المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

(7)

تحسين الرابط الأسفلتي باستخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره في الطرق السريعة

Improvement of Asphalt Binder Using Crumb Rubber in Highways

آلاء عوض أحمد محمد
جامعة المغتربين، السودان.
E-mail: alaa3wad2023@gmail.com

2026

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

المستخلص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين أداء الرابط الأسفلتي المستخدم في الطرق السريعة من خلال تعديله باستخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره (Crumb Rubber) بحجم حبيبات (Mesh 30) بوصفه مادةً محسِّنة. ولتحقيق هذا الهدف، جرى تقييم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية للرابط الأسفلتي بعد إضافة ثلاث نسب وزنية من مسحوق المطاط (3%، 6%، 9%) إلى الرابط الأسفلتي الأساسي.

أُجريت مجموعة شاملة من الاختبارات المعملية وفقاً للمواصفات القياسية (ASTM و AASHTO) لتقييم الخصائص الأساسية والأدائية للرابط الأسفلتي، وشملت: اختبار نقطة التليين، واختباري الومض والاشتعال، واختبار اختراق الإبرة، واختبار المطولية، واختبار الزحف واستعادة الإجهاد المتكرر (MSCR)، واختبار اللزوجة الدورانية. وأظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في أداء الرابط الأسفلتي، حيث أسهمت إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره في زيادة الاستقرار الحراري وتعزيز مقاومة التشوه الدائم، وهو ما تجلى في الارتفاع التدريجي لقيم نقطة التليين والومض والاشتعال، إلى جانب تحسن خصائص الزحف واستعادة الإجهاد في اختبار (MSCR). كما أظهر الرابط المعدل زيادة في الصلابة، صاحبها انخفاض في قيم اختراق الإبرة والمطولية، بما يعكس تحسناً في مقاومة التشوه تحت ظروف التشغيل المختلفة. وانعكس هذا التحسن في الخصائص الريولوجية على رفع درجة أداء الرابط (Performance Grade) من PG 64-10 للرابط التقليدي إلى PG 76-10 عند نسبة إضافة بلغت 9%. وتشير نتائج الدراسة إلى أن نسبة الإضافة البالغة 9% حققت أفضل أداء ضمن النسب المدروسة، مما يجعلها خياراً مناسباً لتحسين خصائص الرابط الأسفلتي في الطرق السريعة، ولا سيما في المناطق ذات المناخ الحار. كما تؤكد النتائج أن استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره يمثل حلاً هندسياً وبيئياً واعداً، يجمع بين تحسين أداء الرصف الأسفلتي وتعزيز الاستدامة البيئية من خلال إعادة تدوير مخلفات الإطارات والحد من الأثر البيئي لقطاع إنشاء الطرق.

الكلمات المفتاحية: مسحوق المطاط المعاد تدويره، تعديل الرابط الأسفلتي، الخصائص الريولوجية، اختبار (MSCR)، درجة الأداء (PG)، الاستدامة البيئية.

Abstract:

This study aims to improve the performance of asphalt binder used in highways by modifying it with recycled crumb rubber as a performance-enhancing additive. To achieve this objective, the physical, mechanical, and rheological properties of the asphalt binder were evaluated after incorporating three crumb rubber contents (3%, 6%, and 9%) by weight into the base asphalt binder.

A comprehensive series of laboratory tests was conducted in accordance with ASTM and AASHTO standards to evaluate the fundamental and performance-related properties of the asphalt binder. The testing program included the softening point test, flash and fire point tests, penetration test, ductility test, Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test, and rotational viscosity test.

The results demonstrated a significant improvement in the performance of the asphalt binder. The incorporation of recycled crumb rubber enhanced thermal stability and resistance to permanent deformation, as evidenced by the progressive increase in softening point, flash point, and fire point values, together with improved creep and recovery characteristics obtained from the MSCR test. In addition, the modified binder exhibited increased stiffness, accompanied by reductions in penetration and ductility values, indicating enhanced resistance to deformation under various

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

service conditions. These improvements in rheological properties increased the binder's Performance Grade (PG) from PG 64–10 for the conventional binder to PG 76–10 at a crumb rubber content of 9% .The findings indicate that the 9% crumb rubber content achieved the optimum performance among the investigated proportions, making it a suitable option for improving asphalt binder properties in highway applications, particularly in hot-climate regions. Moreover, the study confirms that the use of recycled crumb rubber represents a promising engineering and environmentally sustainable solution by enhancing asphalt pavement performance while promoting tire waste recycling and reducing the environmental impact of road construction.

