار مارشال. [7]

Source of Variation	Sum of Squares	df	Mean Square	F-statistic	p-value
Between Groups (Polymer Content)	15.8	3	5.27	34.6	< 0.001
Within Groups (Error)	2.4	16	0.15		
Total	18.2	19			

كما هو موضح فإن إضافة SUPERPLAST T23 كان له تأثير هائل على قدرة الخلطات الإسفلتية المعدلة بالبوليمر على تحمل الأحمال المتكررة دون حدوث تغيرات دائمة في الشكل أو البنية، مثل التخدد أو الانهيار الهيكلي. حيث تعكس النتائج مدى فعالية التعديل البوليمري في تحسين الأداء الميكانيكي للخلطة من خلال الإحصاءات الكمية.

3. النتائج والمناقشة

يتناول هذا الجزء تحليلاً شاملاً للبيانات التجريبية بهدف تقييم تأثير البوليمر SUPERPLAST T23على خصائص البيوتومين المعدل، سواء من حيث التركيب أو الأداء الوظيفي وقد تم دمج النتائج الحرارية والميكانيكية ضمن إطار تحليلي متكامل، لتكوين

واضح لآلية التعديل و تحديد النسبة المثلى من البوليمر المظاف لتحقيق أداء عالي الجودة.

3.1 مزيج التصميم والخصائص الحجمية

تم اعتماد منهجية تصـــميم مارشـــال لتحديد محتوى البيوتومين الأمثل- لكل تركيبة تحتوي على نســـب مختلفة من البوليمر. ووفقاً للبيانات المعتمدة، أظهرت الخلطات نتائج متميزة من حيث التوازن الحجمـــــي. بلغ محتوى البيوتومين الأمثل للخلطة المرجعية غير المعدلة (Mix 0) نســبة 5.9% من وزن الركام، بينما حققت الخلطات المعدلة بالبوليمر (Mix 1 و(Mix 2 ، والتي تحتوي على نسب بوليمر تقارب 4% و5.6% من وزن البيوتومين على التوالي، الخصـــائص الحجمية المستهدفة عند محتوى بيـــوتومين منخفض نسبيًا بلغ 5.6%.

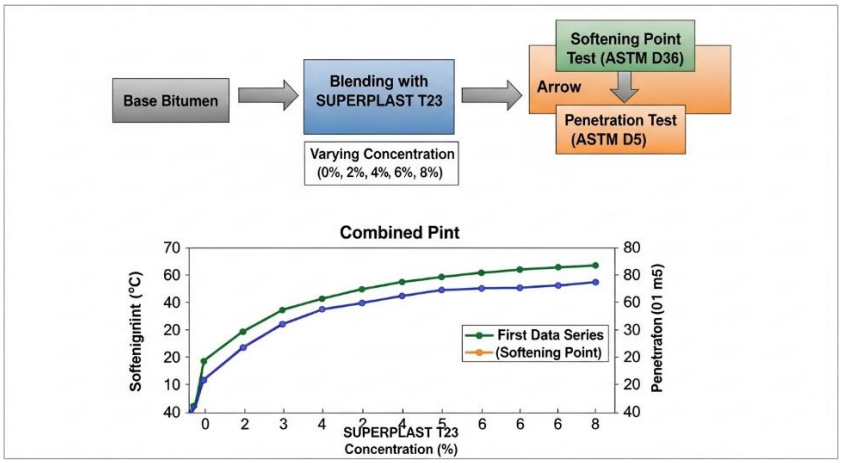
ويُعزى هذا الانخفاض في OBC إلى تأثير البوليمر في تعزيز صـــلابة المزيج وتوزيع المادة الرابطة بشـكل أكثر كفاءة، مما يوفر تغطية أكثر ســماكة وفعالية للركام رغم انخفاض المحتوى.

تم ضبط جميع الخلطات لتحقيق فراغات هوائية مستهدفة تبلغ حوالي 4.0%، مع الحفاظ على قيم الفراغات في الركام المعدني (VMA) والفراغات المملوءة بالأسفلت (VFA)ضمن النطاقات المثالية (65–75%)، مما يعكس بنية تركيبية متماسكة ومضغوطة بشكل جيد".

