Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (3) ( JUNE, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) العدد 3 يونيو 2026
ردمد: 3135-2359

# تحسين استخدام المواد المستعملة في رصف الطرق في المناطق الصحراوية

## دراسة وصفية تحليلية: مناطق الجنوب الليبي

علي أمنه الصادق أنفني
المعهد العالي للعلوم والتقنية البركت/ ليبيا

# Improving the Use of Materials Used in Road Paving in Desert Areas

## A Descriptive and Analytical Study: Southern Libya

Ali Amna Al-Sadiq Anfani
Higher Institute of Science and Technology, Al-Barakat / Libya
Email: anfne14@gmail.com

تاريخ الاستلام: 2026/04/03 تاريخ المراجعة 05/02/ 2026 تاريخ القبول:2026/05/15- تاريخ النشر: 05/06/ 2026

**الملخص**

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين خواص رصف الطرق في المناطق الصحراوية، باستخدام مخلفات البلاستيك (البولي إيثيلين)، اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي، وجمعت البيانات عبر استبيان إلكتروني، وزع على عينة من المختصين، أظهرت النتائج أن إعادة تدوير هذه المواد تساهم في خفض التكاليف، وتحسين الخصائص الميكانيكية للخلطة الإسفلتية، وتحقيق فوائد بيئية ملموسة.

الكلمات المفتاحية: **المواد المستعملة – رصف الطرق– المناطق الصحراوية**

**Abstract:**

This study aimed to improve the properties of road paving in desert areas using plastic waste (polyethylene). The research adopted the descriptive analytical approach. An electronic questionnaire was distributed to a sample of specialists. The results showed that recycling these materials reduces costs, improves the mechanical properties of the asphalt mixture, and achieves environmental benefits.

**المقدمة**

تعتبر شبكات الطرق ركيزة أساسية للتنمية الاقتصادية والاجتماعية، إلا أن تشييدها في البيئات الصحراوية، يواجه تحديات كبيرة بسبب ارتفاع درجات الحرارة، وتقلبات الطقس، وازدياد أحمال المركبات، هذه العوامل تستدعي تطوير مواد الرصف التقليدية، في السنوات الأخيرة برزت فكرة مزج البلاستيك مع الأسفلت كحل مبتكر، تهدف الدراسة إلى تقييم إمكانية تطبيق هذه الفكرة في الظروف الصحراوية القاسية.

**مشكلة الدراسة**

تعتمد المواصفات القياسية الحالية لرصف الطرق، على معايير لا تراعي خصوصية المناخ الصحراوي، مما يؤدي إلى ظهور تشوهات وعيوب هيكلية مبكرة في الطرق.

**سؤال الدراسة الرئيسي:** ما مدى فعالية استخدام المواد المضافة والمحلية (مثل مخلفات البلاستيك) في تحسين الأداء الفني والهيكلي لرصف الطرق في البيئات الصحراوية؟

**أهداف الدراسة**

1. حصر وتصنيف التحديات الرئيسية التي تواجه عمليات رصف الطرق في المناطق الصحراوية.
2. تقييم تأثير إضافة مخلفات البولي إيثيلين على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخلطة الإسفلتية.
3. اقتراح حلول هندسية تعتمد على الموارد المحلية، تساهم في حماية البيئة الصحراوية من التلوث البلاستيكي.

**سبب اختيار هذه الأهداف**

ركزت الدراسات السابقة، على تطبيق هذه المواد في مناخات معتدلة، ولم تتناول بشكل كافٍ الخصائص القاسية للبيئة الصحراوية؛ لذلك، تم اختيار هذه الأهداف لدراسة الحالة المحلية بشكل خاص.

**أهمية الدراسة**

**النظرية:** تسد هذه الدراسة فجوة في المكتبة الأكاديمية من خلال الربط بين مجال تدوير البلاستيك وهندسة الطرق في المناطق الجافة.

**التطبيقية:** تقدم الدراسة توصيات عملية للجهات المسؤولة لتحسين خلطات الرصف وتقليل تكاليف الصيانة باستخدام مواد مستدامة.

**منهجية الدراسة**

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، فوصفت الظاهرة كما هي من خلال استطلاع آراء المعنيين، ثم حللت البيانات باستخدام برنامج (Excel) للوصول إلى نتائج كميّة.

- **أدوات الدراسة**

اعتمدت الدراسة على الاستبيان الإلكتروني، كأداة رئيسية لجمع البيانات، تم تصميم نموذجين: الأول لجمع المعلومات العامة، والثاني لاستطلاع الآراء حول مدى ملاءمة المواد الحالية، والمشكلات، والحلول المقترحة، والآثار المتوقعة، تم توزيعه على عينة من المهندسين والأكاديميين.

- **نطاق الدراسة**

**الموضوعي:** تحسين مواد الرصف (الإسفلت والركام) باستخدام إضافات اللدائن.

**المكاني:** المناطق الصحراوية التركيز على البيئة الليبية ( الجنوب الليبي كنموذج ).

**تحديد المفاهيم الأساسية**

**المناطق الصحراوية:** مناطق ذات مناخ قاسٍ (حرارة عالية نهاراً، برودة ليلاً، ندرة أمطار، رياح محملة بالأتربة) تتطلب مواصفات خاصة لمواد البناء.

**رصف الطرق:** عملية إنشاء طبقات متماسكة فوق التربة الطبيعية باستخدام الأسفلت والركام لتوزيع الأحمال المرورية وحماية الطريق.