Keywords: Recycled Crumb Rubber, Asphalt Binder Modification, Rheological Properties, Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), Performance Grade (PG), Environmental Sustainability.

المقدمة:

تُعد الطرق السريعة من العناصر الأساسية في منظومة النقل، لما تؤديه من دور مهم في دعم التنمية الاقتصادية والاجتماعية وتسهيل حركة النقل. ويتطلب تصميم وتنفيذ الرصف الأسفلتي مراعاة مجموعة من العوامل المؤثرة في الأداء، من أهمها الظروف البيئية، والأحمال المرورية، وخصائص المواد المستخدمة في طبقات الرصف.

يُعد الرابط الأسفلتي أحد المكونات الرئيسية في الخلطات الأسفلتية، حيث يسهم في ربط حبيبات الركام وتكوين بنية متماسكة للرصف، إضافة إلى دوره في الحد من نفاذية المياه داخل طبقات الرصف. إلا أن أداء الرابط الأسفلتي يتأثر بالعوامل الميكانيكية والبيئية المختلفة أثناء فترة الخدمة، مما يؤدي إلى تغير خصائصه الفيزيائية والريولوجية وانخفاض قدرته على مقاومة مظاهر التلف.

من أبرز المشكلات التي تواجه الرصف الأسفلتي حدوث التشوه الدائم (Rutting) نتيجة تأثير الأحمال المتكررة، إضافة إلى التشققات التي تؤثر في أداء الرصف وعمره التشغيلي. لذلك ظهرت الحاجة إلى تحسين خصائص الرابط الأسفلتي التقليدي من خلال استخدام مواد محسنة تساعد على رفع مستوى الأداء ومقاومة ظروف التشغيل المختلفة.

وفي هذا الإطار، اتجهت العديد من الدراسات إلى استخدام المواد المعدلة، ومن بينها مسحوق المطاط المعاد تدويره الناتج من مخلفات الإطارات، بهدف تحسين بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية للرابط الأسفلتي. كما يمثل استخدام هذه المادة خياراً يجمع بين تحسين أداء الرابط الأسفلتي والاستفادة من مخلفات الإطارات بما يدعم التوجهات المرتبطة بالاستدامة البيئية.

وبناءً على ذكر، تركز هذه الدراسة على تقييم تأثير إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره بنسب مختلفة إلى الرابط الأسفلتي التقليدي، ودراسة أثر ذلك على خصائصه الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية، بهدف تحديد مدى فاعلية استخدامه في تحسين أداء الرابط الأسفلتي المستخدم في الطرق السريعة.

مشكلة البحث:

تتمثل مشكلة البحث في محدودية أداء الرابط الأسفلتي التقليدي في مقاومة بعض التأثيرات الميكانيكية والبيئية التي يتعرض لها أثناء فترة الخدمة، مما قد يؤدي إلى تغير خصائصه الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية وانخفاض قدرته على المحافظة على الأداء المطلوب. وعليه، تتمحور مشكلة البحث حول تقييم فاعلية استخدام مسحوق المطاط

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

المعاد تدويره كمادة محسِّنة للرابط الأسفلتي، من خلال دراسة تأثير إضافة نسب مختلفة منه على خصائص الرابط الأسفلتي وأدائه، وتحديد مدى إمكانية الاستفادة منه في تحسين أداء الرابط المستخدم في الطرق السريعة.

أهمية البحث:

تنبع أهمية هذا البحث من دراسة تأثير إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره على خصائص الرابط الأسفلتي، وتقييم مدى قدرته على تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية للرابط المعدل مقارنة بالرابط التقليدي.

كما تكتسب الدراسة أهميتها من تقديم تقييم علمي لاستخدام المطاط المعاد تدويره كمادة محسِّنة للرابط الأسفلتي، بما يسهم في تطوير أداء مواد الربط المستخدمة في الرصف الأسفلتي، وتعزيز الاستفادة من مخلفات الإطارات ضمن تطبيقات هندسية ذات بعد بيئي مستدام.