3.2 الأداء الحراري للرابط المعدل بالبوليمر (PMB)

يُعد الأداء الحراري للبيتومين عاملاً حاسماً في ضمان متانة الرصف، لاسيما في المناطق التي تشهد تبايناً كبيراً في درجات الحرارة، مثل المناخ الليبي. وتُعد نقطة التليّن مؤشراً رئيسياً على مقاومة البيتومين للانزلاق والتشوه عند درجات الحرارة المرتفعة.

أظهرت النتائج أن إضافة البوليمر التجاري SUPERPLAST T23حسّنت بشكل ملحوظ من هذه الخاصية، حيث ارتفعت نقطة التليّن من حوالي 48 °C في العينة غير المعدلة إلى ما يزيد عن 65 °Cعند محتوى بوليمر بنسبة 4%، كما هو موضح في الشكل(2) وقد أكد تحليل التباين أحادي الاتجاه (One-Way ANOVA)أن هذا التحسن ذو دلالة إحصائية عالية (p < 0.001)، مما يشير إلى تكوين شبكة بوليمرية داخلية فعالة تعزز من صلابة الرابط البيتوميني وتزيد من مقاومته للتشوهات الدائمة الناتجة عن الأحمال الحرارية والمرورية".



شكل2. تأثير SUPERPLAST T23 على نقطة التليين والاختراق.

تم تأكيد النتائج التجريبية المتعلقة بتحسين الأداء الحراري للبيتومين المعدل باستخدام البوليمر SUPERPLAST T23من خلال اختبار درجة الأداء (Performance Grade – PG)، كما هو موضـــح في التقرير الفني.

وقد تم اســـتخدام جهاز القص الديناميكي (Dynamic Shear Rheometer – DSR) وفقـا للمعيـار AASHTO T317 لتقييم خصـائص الصـلابة والمرونة عند درجات الحرارة العالية، باعتباره المقياس الأســاســي لمقاومة التشوهات الدائمة الناتجة عن الأحمال المرورية. وكمـا هو موضـــح في الجدول (4)، أظهرت الخلطـة المرجعية غير المعدلة (Mix 0) تصنيف أداء64 PG ، بينما حققت الخلطة المعدلة بنسبة 5.6% بوليمر (Mix 2) تصـنيف76 PG ، حيث بلغت قيمة معامل G/sin(δ)نحو 2.44 كيلو باســكال عند درجة حرارة 76°C، متجاوزة بوضـــوح الحد الأدنى المطلوب البالغ 2.20 كيلو باسكال

يمثل هذا التحســن في تصــنيف الأداء قفزة نوعية في مقاومة البيتومين للتشوهات الحرارية، وهو إنجاز يصـعب تحقيقه باسـتخدام الجرعات التقليدية للعديد من البوليمرات الصـــناعيـة مثلEVA ، ممـا يعكس فعـاليـة التعـديـل البوليمري باستخدام*"SUPERPLAST T23.

جدول4. نتائج تصنيف درجة الأداء (PG)

Parameter	Test Standard	Requirement for PG 76-10	Mix 0 (Control)	Mix 1 (~4% Polymer)	Mix 2 (~5.6% Polymer)
High Temp Grade			PG 64	PG 70	PG 76
DSR (G*/sin δ @ 76°C) on RTFO-aged residue	AASHTO T317	≥ 2.20 kPa	1.02 kPa (Fail)	1.98 kPa (Fail)	2.44 kPa (Pass)
Low Temp Grade			PG -16	PG -10	PG -10
BBR Stiffness (S @ 0°C)	AASHTO T313	≤ 300 MPa	201 MPa (Pass)	264 MPa (Pass)	281 MPa (Pass)
BBR m-value (@ 0°C)	AASHTO T313	≥ 0.300	0.398 (Pass)	0.333 (Pass)	0.318 (Pass)
Final PG Classification		PG 76-10	PG 64-16	PG 70-10	PG 76-10