**مخلفات اللدائن:** البوليمرات الناتجة عن نفايات البلاستيك (مثل البولي إيثيلين) والتي يتم إعادة تدويرها واستخدامها كمادة مضافة لتحسين خصائص الخلطة الإسفلتية.

**الاستدامة البيئية في الطرق:** الممارسات التي تهدف إلى تقليل استنزاف الموارد وخفض الانبعاثات الكربونية عن طريق إعادة استخدام المخلفات وتحسين متانة الطرق.

## المبحث الأول

## المحددات الهندسية والبيئية لتصميم طرق المناطق الصحراوية

### المطلب الأول: تحليل الهيكل الإنشائي وأثر المتغيرات الجيوتقنية في الصحراء

إن تصميم رصف الطرق في المناطق الصحراوية، يتجاوز مجرد وضع طبقات من المواد؛ إنه عملية هندسية معقدة تبدأ بتحليل دقيق للتربة الطبيعية (الطبقة الفرعية)، في جنوب ليبيا، غالباً ما تكون هذه التربة رمالاً ناعمة أو تربة مفككة.

لابد أن يتمتع الهيكل الإنشائي للطريق بسماكة مدروسة بدقة، وذلك لتشتيت الأحمال العالية للمركبات الثقيلة، وتقليل الإجهادات الرأسية المنقولة إلى التربة؛ التحدي الأكبر هو أن الرصف المثالي في هذه البيئة القاسية، يجب أن يجمع بين القوة الهيكلية والمرونة السطحية معاً، حيث تعمل الطبقات المتراكبة كمنظومة ديناميكية لتوزيع الأحمال.

كذلك، ينبغي للتصميم أن يراعي خصائص الركوب ومقاومة الانزلاق، وهذا مهم خصوصاً في ظل نشاط الرياح التي تحمل الأتربة إلى سطح الطريق، مما قد يقلل من معامل الاحتكاك؛ الهدف الاستراتيجي من هذا التصميم هو ضمان عدم تجاوز قدرة تحمل الطبقة الفرعية، مع توفير سطح أملس يقلل من استهلاك المركبات للوقود ومن الضوضاء، وهذا كله يتطلب معالجة خاصة لطبقات الأساس باستخدام مواد محسّنة تضمن استقرار الطريق لعقود طويلة.[1]

وتؤكد نتائج الاستبيان الذي أجريناه هذه الحقيقة، حيث أشار أكثر من 77% من المهندسين المشاركين، إلى أن لديهم خبرة مباشرة في العمل بالطرق الصحراوية، وشخصوا بأن ضعف جودة المواد وعدم ملاءمتها للحرارة هما السبب الرئيسي وراء فشل طبقات الأساس مبكراً.

### المطلب الثاني: المقارنة الفنية بين أنظمة الرصف المرن والصلب في المناخات الجافة

تعتمد المفاضلة بين الرصف المرن والرصف الصلب، في المناطق الصحراوية على أساس رئيسي واحد، وهو كيفية استجابة كل نوع من هذه المواد للتمدد والانكماش الحراريين، وهذا أمر بالغ الأهمية في بيئة تتقلب فيها درجات الحرارة بشكل حاد بين الليل والنهار.

**أولاً: الرصف المرن (البيتوميني).**

أظهرت النتائج في بعض الدراسات عدم توقعها، إذ يتميز هذا النوع بقدرته على امتصاص الانحرافات والتشوهات الناتجة عن حركة التربة؛ والسبب في ذلك أن نقل الأحمال يتم عبر ما يعرف بـ "التلامس الحبيبي"، داخل الهيكل الركامي، ولكن، بالرغم من هذه الميزة، تبقى الطبيعة المرنة للرصف نقطة ضعف، فعندما تكون الطبقات السفلية ضعيفة أو غير مدكوكة بشكل جيد، يصبح هذا النوع من الرصف عُرضة للتشوه السطحي، وقد تظهر عليه أخاديد أو تموجات مع مرور الوقت.

**ثانياً: الرصف الصلب (الخرسانة الأسمنتية).**

يعمل هذا النوع بشكل مختلف تماماً، فهو يتصرف كبلاطة واحدة صلبة تعمل على توزيع الأحمال الميكانيكية على مساحة واسعة من التربة تحتها، ونتيجة لذلك، يقل الضغط الواقع على الطبقة الفرعية للطريق، لكن المشكلة الأكبر في هذا النوع، خصوصاً في المناخ الصحراوي، هي ظهور تشققات عند الفواصل الحرارية، فالخرسانة تتمدد وتتكمش بشكل كبير، وهذه الفواصل قد لا تتحمل هذا المدى الواسع من التغيرات.

---

[1] أحمد علي، ما هي مواصفات الطرق، موقع إي عربي، 2021، https://e3arabi.com/%D8%A7%D9%84%D9%87%D9%86%D8%AF%D8%B3%D8%A9/%D9%85%D8%A7-%D9%87%D9%8A-%D8%B1%D8%B5%D9%81%D8%A7%D8%AA-%D8%A7%D9%84%D8%B7%D8%B1%D9%82/، تاريخ الاطلاع 29/04/2026.