أهداف البحث:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره كمادة محسِّنة للرابط الأسفلتي، ودراسة مدى فاعليته في تحسين أداء الرابط الأسفلتي المستخدم في الطرق السريعة.

وتمثل أهداف البحث فيما يلي:

1/ دراسة تأثير إضافة نسب مختلفة من مسحوق المطاط المعاد تدويره (3%، 6%، 9%) على خصائص الرابط الأسفلتي.

2/ تقييم تأثير مسحوق المطاط المعاد تدويره على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للرابط الأسفلتي المعدل مقارنة بالرابط التقليدي.

3/ تحليل تأثير إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره على الخصائص الريولوجية وأداء الرابط الأسفلتي من خلال الاختبارات المعملية المستخدمة في الدراسة.

4/ مقارنة أداء الرابط الأسفلتي المعدل بالرابط التقليدي وتحديد مدى التحسن الناتج عن إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره.

5/ تحديد نسبة الإضافة المناسبة من مسحوق المطاط المعاد تدويره ضمن النسب المدروسة لتحقيق أفضل أداء للرابط الأسفلتي.

فرضية البحث:

تفترض الدراسة أن إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره إلى الرابط الأسفلتي التقليدي قد تسهم في تحسين خصائصه الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية، بما يؤدي إلى تحسين أدائه ومقاومته للتشوه تحت ظروف التشغيل المختلفة.

منهجية البحث:

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج التجريبي المخبري لتقييم تأثير إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره على أداء وخصائص الرابط الأسفلتي، وذلك من خلال تعديل الرابط الأسفلتي التقليدي بثلاث نسب مختلفة من مسحوق المطاط المعاد تدويره، وإجراء مجموعة من الاختبارات المعملية وفقاً للمواصفات القياسية (ASTM و AASHTO).

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

وتمثلت منهجية البحث فيما يلي:

1/ جمع العينات: اختيار عينات من الرابط الأسفلتي التقليدي المستخدم في الدراسة.

2/ إعداد الرابط الأسفلتي المعدل: إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره إلى الرابط الأسفلتي الأساسي بثلاث نسب وزنية (3%، 6%، 9%) لدراسة تأثيرها على خصائص الرابط الأسفلتي.

3/ إجراء الاختبارات المعملية اللازمة لتقييم خصائص الرابط الأسفلتي.

4/ تحليل نتائج الاختبارات ومقارنة أداء الرابط الأسفلتي المعدل بالرابط الأسفلتي التقليدي، وتقييم تأثير نسب مسحوق المطاط المعاد تدويره على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية.

5/ استخلاص النتائج والتوصيات: تحديد تأثير إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره وتحديد نسبة الإضافة التي حققت أفضل أداء ضمن النسب المدروسة، وتقديم التوصيات المناسبة في ضوء نتائج الدراسة.

حدود البحث:

تتمثل حدود هذه الدراسة في تقييم تأثير استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره على خصائص وأداء الرابط الأسفلتي المستخدم في الطرق السريعة، وذلك ضمن الحدود الآتية:

1/ الحدود المكانية: تقتصر الدراسة على الرابط الأسفلتي المستخدم في مشاريع الطرق بمدينة الرياض.

2/ الحدود الزمنية: أُجريت الدراسة خلال عام 2025م.

3/ حدود المادة المستخدمة: تقتصر الدراسة على استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره كمادة محسِّنة للرابط الأسفلتي، دون دراسة تأثير مواد محسِّنة أخرى.

4/ حدود نسب الإضافة: تقتصر الدراسة على تقييم تأثير ثلاث نسب وزنية من مسحوق المطاط المعاد تدويره وهي (3%، 6%، 9%).

5/ حدود التقييم: تقتصر الدراسة على التقييم المخبري لخصائص الرابط الأسفلتي من خلال الاختبارات المستخدمة في البحث، ولا تشمل التقييم الميداني طويل الأمد.