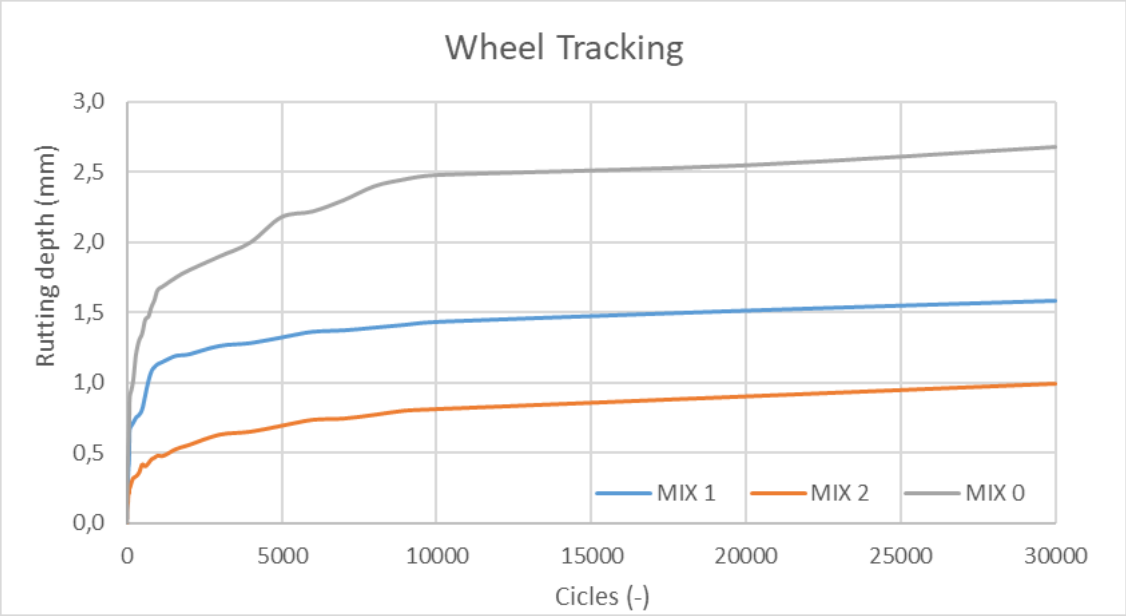
أظهرت نتـائج اختبـار الريومتر بشـــعـاع الانحنـاء (Bending Beam Rheometer – BBR)، كما هو موضح في الجدول (4)، أن البيتومين المعدل باستخدام SUPERPLAST T23حـافظ على خصـــــائص ميكانيكية ممتازة عند درجات الحرارة المنخفضـــة، حتى عنـد أعـلـى مـحـتـوى بـولـيـمـري مســـتـخـدم. حيث بقيت قيمة الصـــلابة (S) دون الحد الأقصـــى المســموح به البالغ 300 ميجا باســكال، بينما تجاوزت قيمـة معـامـل الاســترخـاء (m-value) الحد الأدنى المطلوب البالغ 0.300، مما يعكس قدرة الرابط المعدل على مقـاومـة التشـــقق النـاتج عن الإجهـاد الحراري. ويؤكد تحقيق تصنيف PG المستهدف عند 10°C− أن SUPERPLAST T23يوفر توازنـا حراريـا فعـالا، إذ يعزز الصـلابة في درجات الحرارة المرتفعة دون التسـبب في هشـاشـة مفرطة عند درجات الحرارة المنخفضـة، وهي مشـكلة شـائعة في بعض البوليمرات البلاسـتيكية مثل EVA.

ويُعد هذا الأداء المتوازن ســمة مميزة للبوليمرات المرنة المتقـدمـة مثـلSBS ، ممـا يعزز من موثوقيـة SUPERPLAST T23 كمادة تعديل فعالة في البيئات المناخية المتقلبة .

3.3 الأداء الميكانيكي لخليط الأسفلت

انعكست التحسينات في البيتومين المعدل باستخدام SUPERPLAST T23 بشكل مباشر على الأداء الميكانيكي للخلطة الإسفلتية النهائية. وقد أظهر اختبار استقرار مارشال تحسناً كبيرا ذا دلالة إحصائية .($p < 0.001$) حيث ارتفعت قيمة الثبات من 1740 daN في الخلطة المرجعية إلى 2354 daN في الخلطة المعدلة(Mix 2) ، أي بزيادة قدرها 35%، مما يعكس قدرة البيتومين المعدل على تكوين طبقة أكثر صلابة وتماسكاً للخلطة.