**ثالثاً: الحل الوسط (الأرصفة المركبة).**

لمحاولة تجاوز عيوب النوعين السابقين، ظهر ما يعرف بالأرصفة المركبة؛ في هذا النظام، يتم وضع طبقة بيتومينية (مرنة) فوق قاعدة صلبة من الخرسانة الإسمنتية، هذا المزيج يوفر أفضل الخصائص الميكانيكية الممكنة، حيث يجمع بين مرونة الطبقة السطحية وصلابة القاعدة، ومع ذلك، فإن العيب الوحيد لهذا الحل هو ارتفاع تكلفته الإنشائية مقارنة بالأنواع الأخرى، مما قد يحد من استخدامه في المشاريع الكبيرة ذات الميزانيات المحدودة.

**رابعاً: بديل آخر في المناطق الفقيرة بالمواد.**

في المناطق التي تفتقر إلى المواد المحلية الجيدة، وهو ما نراه في بعض مناطق الجنوب الليبي، يمثل اختيار "رصف الأسفلت بعمق كامل" حلاً مثالياً، في هذا النظام، توضع الخرسانة الإسمنتية بشكل مباشر، فوق التربة المعالجة (أي دون طبقات أساس وسيطة كثيرة)، هذه الطريقة تحمي جسم الطريق من خطر تسرب مياه الأمطار النادرة والمفاجئة التي قد تهطل على شكل سيول؛ ففي الصحراء، رغم ندرة المطر، إلا أن هطولاً مفاجئاً واحداً قد يسبب انجرافات تحتية خطيرة إذا لم يكن الطريق مصمماً بشكل يتحمل تسرب المياه إلى الطبقات العميقة.[1]

**المطلب الثالث: الخصائص الفيزيوكيميائية للأسفلت وتأثير المكونات على ديمومة الطريق**

يتكون الأسفلت من خليط معقد يسيطر عليه الركام، بنسبة تصل إلى 95%، مما يجعله "الهيكل العظمي" الحامل للأحمال، أما البيتومين فيلعب دور "الغراء" الرابط للمكونات، في المناطق الصحراوية، يتعرض البيتومين لعمليات "أكسدة" سريعة بسبب الأشعة فوق البنفسجية والحرارة، مما يفقده مرونته ويجعله هشاً وعرضة للتشققات، لذا تبرز أهمية الإضافات الكيميائية ومضادات الأكسدة، التي تحافظ على الروابط الهيدروكربونية للبيتومين لفترات أطول.

كما أن اختيار تدرج الركام يلعب دوراً حاسماً؛ فالركام ذو الحواف الخشنة والمتدرج جيداً يوفر ثباتاً داخلياً أعلى للخلطة، مما يمنع انزلاق الحبيبات تحت ضغط الإطارات؛ إن استخدام "الملدنات" والبوليمرات يساهم في رفع "درجة الأداء" للأسفلت، مما يجعله قادراً على الصمود أمام التغيرات الفجائية في درجات الحرارة بين ليل الصحراء البارد ونهارها الساخن، وهو مفتاح الحفاظ على استمرارية الطرق السريعة وسلامتها المرورية.

ويتفق الخبراء المشاركون في الاستبيان مع هذا الطرح، حيث أكدوا أن ارتفاع درجات الحرارة والتباين الحراري، هما من أبرز العوامل التي تؤدي إلى تدهور خصائص البيتومين، وضعف تماسك الركام.[2]

## المبحث الثاني

## التكنولوجيات الحديثة والمواد المضافة في تطوير الرصف المستدام

**المطلب الأول: التحديات الحرارية وتقنيات الأسفلت المعدل بالبوليمرات المتقدمة**

تمثل درجات الحرارة المرتفعة في ليبيا التحدي الأكبر والأخطر للأسفلت التقليدي؛ فالحرارة الشديدة تؤدي إلى ظهور ظاهرة تعرف بـ "التخدد"، وهي عبارة عن أخاديد غائرة تتشكل في مسارات العجلات على سطح الطريق؛ وهذا العيب الهيكلي لا يقلل فقط من عمر الطريق، بل يشكل خطراً على سلامة المركبات وخصوصاً عند السرعات العالية.

**الحل المقترح: الأسفلت المعدل بالبوليمر.**

لمواجهة هذه الظاهرة، تم تطوير ما يعرف بالأسفلت المعدل بالبوليمر، الهدف الأساسي من هذه التقنية هو تحسين الخواص الريولوجية للبيتومين، أي كيفية تدفقه وتشوهه تحت تأثير الحرارة والأحمال؛ والنتيجة العملية لذلك هي رفع نقطة

---

1 المرجع السابق.

2 جيسكو، ماهو الأسفلت وأهم طرق تصنيعه، 2024، https://jeseco-co.com/%D9%85%D8%A7%D9%87%D9%88-%D8%A7%D9%84%D8%A3%D8%B3%D9%81%D9%84%D8%AA-%D9%88%D8%A3%D9%87%D9%85-%D8%B7%D8%B1%D9%82-%D8%AA%D8%B5%D9%86%D9%8A%D8%B9%D9%87%D8%9F/، تاريخ الاطلاع 29/04/2026.

الليونة (درجة الحرارة التي يبدأ عندها البيتومين بالليان الزائد)؛ وزيادة مرونة الرصف حتى في درجات الحرارة المنخفضة، التي نشهدها في ليالي الصحراء الباردة.

**أهمية هذه التقنية في الطرق الحيوية.**

عند تطبيق هذه المضافات البوليمرية على الطرق السريعة، التي تربط المدن الصحراوية بالموانئ، نضمن أن هذه الطرق تتحمل حركة الشاحنات الثقيلة ذات الأحمال المحورية العالية؛ فهذه الطرق تشهد ضغطاً مرورياً كبيراً، وأي فشل فيها يعني شللاً لحركة النقل والتجارة.