الإطار النظري والدراسات السابقة

الإسفلت (Asphalt)

تعريف وتركيبة الإسفلت:

الإسفلت هو مادة لزجة ودهنية تستخدم بشكل أساسي في إنشاء الطرق والبنية التحتية، ويتكون من مزيج من الهيدروكربونات، حيث يتم استخراج مكوناته من النفط الخام. ويعتبر الإسفلت مادة هيدروكربونية تستخدم لتعبئة الشقوق والفجوات في الطرق وللقيام بتغليف الأسطح. ويُعرف أيضاً بأنه مادة هيدروكربونية لزجة ودهنية تستخدم على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية، وخاصة في إنشاء الطرق وتعبيد الأسطح، ويُعرف أيضاً بالأسفلت القاري أو الأسفلت النفطي، ويتميز بخصائصه الفيزيائية التي تجعله خياراً مثالياً للعديد من التطبيقات.

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

خصائص الإسفلت:

1_ خصائص الفيزيائية:

- اللزوجة (Viscosity): تعبر اللزوجة عن مقاومة الإسفلت للتدفق، وتؤثر على كيفية خلط الإسفلت مع المواد الأخرى، مثل الحصى والرمل، كما تؤثر على قابلية الإسفلت للتطبيق، حيث تحتاج إلى لزوجة معينة لتحقيق التماسك المثالي.
- المرونة (Flexibility): هي قدرة الإسفلت على العودة إلى شكله الأصلي بعد التشوه، وتساهم في مقاومة الشقوق والانكسارات الناتجة عن حركة المرور والتغيرات الحرارية كغطاء للسطوح المسطحة لضمان العزل المائي، كما تؤثر على قابلية الإسفلت للتطبيق، حيث تحتاج إلى لزوجة معينة لتحقيق التماسك المثالي.
- الكثافة (Density): هي وزن وحدة الحجم من الإسفلت، وتؤثر على الوزن الإجمالي للطرق المعبدة ومدى تحملها للأحمال، كما تؤثر على استهلاك المواد ومدى كفاءة الإنتاج.
- الصلابة (Hardness): هي قدرة الإسفلت على مقاومة الضغط، وتلعب دوراً في الحفاظ على الشكل العام للطريق، مما يقلل من المخاطر المتعلقة بالانزلاق والتآكل.

2_ الخصائص الكيميائية:

- الاستقرار الحراري (Thermal Stability): هو قدرة الإسفلت على تحمل درجات الحرارة المرتفعة دون فقدان خصائصه، ويضمن استدامة الإسفلت في ظروف الطقس القاسية، مثل الحرارة العالية أو الصقيع، كما يساعد في تقليل الحاجة إلى الصيانة نتيجة لتدهور المادة.
- المقاومة الكيميائية (Chemical Resistance): هي قدرة الإسفلت على مقاومة التفاعلات مع المواد الكيميائية، مثل الزيوت والأحماض، وتعزز من العمر الافتراضي للطرق، كما تحمي الإسفلت من التآكل الناتج عن التلوث البيئي. وتُعد الخصائص الكيميائية للإسفلت ضرورية لفهم أدائه في ظروف مختلفة، وتساعد في تطوير تركيبات محسنة تعزز من استخدامه في البنية التحتية.

3_ الخصائص الميكانيكية:

- مقاومة التشقق (Resistance to Cracking): هي مدى قدرة الإسفلت على مقاومة الشقوق الناتجة عن الأحمال والتغيرات الحرارية، وتعزز من عمر الإسفلت وتقلل من الحاجة إلى الصيانة، كما تمنع حدوث شقوق قد تؤدي إلى تسرب المياه.
- مقاومة التآكل (Corrosion Resistance): هي قدرة الإسفلت على تحمل التآكل الناتج عن حركة المرور والظروف البيئية، وتضمن بقاء الأسطح ملساء وآمنة للاستخدام، كما تعزز من الاستدامة العامة للبنية التحتية.

4_ الخصائص البيئية:

- المتانة (Durability): هي قدرة الإسفلت على التحمل لفترات طويلة دون تدهور، وتضمن استدامة البنية التحتية وتقليل تكاليف الصيانة، كما تعزز من موثوقية الطرق في مختلف الظروف الجوية.
- قابلية إعادة التدوير (Recyclability): هي إمكانية استخدام الإسفلت المستخرج من الطرق القديمة في بناء طرق جديدة، وتساهم في تقليل الفاقد البيئي وتوفير الموارد، كما تساعد في خفض التكاليف المرتبطة بإنتاج الإسفلت الجديد.