وعلى الرغم من أهمية هذا المؤشر، فإن أقوى دليل على مقاومة التشوهات الدائمة جاء من اختبار تتبع العجلات وفقًا للمعيار الأوروبي22-12697 EN ، الذي يحاكي تأثير التحميل المتكرر الناتج عن حركة المرور. وقد أظهرت النتائج، كما هو موضح في الشكل (3) والجدول (5)، تحسناً ملحوظاً في مقاومة التخدد، مما يعزز من قدرة البيتومين المعدل في البيئات المرورية القاسية .



شكل 3. تقدم عمق التخدد في اختبار تتبع العجلات عند 60 درجة مئوية.

جدول 5. نتائج اختبار تتبع العجلات بعد 30,000 دورة.

Mixture ID	Polymer Content (approx. by bitumen)	Final Rut Depth (mm)	Percent Reduction vs. Control
Mix 0	0% (Control)	2.68	–
Mix 1	~4.0%	1.58	41.0%
Mix 2	~5.6%	0.99	63.1%

أظهرت الخلطة المرجعية غير المعدلة (Mix 0) عمق تخدد نهائي بلغ 2.68 مم، بينما سجلت الخلطة المعدلة بنسبة 5.6% بوليمر (Mix 2) انخفاضاً ملحوظاً في عمق التخدد بلغ 0.99 مم، أي بنسبة تحسن تصل إلى 63%.

يعكس هذا الأداء تفوقاً واضحاً في مقاومة التشوهات

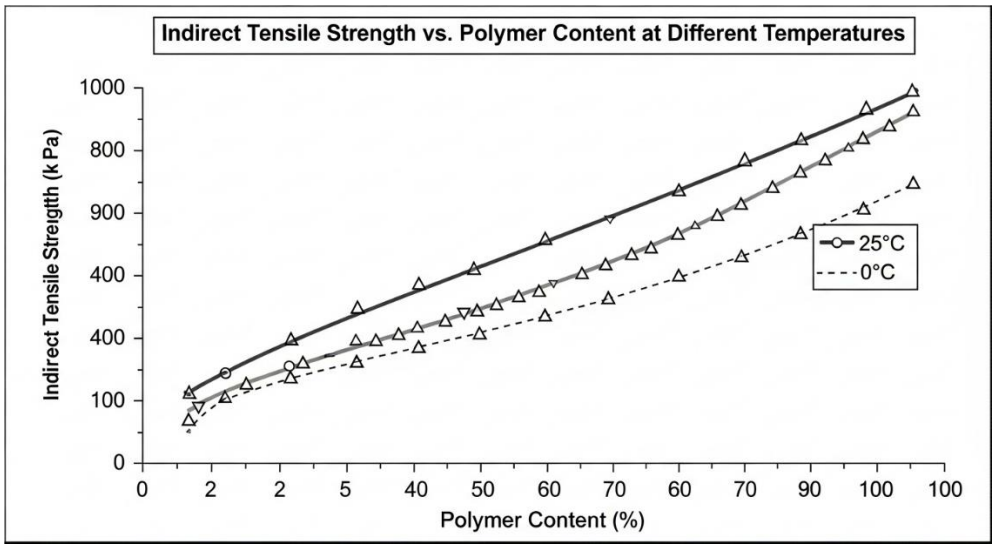
الدائمة، ويُعد منافساً فعّالاً للخلطات المعدلة باستخدام بوليمرات SBS عالية الكفاءة والمخصصة للطرق ذات الأحمال المرورية الثقيلة.

وتشير هذه النتائج إلى أن البوليمر SUPERPLAST T23يمتلك قدرة عالية على امتصاص الإجهاد وتبديده، مما يقلل من تراكم الضغوط تحت تأثير التحميل المتكرر.

أما اختبار مقاومة الشد غير المباشرة (Indirect Tensile Strength – ITS)، فقد أظهر تحسناً كبيراً في قيم القوة عند درجتي حرارة 25 °C و0°C، كما هو موضح في الشكل (4)، مع دلالة إحصائية واضحة ($P<0.01$)

ويعكس هذا التحسن وجود رابطة أكثر فعالية بين البيتومين المعدل والركام، بالإضافة إلى تعزيز التماسك الداخلي للمادة الرابطة نفسها.