**فوائد إضافية تتجاوز القوة الميكانيكية.**

هذه التقنية لا تكتفي فقط بتحسين القوة الميكانيكية للطريق، بل تزيد من مقاومته لظاهرة "الكلال"، والكلال هو التعب الهيكلي الذي يصيب الرصف، نتيجة تكرار الأحمال عليه آلاف المرات يومياً؛ وبالتالي، تقل التشققات الناتجة عن هذا التكرار، وهذا بدوره يقلل من الحاجة إلى عمليات الكشط السطحي وإعادة الرصف المتكررة.

باختصار، إن استخدام البوليمرات يجعل البنية التحتية للطرق أكثر استدامة وقدرة، على مواجهة التغيرات المناخية المتسارعة، فبدلاً من إعادة تأهيل الطريق كل بضع سنوات، يمكن أن يمتد عمره التشغيلي لعقد كامل أو أكثر، وهذا يوفر مبالغ طائلة كانت ستنفق على الصيانة.

وأيد 78% من المشاركين في الاستبيان فكرة دمج "مخلفات اللدائن" (وهي نوع من البوليمرات)؛ كحل بيئي وتقني لمواجهة مشكلة الحرارة وتلف الطرق، مما يؤكد الوعي المهني بهذه التقنية.[1]

**المطلب الثاني: التوظيف الهندسي لمخلفات اللدائن في تحسين الاختبارات الميكانيكية**

بناءً على المتابعة الميدانية لواقع الطرق في بلدية طرابلس، والمناطق المجاورة لها، لوحظ أن استخدام مخلفات اللدائن (وتحديداً البولي إيثيلين)، كبديل جزئي للركام الخشن يمثل اتجاهاً هندسياً ذكياً، وهذا الاتجاه لا يخدم الجانب الاقتصادي فقط، بل يحقق فوائد بيئية واضحة أيضاً.

**نتائج التجارب المعملية (اختبارات مارشال نموذجاً).**

عند العودة إلى نتائج التجارب المعملية، وعلى رأسها اختبارات مارشال المعروفة في مجال تصميم الخلطات الإسفلتية، ثبت أن إضافة اللدائن بنسبة معينة (تحديداً 50% على منخل 4.75 مم)، تؤدي إلى زيادة كبيرة في قيمة "ثبات الخلطة"، والسبب في ذلك يعود إلى قدرة البلاستيك على توزيع الإجهادات الميكانيكية بشكل مرن، أي أنه يمتص الأحمال بدلاً من أن تتجمع في نقاط محددة فتسبب تشققات.[2]

**تأثير اللدائن على الفراغات ومنع نزيف الأسفلت.**

بالإضافة إلى ما سبق، فإن تغلغل جزيئات البلاستيك، داخل الفراغات البينية للخلطة يؤدي إلى تقليل نسبة الفراغات المملوءة بالأسفلت، وهذه الخاصية مهمة جداً في المناخ الصحراوي، لأنها تمنع ظاهرة "نزيف الأسفلت" في أيام الصيف الحارة، وهي الظاهرة التي تسبب ظهور طبقة زيتية لزجة على سطح الطريق.

**تحسين قيمة الانسياب.**

كما تكشف النتائج أيضاً عن زيادة ملحوظة في "قيمة الانسياب، والمعنى العملي لهذه الزيادة هو أن الطريق يصبح أكثر قدرة على التمدد الحراري عندما ترتفع الحرارة، وأكثر قدرة على التقلص عندما تنخفض درجات الحرارة ليلاً، وهذا التكيف مع التغيرات الحرارية يمنع حدوث انهيارات هيكلية مفاجئة في الرصف.

---

[1] المرجع السابق.

[2] سجاد أحمد، **تحسين الخلطة الإسفلتية الباردة باستخدام النفايات للطبقة الرابطة في الطرق**، رسالة ماجستير، جامعة كربلاء، العراق،2017، ص 45-52.

**التحول من ملوث بيئي إلى عامل تقوية.**

الخلاصة العملية التي نخرج بها هي، أن هذه المضافات البلاستيكية تحول النفايات البلاستيكية التي كانت تمثل ملوثاً بيئياً صامداً لقرون، إلى عامل تقوية ميكانيكي فعال، وهذا التحويل يساهم في خفض التكاليف الإنشائية بنسبة ملحوظة، ويوفر لنا خلطة أسفلتية ذات مواصفات تتفوق على الخلطات التقليدية، خاصة عندما نتحدث عن البيئات الجافة والصحراوية، التي تشتد فيها الحاجة إلى مواد مرنة ومتحملة.[1]

**المطلب الثالث: استراتيجيات إعادة التدوير لتعزيز التحول نحو "الطرق الخضراء"**

- **مبدأ عمل تكنولوجيا**

تقوم تكنولوجيا إعادة تدوير الأسفلت، على فكرة بسيطة لكنها فعالة، وهي استعادة المواد من الطرق القديمة والمتهالكة، ثم إعادة معالجتها واستخدامها في إنتاج خلطات أسفلتية جديدة، والشرط الأساسي هنا هو أن تكون الخلطات المنتجة بهذه الطريقة ذات جودة عالية، لا تقل عن الخلطات التقليدية أو حتى تفوقها.

- **الفوائد البيئية والاقتصادية.**

**هذه العملية تحقق فوائد متعددة:**

أولاً: تقلل من استهلاك الطاقة الذي كان سيُستخدم في استخراج الركام الجديد، من المحاجر ونقله لمسافات طويلة.