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

5 – الخصائص الحرارية:

- نقطة الانصهار (Melting Point): هي درجة الحرارة التي يبدأ عندها الإسفلت بالذوبان، وتؤثر على كيفية استخدام الإسفلت في الظروف المناخية المختلفة، خصوصاً في المناطق الحارة، كما تؤثر على كيفية استخدام الإسفلت في الظروف المناخية المختلفة.
- توصيل الحرارة (Heat Conduction): هو مدى قدرة الإسفلت على نقل الحرارة، ويمكن أن يؤثر على استهلاك الطاقة في التدفئة أو التبريد في المناطق المجاورة، كما يؤثر على درجة حرارة السطح ومدى راحتها في الظروف المناخية المتغيرة.

6_ الخصائص الصوتية:

- امتصاص الصوت: يُعد الإسفلت من المواد القادرة على تقليل الضوضاء الناتجة عن حركة المرور، مما يجعله خياراً جيداً في المناطق السكنية.

الأسفلت المطاطي (Rubberized Asphalt):

يتمتع الأسفلت المطاطي بمرونة عالية ومقاومة إضافية بفضل إضافة المطاط المعاد تدويره، كما يساعد في تقليل الضوضاء ومقاومة التشققات. ويُستخدم في الطرق السكنية والمناطق الحساسة لضوضاء المرور، وكذلك في الشوارع التي تحتاج إلى مقاومة عالية ضد التشققات. ويُنتج في درجات حرارة مشابهة للأسفلت الساخن، ويُعد خياراً مثالياً للمشروعات التي تهدف إلى تحسين جودة الحياة في المناطق السكنية.

الإضافات المطاطية (Rubber Additives):

تُعد الإضافات المطاطية من أكثر التقنيات الحديثة استخداماً لتحسين خواص الأسفلت وزيادة متانته، حيث تساعد في تحسين مرونة الخلطة الإسفلتية ومقاومتها للتشوهات الناتجة عن الحرارة والأحمال الثقيلة.

المطاط المعاد تدويره (Recycled Rubber):

يتم الحصول على المطاط المعاد تدويره من إطارات السيارات القديمة ومخلفات منتجات المطاط الأخرى، ويتم تحضيره من خلال سحق الإطارات القديمة إلى قطع صغيرة أو طحنها لتصبح بودرة ناعمة تُستخدم كمادة مضافة إلى الأسفلت.

مسحوق المطاط (Crumb Rubber):

يتم تحضير مسحوق المطاط عن طريق طحن الإطارات أو المنتجات المطاطية القديمة إلى جزيئات دقيقة، ويمكن إضافتها إلى الأسفلت بطريقة الرطوبة أو بطريقة الجفاف. ففي طريقة الرطوبة تُضاف بودرة المطاط مباشرة إلى الأسفلت السائل ويتم خلطها لتشكيل خلطة معدلة، أما طريقة الجفاف فتُخلط بودرة المطاط مع الركام المستخدم في الخلطة الإسفلتية قبل إضافة الأسفلت السائل.

أهمية المطاط المطحون كحل مزدوج الفائدة:

يُعد المطاط المطحون، الناتج من إعادة تدوير الإطارات المستعملة، حلاً مبتكراً يجمع بين التحسين الهندسي والاستدامة البيئية، فكل عام يتم التخلص من أكثر من 1.5 مليار إطار حول العالم، معظمها ينتهي في المكبات أو يُحرق، مما يسبب تلوثاً بيئياً خطيراً .

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

كما أن استخدام هذه الإطارات كمطاط مطحون في الخلطات الإسفلتية لا يقلل فقط من النفايات، بل يحسن أيضاً من أداء الرصف، حيث يُظهر البيتومين المعدل بالمطاط خصائص لزجة–مرنة (Viscoelastic) متفوقة..

كيفية عمل الإضافات للأسفلت:

1_ تحسين اللزوجة: تعمل الإضافات، مثل البوليمرات والألياف، على تعديل التركيب الكيميائي للإسفلت، مما يزيد من لزوجته، وتساعد اللزوجة المحسنة في تسهيل عملية الخلط مع المواد الأخرى، مما يحسن من التماسك ويقلل من فرص الانزلاق أثناء البناء.