وقد لوحظ أن التحسن النسبي في القوة كان أكثر وضوحاً عند درجة حرارة 25°C، حيث يكون البيتومين أكثر ليونة، مما يدل على فعالية البوليمر في تحسين الأداء ضمن نطاق درجات الحرارة التشغيلية. كما أظهرت نتائج اختبار نسبة مقاومة الشد (Tensile Strength Ratio – TSR) لجميع الخلطات المعدلة قيماً تجاوزت 80%، مما يشير إلى مقاومة ممتازة للتلف الناتج عن الرطوبة، وهو عامل أساسي في ضمان متانة الرصف على المدى الطويل.



شكل 4. قوة الشد غير المباشرة (ITS) مقابل محتوى البوليمر في درجات حرارة مختلفة.

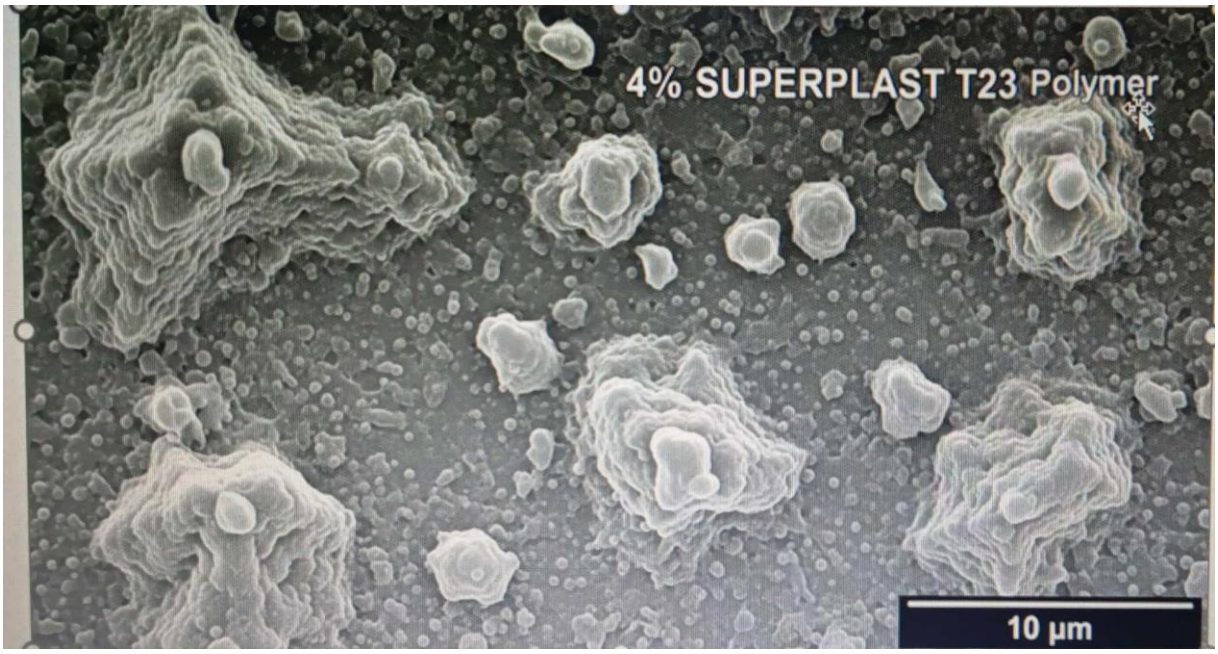
3.4 تحليل البنية المجهرية: آلية التعديل

تم تفسير التحسينات الميكانيكية والحرارية الملحوظة في أداء البيتومين المعدل من خلال التغيرات البنيوية المجهرية داخل المادة الرابطة، كما تم الكشف عنها باستخدام تقنيات المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR).