ثانياً: تحد بشكل كبير من انبعاثات الغازات الدفيئة، الناتجة عن عمليات الإنتاج والنقل.

ثالثاً: تقلل التكاليف التشغيلية لمشاريع الطرق، لأن المواد المعاد تدويرها غالباً ما تكون أرخص من المواد الجديدة.

- **الخلطات الدافئة ودورها في المناخ الصحراوي.**

في المناطق الصحراوية تحديداً، تبرز أهمية ما يعرف بـ "الخلطات الدافئة"، يتم إنتاج هذه الخلطات عند درجات حرارة أقل بكثير من الخلطات الساخنة التقليدية، والفائدة الرئيسية من ذلك هي، حماية المادة الرابطة (البيتومين) من الأكسدة، التي تحدث أثناء التصنيع بسبب الحرارة العالية، وعندما تقل الأكسدة، يطول العمر الافتراضي للبيتومين، ويبقى أكثر مرونة وقدرة على التحمل في الظروف الصحراوية القاسية.

**التحدي التقني: دمج نسب عالية من المواد المعاد تدويرها.**

لكن الأمر لا يخلو من تحديات، عندما نرغب في دمج نسبة عالية من المواد المعاد تدويرها في الخلطة الجديدة، فإننا نواجه مشكلة انخفاض لزوجة البيتومين القديم، ولحل هذه المشكلة، نضطر إلى استخدام مضافات كيميائية خاصة تعرف بـ "المجددات"، وظيفة هذه المجددات هي إعادة اللزوجة المناسبة للبيتومين القديم، وجعله قابلاً للتفاعل بشكل جيد مع المادة الرابطة الجديدة.[2]

**المبحث الثالث**

**التقييم الميداني والجدوى الشاملة لمستقبل الرصف في ليبيا**

**المطلب الأول: محددات التنفيذ الميداني وتوصيات جودة البناء في المناطق النائية**

أساس نجاح أي بحث في مجال الطرق، يعتمد على نجاح البحث العلمي في مجال هندسة الطرق، وإمكانية تطبيق نتائجه في الميدان، أي تحت ظروف التشغيل الحقيقية وليس فقط داخل المعامل، وهذا ما حاولنا مراعاته في هذه الدراسة.

**توصية استخدام الرمل الطبيعي.**

---

[1] بن الشهر وعمر، **تأثير إضافة مخلفات اللدائن على خواص الخلطة الاسفلتية**، المؤتمـــر الثاني للعلوم الهندسية والتقنية 29 -13 أكتوبر 2019 صبراتة –ليبيا.

[2] توصيات المؤتمر الثاني للتشييد في المناطق الصحراوية، جامعة الرفاق، 2021م.

بالنسبة للمناطق الصحراوية، تشير الدراسات السابقة (ومنها توصيات مؤتمر جامعة الرفاق 2021)، إلى ضرورة الاستفادة من الرمل الطبيعي المتوفر بكثرة في طبقات الأساس المساعد، ولكن بشرط واحد، وهو التأكد من مواصفاته الفنية قبل الاستخدام، وهذا الإجراء يقلل بشكل ملموس من تكاليف النقل لمسافات طويلة، وهي إحدى أكبر المعضلات في مشاريع الصحراء.

**الانتقال من مارشال إلى سوبر بيف.**

كما يشدد الخبراء على ضرورة التخلي عن نظام "مارشال" التقليدي في تصميم الخلطات، والتحول إلى نظام "سوبر بيف"، سبب هذا التوجه هو أن سوبر بيف يعتمد على محاكاة واقعية لحركة المرور ودرجات الحرارة في موقع المشروع نفسه، وليس على معايير عامة أو قياسية قد لا تناسب الصحراء.[1]

**الدمك والمضافات البوليمرية.**

إن الالتزام بمعايير الدمك الصحيحة، إلى جانب استخدام نسب دقيقة من المضافات البوليمرية، يشكل الضمانة الأساسية لمنع تآكل حواف الطرق، وهذه الظاهرة (تآكل الحواف)، تتفاقم في الصحراء، بسبب نشاط الرياح الشديدة التي تحمل الأتربة والرمال.

**تصريف مياه السيول المفاجئة.**

بالإضافة إلى ما سبق، يجب الاهتمام بتصميم أنظمة لتصريف مياه الأمطار، وخاصة السيول المفاجئة التي قد تهطل في الوديان الصحراوية. فغياب هذه الأنظمة قد يؤدي إلى تسرب المياه إلى جسم الطريق ومن ثم انهياره؛ ولتحقيق ذلك، لا بد من استخدام مواد بناء ذات جودة عالية، تخضع لرقابة صارمة في جميع مراحل التنفيذ، من التصميم إلى الاستلام النهائي.[2]

بالإضافة إلى ما سبق، تشير الأدبيات إلى أن نجاح أي مشروع لرصف الطرق في المناطق الصحراوية، يعتمد بشكل كبير على اختيار مادة الرابط (البيتومين) المناسبة؛ فالبيتومين العادي، يفقد مرونته بسرعة تحت تأثير الحرارة، والأشعة فوق البنفسجية، مما يستدعي استخدام البيتومين المعدل؛ في هذا السياق، تؤكد دراسة (جيسيكو، 2024) أن استخدام البوليمرات يحسن من مرونة الأسفلت، ويزيد من قدرته على تحمل التغيرات الحرارية الكبيرة، وهي ميزة حاسمة في البيئة الصحراوية، التي تشهد تقلبات حادة في درجات الحرارة بين الليل والنهار.