2_ زيادة المرونة: تزيد الإضافات من مرونة الإسفلت، مما يسمح له بالتمدد والانكماش تحت تأثير درجات الحرارة المتغيرة، وتساعد هذه المرونة في تقليل التشققات الناتجة عن الحركة المرورية أو التغيرات الحرارية، مما يطيل من عمر الإسفلت.

3_ تعزيز القوة: تُضاف الألياف، مثل الألياف الزجاجية والبولي بروبيلين، لتعزيز الهيكل الداخلي للإسفلت، وتعزز هذه الألياف من قوة الشد ومقاومة الانكسار، مما يساعد في تحمل الأحمال الثقيلة.

4_ تحسين المقاومة للتآكل: تعمل الإضافات الكيميائية، مثل المواد المضادة للأكسدة والمثبتات، على تقليل التأكسد والتفاعل مع المواد الكيميائية.

5_ تحسين الخصائص الحرارية: تعمل بعض الإضافات، مثل النانو سيليكا، على تحسين الأداء الحراري للإسفلت، مما يؤدي إلى تقليل فرص تدهور الإسفلت في درجات الحرارة المرتفعة، ويحسن من استقراره في ظروف المناخ القاسي.

5_ تقليل امتصاص الماء: تعمل الإضافات، مثل المواد المضادة للماء، على تكوين حاجز ضد الماء، مما يقلل من امتصاص المياه ويمنع التآكل والشقوق الناتجة عن الصقيع والمياه المتراكمة.

6_ زيادة الاستدامة: يمكن، باستخدام المواد النانوية والمواد القابلة لإعادة التدوير، تحسين خصائص الإسفلت مع الحفاظ على البيئة، مما يعزز من الاستدامة البيئية، ويقلل من الفاقد، ويساعد في تقليل تكاليف الإنتاج.

المفهوم والهدف من تصميم الخلطات الإسفلتية:

تصميم الخلطات الإسفلتية: هو سلسلة من الإجراءات المنهجية تهدف إلى تحديد نوع ونسب وخواص المواد (ركام، إسفلت، مضافات) الداخلة في الخلطة، واختبارها للتأكد من توافقها مع المواصفات التعاقدية وقدرتها على الأداء تحت الظروف المرورية والمناخية المتوقعة خلال عمرها التصميمي.

مصدر وخصائص المطاط المطحون (Crumb Rubber):

ينتج المطاط المطحون من طحن الإطارات المستعملة بعد إزالة الفولاذ (الحديد) والنسيج (البوليستر)، وتستخدم في إنتاجه طريقتان رئيسيتان، هما الطحن المحيطي (Ambient Grinding) الذي يتم عند درجة حرارة الغرفة، والطحن بالتبريد (Cryogenic Grinding) الذي يتم باستخدام النيتروجين السائل لجعل المطاط هشاً.

المواصفات القياسية:

يُصنف المطاط المطحون (CR) وفقاً للمواصفة ASTM D5603 إلى درجات حسب حجم الحبيبات، حيث يُعد

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

0.425) Mesh 40 مم) الأكثر استخداماً في Wet Process، بينما يحقق 0.485) Mesh 20 مم) توازناً بين التشتت والأداء، في حين يُستخدم 2) Mesh 10 مم) في Dry Process.

التركيب الكيميائي:

يتكون المطاط المطحون (CR) عادةً من 55% SBR (Styrene–Butadiene Rubber) من إطارات الركاب، و35% Polyisoprene من إطارات الشاحنات، بالإضافة إلى 10% من الإضافات، وتشمل الكربون الأسود للتقوية، والكبريت للفلكنة، والزيوت.

الخصائص الفيزيائية:

تبلغ كثافة المطاط المطحون 1.1–1.2 جم/سم³، ويتميز بقدرة عالية على التورم، حيث يتراوح امتصاص الزيت بين 150–300% من الوزن، كما يتمتع بمقاومة ممتازة للعوامل الجوية والكيميائية.

آليات تعديل الرابط الأسفلتي بالمطاط المطحون:

- **التورم والامتصاص (Swelling):**

عند خلط المطاط المطحون (CR) مع البيتومين الساخن عند درجة حرارة 177–190°C، تمتص جزيئات المطاط المكونات الخفيفة (Maltenes) من البيتومين، فتتورم بنسبة تصل إلى 300% من حجمها الأصلي، وتغير هذه الظاهرة التركيب الطوري للبيتومين، كما تُشكل شبكة ثلاثية الأبعاد تحسن الخصائص الريولوجية.