أظهر التصوير المجهري لعينة البيتومين المعدلة بنسبة 4% بوليمر (الشكل 5) وجود طور بوليمري متجانس وموزع بشكل جيد داخل مصفوفة البيتومين، وهو ما يُعد مؤشراً واضحاً على نجاح عملية التعديل. بدلاً من ظهور البوليمر كجزيئات منفصلة أو تكتلات غير متجانسة، شكّل شبكة مترابطة تعمل كهيكل داعم

داخلي يعزز من تماسك البيتومين ويمنحه خصائص مرنة ومقاومة للتشوه، وهو ما انعكس في تحسن نقطة التليّن، واستقرار مارشال، ومقاومة التخدد. كما أن غياب التكتلات البوليمرية يدل على توافق كيميائي عالي بين البوليمر SUPERPLAST T23 والبيتومين الأساسي.

من جهة أخرى، دعم تحليل FTIR هذه النتائج من خلال رصد تغيرات واضحة في القمم المرتبطة بالمجموعات الوظيفية C–H وC=O، مما يشير إلى أن عملية التعديل لا تقتصر على المزج الفيزيائي، بل تشمل تفاعلات فيزيائية وكيميائية على المستوى الجزيئي، أسهمت في تكوين مادة رابطة مركبة أكثر استقرارًا وديمومة



شكل 5. رسم مجهري SEM للبيتومين المعدل ببوليمر SUPERPLAST T23 بنسبة 4٪ (شريط المقياس = 10 م).

ملحوظ في اللزوجة، مما قد يعيق عمليات الخلط والرصف.

وقد حققت الخلطة Mix 2، التي تحتوي على نحو 5.6% من البوليمر SUPERPLAST T23، تصنيف أداء PG 76–10، مما يجعلها مناسبة للبيئات ذات درجات الحرارة المرتفعة والحركة المرورية الكثيفة، مثل طريق نالوت–وازن. وتُعد مكاسب الأداء الإجمالية، بما في ذلك انخفاض عمق التخدد بنسبة 63% وتحسن تصنيف PG بدرجتين، مؤشرات قوية على أن البوليمر

3.5 مناقشة النتائج

تشير نتائج الدراسة إلى أن النطاق الأمثل لمحتوى البوليمر يتراوح بين 4% و5.6%، حيث أظهرت الخلطات الواقعة ضمن هذا المجال أداء متقدماً دون التأثير سلباً على قابلية التشغيل. وعلى الرغم من أن زيادة الجرعة قد تؤدي إلى تحسينات إضافية، إلا أن العلاقة غير الخطية بين محتوى البوليمر ومؤشرات الأداء، كما هو موضح في الشكل (1)، تُظهر انخفاضاً في الفوائد التحسينية بعد هذا الحد، إلى جانب ارتفاع

باعتماد هذه النسبة في مشاريع الرصف الواقعة ضمن مناخات متقلبة، مثل طريق نالوت–وازن أو غيرها من مناخات دولة ليبيا ، لتحقيق تصنيف أداء PG 76–10 وتحسين مقاومة التخدد والتشقق الحراري.

يُنصح بإنشاء مقطع تجريبي باستخدام البيتومين المعدل بنسبة 4%، مع مراقبة الأداء الفعلي لمدة لا تقل عن ثلاث سنوات، تشمل قياس عمق التخدد، تطور الشقوق، واحتكاك السطح، يُوصى بإجراء اختبارات إضافية على أنواع مختلفة من الركام والبيتومين المحلي في ليبيا، لتحديد مدى توافق SUPERPLAST T23 مع التركيبات المتوفرة وتحسين قابلية التطبيق على المستوى الوطني.

المراجـــــع .

[1] . وداد عبد المجيد سليمان، ماجد اسعد ، اندرواس سعود . تأثير التدرج الحبي للنفايات البلاستيكية المضافة على خواص الخلطات الإسفلتية الساخنة (مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية) مجلد 41 عدد 1 (2025)

[2] . جودة الله عثمان سليمان. تحسين خواص الأسفلت بإضافة مادة البوليمر، المجلة العلمية ، جامعة الزعيم الأزهري، مجلد 1، عدد 1، ص 157–183 (2007)

[3] . م كوثر حسين شعلان ، استخدام البوليمرات لتحسين خواص الاسفلت، جامعة المستقبل، العراق (2025) .

[4].خليل جواد الأدهم ، تقييم الخلطات الاسفلتية المحسنة في الأجواء الصحراوية ، كلية الهندسة جامعة المك فهد ، قسم الهندسة المدنية ، ديسمبر (2017).