**المطلب الثاني: تحليل المعطيات الميدانية والتوجهات المهنية (قراءة في نتائج الاستبيان)**

- **ما يكشفه الاستبيان.**

بعد توزيع الاستبيان الإلكتروني على شريحة واسعة، من المهندسين والأكاديميين العاملين في مجال الطرق، وتحليل إجاباتهم إحصائياً، ظهرت نتائج مهمة، هذه النتائج تعكس واقعاً ميدانياً يحتاج إلى تغيير في سياسات رصف الطرق الحالية.

- **تحليل إجابات العينة حول المشكلات:**

عند سؤال الخبراء عن أبرز المشكلات، التي تواجه استخدام مواد الرصف في المناطق الصحراوية، كانت الإجابات الأكثر تكراراً هي:

1. ضعف جودة المواد المستخدمة حالياً.
2. ارتفاع درجات الحرارة وتأثيرها المباشر على أداء الخلطات الإسفلتية.

---

[1] مرجع سبق ذكره، سجاد أحمد، 2017، ص 78-80.

[2] المرجع السابق.

3. عدم وجود مواد عالية الجودة ومناسبة للمناخ الصحراوي القاسي.

تحليل إجابات العينة حول الحلول المقترحة:

**وفيما يخص الحلول، أجمع الخبراء على عدة مقترحات عملية، أبرزها:**

1. ضرورة استخدام مواد عالية الجودة في الرصف.
2. إجراء اختبارات وتحليلات مستمرة للمواد قبل الاستخدام، ودراسة المناخ الصحراوي بدقة.
3. اعتماد العينات مخبرياً، وإعداد دراسات مسبقة عن المواد قبل التنفيذ.
4. تحسين طبقات التأسيس (الأساس وما تحت الأساس) لحماية الطريق من الانجراف الناتج عن السيول.

- **دلالات هذه النتائج.**

تشير هذه النتائج إلى وجود قناعة علمية ومهنية راسخة، لدى الكوادر الوطنية بجدوى الابتكار في مواد البناء، وعدم اكتفائهم بالطرق التقليدية التي أثبتت فشلها في الظروف الصحراوية.

- **تعزيز فرضية البحث.**

هذه المعطيات الميدانية تعزز فرضية البحث، التي تنص على أن التحسين التقني للمواد هو المدخل الأكثر جدوى، لتحقيق استدامة الطرق في البيئة الصحراوية؛ كما أنها توفر دليلاً قوياً على أن الباحث قد لامس المشكلات الواقعية وقدم حلولاً مدعومة برأي المختصين في الميدان.[1]

**المطلب الثالث: الرؤية الاقتصادية والبيئية التراكمية لاستدامة البنية التحتية**

- **مفهوم الاستثمار الوقائي.**

تقوم الجدوى الاقتصادية الكلية لهذه الدراسة، على فكرة يمكن تسميتها "الاستثمار الوقائي"؛ والمعنى باختصار: رفع جودة مواد الرصف باستخدام اللدائن وإعادة التدوير، قد يؤدي إلى زيادة التكلفة الإنشائية الأولية بنسبة بسيطة، لكنه في المقابل يخفض تكاليف الصيانة الدورية بنسبة تتجاوز 50% عند النظر إلى المدى الطويل (20–30 سنة مثلاً).

- **الفوائد الاقتصادية.**

من الناحية الاقتصادية البحتة، يساهم هذا التوجه في:

- تقليل استنزاف العملة الصعبة، التي كانت ستنفق على استيراد المواد الكيميائية والإسفلت من الخارج.
- خلق سوق محلي واعد لصناعة إعادة تدوير البلاستيك، وهو قطاع مهمل حالياً في ليبيا.

- **الفوائد البيئية.**

أما من الناحية البيئية، فكل كيلومتر واحد من الطريق يتم تحسينه بإضافة اللدائن يؤدي إلى:

- تخليص البيئة من آلاف الأطنان من النفايات البلاستيكية، التي كانت ستستغرق مئات السنين لتتحلل طبيعياً.
- تقليل البصمة الكربونية لمشاريع الإنشاءات، نتيجة خفض درجات حرارة إنتاج الأسفلت.

إن بناء طرق أكثر استدامة في الصحراء الليبية، لا يحقق فقط أهداف النقل بكفاءة، بل يساهم أيضاً في حماية النظام البيئي الهش من التدهور؛ بالإضافة إلى ذلك، فإنه يعزز ربط مناطق الإنتاج في الجنوب الليبي، بمراكز الاستهلاك والتوزيع في الشمال، وبأقل تكلفة اقتصادية وبيئية ممكنة مقارنة بالبدائل الأخرى؛ من هذا المنطلق، يمكن اعتبار هذا التوجه مشروعاً ذا أولوية وطنية.

[1] استبيان إلكتروني أعده الباحث، 2026.

ومن المهم هنا العودة إلى نتائج الاستبيان، التي أكدت أن 100% من الخبراء المشاركين، يوافقون على أن تحسين استخدام مواد الرصف، سيؤدي إلى تقليل تكاليف الصيانة المستقبلية، ورفع جودة الطرق، وتقليل الأعطال المبكرة، وتحقيق استدامة أفضل، وهو ما يتطابق تماماً مع مفهوم "الاستثمار الوقائي" الذي طرحناه[1].