- **تشكيل مادة لزجة–مرنة (Viscoelastic):**

يصبح البيتومين المعدل بالمطاط مادة Viscoelastic تجمع بين اللزوجة لمقاومة التدفق في درجات الحرارة المرتفعة، والمرونة لاستعادة الشكل بعد إزالة الحمل، مما يقلل التشوه الدائم بنسبة تصل إلى 40% مقارنة بالخلطات التقليدية.

التفاعل الكيميائي الجزئي:

على الرغم من أن التفاعل يكون غالباً فيزيائياً، إلا أن بعض الدراسات تشير إلى حدوث تفكك حراري جزئي (Devulcanization) عند درجات الحرارة العالية، مما يسمح بتكوين روابط جديدة بين جزيئات المطاط والبيتومين.

طرق تصنيع الخلطات المعدلة بالمطاط :

أ- طريقة الخلط الرطب (Wet Process):

تعتمد على خلط المطاط المطحون (CR) مع البيتومين لمدة تتراوح بين (45–90) دقيقة عند درجة حرارة (177–190°C)، ثم يضاف البيتومين المعدل إلى الركام لإنتاج الخلطة الأسفلتية. وتمتاز هذه الطريقة بتحقيق أداء ممتاز وتوزيع متجانس للمطاط داخل المادة الرابطة، مما ينعكس إيجاباً على خصائص الخلطة، إلا أنها تتطلب تكلفة أعلى مقارنة بالطرق الأخرى، كما تحتاج إلى معدات خاصة لإجراء عملية الخلط.

ب- طريقة الخلط الجاف (Dry Process):

تعتمد على إضافة المطاط المطحون (CR) كجزء من الركام بنسبة تتراوح بين (1–3%) من وزن الخلطة، دون الحاجة إلى تعديل البيتومين مسبقاً. وتتميز هذه الطريقة بسهولة التنفيذ وعدم الحاجة إلى تجهيزات خاصة لتعديل

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

البيتومين، إلا أن أداءها يكون أقل مقارنة بطريقة الخلط الرطب، كما تزداد فيها احتمالية حدوث تكتل لحبيبات المطاط داخل الخلطة.

ج- طريقة الخلط في محطة التكرير (Terminal Blend):

تعتمد على تعديل البيتومين مسبقاً داخل محطة التكرير قبل نقله إلى مواقع الإنتاج والاستخدام. وتمتاز هذه الطريقة بأن البيتومين المعدل يكون جاهزاً للاستخدام ويتمتع بجودة موحدة وثابتة، إلا أن انتشارها لا يزال محدوداً، كما أنها تحتاج إلى بنية تحتية متخصصة في محطات التكرير.

تأثير المطاط (CR) على خصائص المادة الرابطة (Binder) والخلطة:

يعد تعديل البيتومين بالمطاط المطحون تقنية متقدمة تهدف إلى تحويل المادة الرابطة من سائل لزج بسيط إلى مادة لزجة مرنة (Viscoelastic) عالية الأداء، وهو ما يسهم في تحسين مقاومة الخلطة الأسفلتية للتلف الناتج عن الأحمال المرورية ودرجات الحرارة المختلفة، فضلاً عن تعزيز خواصها الميكانيكية والريولوجية وإطالة عمرها الخدمي.

1_ تأثير المطاط على خواص الرابط الأسفلتي:

عند درجات الحرارة العالية، يؤدي استخدام المطاط إلى زيادة معامل القص المركب (G*) بنسبة تتراوح بين (50–100%)، مع خفض زاوية الطور (δ)، وهو ما يمنح المادة الرابطة سلوكاً أكثر مرونة وقدرة على مقاومة التشوهات، كما ينعكس ذلك في تحسين مقاومة التخدد والتشوه الدائم تحت تأثير الأحمال المرورية.

أما عند درجات الحرارة المنخفضة، فإن المطاط يسهم في رفع درجة مقاومة التشقق الحراري من (-18°C) إلى (-24°C)، إضافة إلى تحسين مرونة الانثناء كما يظهر في نتائج اختبار (BBR)، الأمر الذي يزيد من قدرة الرصف على تحمل الانكماشات الحرارية ويحد من حدوث التشققات. وفيما يتعلق بمقاومة الشيخوخة، فإن البيتومين المعدل بالمطاط يظهر انخفاضاً في معدل التصلب بعد اختباري (RTFOT) و(PAV)، مما يعزز مقاومته للأكسدة ويطيل العمر الخدمي للرصف.