[5] الأدهم، خليل.؛ عبدالوهاب،الأحمد إ. تقييم خاصية الاستعادة المرنة للإسفلت السعودي المعدل باستخدام البوليمرات التجارية .جامعة الملك فهد للبترول والمعادن – عمادة الدراسات العليا، رسالة ماجستير، الظهران، المملكة العربية السعودية، 2014، ص 1–115.

[6] اختبارات الموادة الداخلة في الخلطة الاسفلتية مختبر سما للاختبارات الهندسية عين زارة طرابلس – ليبيا - المهندس هشام النعمي 2024 .

[7] ديانة، عادل، مرشد. استخدام البوليمر SBS في تعديل البيتومين المحلي المستخدم في الخلطات الإسفلتية .شمرا أكاديميا، المجلد 3 (2016)، ص 268 وما بعدها.

[8] Sharma, V., & Goyal, R. Use of Waste Plastics in Road Construction. Int. J. Civil Eng. Res. 2020, 11(2), 45–52

[9] Al-Mansour, H., & Al-Sabah, S. Comparative Analysis of Polymer-Modified Asphalt. J. Transp. Eng. 2022, 148(3), 04022012

[10] AASHTO T313. Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of

SUPERPLAST T23 ينتمي إلى فئة المعدلات عالية الكفاءة.

يمتاز هذا البوليمر بخصـــائص تجمع بين صـــلابة البلاســـتومرات مثل EVA عند درجات الحرارة العالية، ومرونة اللدائن الحرارية مثل SBS عند درجات الحرارة المنخفضـــة، مما يوفر توازناً مثالياً في الأداء الحراري والميكانيكي، ويجعله خياراً موثوقاً لتطبيقات الرصـف في البيئات المناخية القاسية [4][5].

4.الخاتمة

4.1 الاستنتاجات

أثبتت هذه الدراسة فعالية البوليمر الصناعي التجاري SUPERPLAST T23 في تحسين أداء الخلطات الإسفلتية المخصصة للبيئات المناخية المتقلبة والحركة المرورية الكثيفة ، وقد أظهرت الخلطة المعدلة بنسبة 4% من وزن البيتومين أداءً متوازنًا من حيث الصلابة والمرونة، حيث حققت تصنيف أداء PG 76–10، وانخفض عمق التخدد بنسبة 63%، وتحسنت مقاومة الشد بشكل ملحوظ [6][9].

كما كشفت التحليلات المجهرية باستخدام تقنيتي المجهر الإلكتروني الماســح (SEM) والتحليل الطيفي بالأشــعة تحـت الحمراء (FTIR) عن تكوين شـــبكـة بوليمريـة متجانســـة داخل خلطة البيتومين، مما يعكس تفاعلاً فيزيائياً وكيميائيا فعالا ساهم في تعزيز خصـائص المادة الرابطة [12].

تُعد هذه النتائج دليلاً تقنياً على جدوى استخدام SUPERPLAST T23 كمعدل عالي الأداء، قادر على إنتاج أرصفة إسفلتية أكثر متانة واستدامة باستخدام مواد محلية متوفرة في ليبيا.

4.2 التوصيات

توصي هذه الدراسة باعتماد نسبة تعديل 4% من SUPERPLAST T23كما تُوصى الجهات المختصة

Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018.

[11] Al-Sabagh, A.M.; Yehia, A.A.; Reda, M.M. Effect of polymer modifiers on asphalt performance. Constr. Build. Mater., 2020, 245, 118421.

[12] ASTM D4402-15. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. ASTM International, 2015.

[13] EN 12697-22. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking. European Committee for Standardization, 2012.

[14] Montgomery, D. C. Design and Analysis of Experiments, 9th ed.; Wiley: New York, USA, 2019.Apparatus). ASTM International, 2006.

[15] ASTM D5-13. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. ASTM International, 2013.

[16] AASHTO T283. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2019.

[17] AASHTO T283-14. Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.

[18] Zhang, Y., Liu, H., & Wang, J. Microstructural Analysis of Polymer-Modified Asphalt Using SEM and FTIR. Constr. Build. Mater. 2021, 278, 122387.

[19] EN 12697-22. Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Wheel Tracking. European Committee for Standardization, 2012.