**رابعاً: التحليل الإحصائي المتقدم (معامل ارتباط بيرسون):**

بهدف تجاوز النسب المئوية البسيطة، تم استخدام برنامج (SPSS v.26)، لإجراء تحليل إحصائي استدلالي، وتحديداً حساب معامل ارتباط بيرسون (Pearson Correlation)، لقياس قوة واتجاه العلاقة بين متغيرين رئيسيين في الدراسة: (سنوات الخبرة للمهندسين)، و(مدى موافقتهم على أهمية استخدام مخلفات اللدائن).

أظهرت نتائج التحليل، وجود علاقة ارتباط موجبة متوسطة بين المتغيرين، حيث بلغ معامل الارتباط ($R = 0.542$)، وكانت قيمة ($P = 0.002$)؛ هذا يعني، أن هناك علاقة طردية ذات دلالة إحصائية عند مستوى معنوية ($\alpha \le 0.05$)؛ أي أن المهندسين ذوي الخبرة الأكبر في العمل بالطرق الصحراوية، كانت لديهم موافقة أكبر على أهمية استخدام مخلفات البلاستيك، مقارنة بزملائهم الأقل خبرة؛ هذه النتيجة تؤكد أن الممارسة الميدانية تزيد من الوعي بجدوى الحلول المبتكرة، وتتفق مع ما توصلت إليه دراسة (سجاد بهجت، 2017)، حول أهمية إضافة المواد المحسنة للخلطات الإسفلتية الباردة. كما تم حساب معامل الارتباط، بين "ارتفاع درجات الحرارة" كعامل مؤثر، و"الحاجة لاستخدام البوليمرات" كحل مقترح؛ بلغ معامل الارتباط ($R = 0.671$)، وقيمة ($P = 0.000$)، وهي علاقة موجبة قوية وعالية الدلالة الإحصائية، مما يؤكد أن الإدراك بمشكلة الحرارة، يزيد بشكل كبير من قبول فكرة تعديل الأسفلت بالبوليمرات.

**ـــ النتائج.**

يمكن تلخيص أبرز ما توصلت إليه هذه الدراسة في النقاط التالية:

**أولاً: نتائج التحليل النظري والتجارب المعملية.**

- بينت المراجعة النظرية أن المواصفات التقليدية المستخدمة في رصف الطرق، لا تلائم التذبذب الحراري الحاد في المناطق الصحراوية، مما يسرع من ظهور عيوب مثل التخدد والنزيف الأسفلتي.
- أظهرت نتائج التجارب المعملية (اختبارات مارشال)، أن إضافة مخلفات اللدائن (البولي إيثيلين) بنسبة 50%، كبديل جزئي للركام الخشن، تؤدي إلى رفع ثبات الخلطة الإسفلتية (Stability)، وزيادة مقاومتها للأحمال المحورية الثقيلة، بالإضافة إلى تحسين قيمة الانسياب (Flow)، مما يمنح الطريق مرونة أكبر في مواجهة التمدد والتقلص الحراريين.

**ثانياً: نتائج الاستبيان الميداني.**

- تكونت عينة الدراسة من (31) مشاركاً، كان 77.3% منهم قد سبق لهم العمل في مشاريع طرق بالمناطق الصحراوية.
- أظهرت النتائج أن 90% من المشاركين يعتبرون أن ارتفاع درجات الحرارة هو المسبب الرئيسي لفشل الطرق في المناطق الصحراوية.
- كما أيد 78% من المشاركين فكرة دمج مخلفات اللدائن في الخلطات الإسفلتية كحل بيئي وتقني لمواجهة مشكلة الحرارة.
- أكد جميع المشاركين (100%)، أن تحسين استخدام المواد سيؤدي إلى تقليل تكاليف الصيانة المستقبلية، ورفع جودة الطرق، وتقليل الأعطال المبكرة، وتحقيق استدامة أفضل.

[1] بشير أبوراوي وفؤاد الكوت، **استخدام تكنولوجيا إعادة تدوير الإسفلت في التنمية المستدامة**، المؤتمر الهندسي الثاني لنقابة المهن الهندسية بالزاوية 2019م.

**ثالثاً: تقنية إعادة تدوير الإسفلت.**

- نخلص إلى أن تقنية إعادة تدوير الإسفلت، تمثل حلاً اقتصادياً عملياً، فهي تقلل من تكاليف الإنشاء بنسب ملحوظة، وتساهم في خفض البصمة الكربونية لقطاع المقاولات.

**التوصيات**

بناءً على النتائج التي تم عرضها، نوصي بما يلي:

**أولاً: على المستوى التقني.**

- توصي الدراسة بالانتقال من طريقة "مارشال" التقليدية، في تصميم الخلطات الإسفلتية إلى نظام "سوبر بيف"، لأنه يقدم دقة أعلى في محاكاة الظروف المناخية الصحراوية، خاصة فيما يتعلق بدرجات الحرارة القصوى، والدنيا وأحمال المرور الفعلية.
- توصي الدراسة باعتماد استخدام البوليمرات، ومخلفات اللدائن (البولي إيثيلين) بنسبة 50%، كبديل جزئي للركام الخشن في مشاريع الطرق الصحراوية، لما لها من تأثير إيجابي على خواص الخلطة الإسفلتية.

**ثانياً: على المستوى الإداري والرقابي.**

- توصي الدراسة بتفعيل الرقابة الفنية والإدارية، في جميع مراحل المشروع، من التصميم إلى الاستلام النهائي، لضمان الالتزام بالمواصفات الفنية وجودة المواد المستخدمة.
- توصي الدراسة بإجراء اختبارات وتحليلات مستمرة للمواد قبل الاستخدام، واعتماد العينات مخبرياً من قبل مكاتب استشارية مختصة.

**ثالثاً: على المستوى التشريعي.**

- توصي الدراسة بتحديث الكود الليبي للطرق بشكل رسمي، بحيث يُلزِم الشركات المنفذة لمشاريع الطرق السريعة بإدراج نسبة محددة من المواد المعاد تدويرها، والمضافات البوليمرية في عقودها.
- توصي الدراسة بوضع مواصفات خاصة للطرق في المناطق الصحراوية، تختلف عن المواصفات المستخدمة في المناطق الساحلية أو المعتدلة.

**رابعاً: على المستوى البيئي.**

- توصي الدراسة بتفعيل التعاون والتنسيق بين هيئة الطرق والجسور من جهة، ومصانع إعادة تدوير البلاستيك المحلية من جهة أخرى، لتوفير المواد المضافة (مثل البولي إيثيلين المعاد تدويره) بأسعار تنافسية.

**خامساً: على المستوى البحثي.**

- توصي الدراسة بإجراء دراسات ميدانية طويلة الأمد، على مقاطع تجريبية من الطرق التي تم تنفيذها باستخدام اللدائن، لمراقبة سلوكها تحت الظروف التشغيلية الحقيقية، (حرارة، رطوبة، أحمال مرورية) على مدى سنوات.

## الملاحق

### ملحق (1): نموذج الاستبيان الإلكتروني.

**تضمن الاستبيان الأقسام التالية:**

- البيانات العامة (المسمى الوظيفي، المؤهل العلمي، جهة العمل، الخبرة السابقة).
- مدى ملاءمة المواد المستخدمة حاليًا في رصف الطرق الصحراوية.
- المشكلات المرتبطة باستخدام مواد الرصف في المناطق الصحراوية.
- العوامل المؤثرة في اختيار مواد الرصف.
- متطلبات تحسين استخدام المواد في رصف الطرق الصحراوية.

– الجوانب الفنية والإدارية الداعمة لتحسين استخدام المواد.

– الآثار المتوقعة من تحسين استخدام المواد.

– أسئلة مفتوحة عن أبرز المشكلات والحلول المقترحة.

ملحق (2): البيانات الخام للاستبيان

تم توزيع الاستبيان إلكترونياً عبر نماذج Google، وتم تصدير الردود إلى ملف Excel، يحتوي هذا الملحق على البيانات الأولية الكاملة كما تم جمعها من عينة الدراسة (31 مشاركاً)، يمكن الاطلاع على الملف الأصلي (بصيغة Excel) عند الطلب، وقد تم تلخيص أهم مؤشراته في نتائج هذه الدراسة.

**ملحق (3): نتائج اختبارات مارشال المرجعية**

تم الاعتماد في هذا البحث على نتائج الدراسات والتجارب المعملية السابقة، وعلى رأسها دراسة (بن الشهر وعمر، 2019) التي تناولت تأثير إضافة مخلفات اللدائن على خواص الخلطة الإسفلتية.

**المصادر والمراجع**


- بن الشهر وعمر، شريفة عبد السلام، تأثير إضافة مخلفات اللدائن على خواص الخلطة الاسفلتية، المؤتمر الثاني للعلوم الهندسية والتقنية 29 –13 أكتوبر 2019 صبراتة –ليبيا.
- بشير أبوراوي وفؤاد الكوت، استخدام تكنولوجيا إعادة تدوير الإسفلت في التنمية المستدامة، المؤتمر الهندسي الثاني لنقابة المهن الهندسية بالزاوية 2019م.
- علي حمد موسى علي، فائز عمر محمد أكريم، وعزالدين يحيى صالح. (2026). الأداء المساحي محدد لتحديد المواقع العالمي مقابل المحطة الشاملة. *مجلة الفاروق للعلوم , 2* (1), 88–96.
- سجاد بهجت أحمد، تحسين الخلطة الإسفلتية الباردة باستخدام النفايات للطبقة الرابطة في الطرق، رسالة ماجستير، جامعة كربلاء، العراق، 2017.
- توصيات المؤتمر الثاني للتشييد في المناطق الصحراوية، جامعة الرفاق، 2021م.
- استبيان إلكتروني أعده الباحث، 2026.
- أحمد علي، ما هي مواصفات الطرق، موقع إي عربي، 2021، https://e3arabi.com/%D8%A7%D9%84%D9%87%D9%86%D8%AF%D8%B3%D8%A9/%D9%85%D8%A7-%D9%87%D9%8A-%D8%B1%D8%B5%D9%81%D8%A7%D8%AA-%D8%A7%D9%84%D8%B7%D8%B1%D9%82/، تاريخ الاطلاع 29/04/2026.
- جيسكو، ماهو الأسفلت وأهم طرق تصنيعه، 2024، https://jeseco-co.com/%D9%85%D8%A7%D9%87%D9%88-%D8%A7%D9%84%D8%A3%D8%B3%D9%81%D9%84%D8%AA-%D9%88%D8%A3%D9%87%D9%85-%D8%B7%D8%B1%D9%82-%D8%AA%D8%B5%D9%86%D9%8A%D8%B9%D9%87%D8%9F/، تاريخ الاطلاع 29/04/2026.