2_ تأثير المطاط على خواص الخلطة الأسفلتية:

يسهم المطاط في تحسين أداء الخلطة الأسفلتية من خلال زيادة قيمة الثبات (Marshall Stability) بنسبة تتراوح بين (20–35%)، مع تقليل مقدار التشوه بنسبة تتراوح بين (25–50%)، كما يعمل على رفع مقاومة الانزلاق نتيجة زيادة خشونة سطح المطاط. وفي المقابل، يؤدي إلى زيادة قيمة الفراغات المعدنية (VMA)، وهو ما قد يستلزم إجراء تعديل مناسب للتدرج الحبيبي للخلطة.

الخواص الريولوجية عند درجات الحرارة العالية (مقاومة التخدد):

يعزز المطاط المطحون أداء الرصف في البيئات الحارة من خلال زيادة لزوجة البيتومين نتيجة تفاعل المطاط معه وانتفاخ حبيباته (Swelling) بعد امتصاص المكونات الخفيفة للبيتومين. كما تعمل جزيئات المطاط المنتفخة كمواد مالئة ذات خواص صلبة ومرنة داخل المادة الرابطة، فتمنحها قدرة عالية على الاستعادة المرنة (Elastic Recovery) بعد إزالة الحمل، وهو ما يسهم بصورة كبيرة في الحد من التشوه الدائم (Rutting)، خاصة في الطرق السريعة ذات الأحمال المرورية المرتفعة.

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

الخواص الميكانيكية عند درجات الحرارة المنخفضة (مقاومة التشقق):

على الرغم من زيادة صلابة المادة الرابطة عند درجات الحرارة المرتفعة، فإن المطاط يحافظ على مرونة الخلطة في الأجواء الباردة، حيث يعمل كمادة بوليمرية تضفي على الرابط خاصية مطاطية تسمح للرصف بالتمدد والانكماش دون التعرض للكسر عند الانكماش الحراري. كما يحسن من مقاومة التشقق الحراري (Thermal Cracking) من خلال خفض درجة التصدع الحرجة (Critical Cracking Temperature)، مما يقلل من احتمالية ظهور التشققات الطولية والعرضية. كذلك يعزز المطاط قوة التماسك الداخلي للخلطة (Cohesion)، ويحسن قوة الالتصاق بين البيتومين والركام (Adhesion)، ويزيد من مقاومة التجريد (Stripping)، الأمر الذي يقلل من انفصال الركام بفعل الماء والرطوبة. إضافة إلى ذلك، يتميز البيتومين المعدل بالمطاط بمقاومة أفضل للأكسدة والتصلب الحراري مع مرور الزمن، مما يحد من آثار الشيخوخة (Aging)، ويطيل العمر الخدمي للرصف، ويخفض تكاليف الصيانة الدورية.

الدراسات السابقة:

تناولت العديد من الدراسات العلمية والتطبيقية استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره (Crumb Rubber – CR) بوصفه مادةً معدلة للرابط الأسفلتي، وأظهرت نتائجها تحسناً في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية للرابط الأسفلتي، بما يسهم في تحسين أداء الرصف في الطرق السريعة. وفيما يلي عرض لأبرز هذه الدراسات:

1- الدراسات الرائدة في استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره:

تُعد تجربة ولاية أريزونا الأمريكية في أوائل سبعينيات القرن الماضي من أوائل التطبيقات العملية لاستخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره في الرصف الأسفلتي، حيث استُخدمت خلطات أسفلتية معدلة بالمطاط في رصف شوارع مدينة فينيكس. وقد أظهرت المتابعة الميدانية أداء هذه الطبقات لأكثر من عشرين عاماً دون الحاجة إلى صيانة رئيسية، مقارنة بعمر خدمي يتراوح بين (8–10) سنوات للخلطات الأسفلتية التقليدية.

وبعد نجاح هذه التجربة، تبنت إدارة النقل في ولاية كاليفورنيا (Caltrans) برنامجاً لتطوير الخرسانة الأسفلتية المطاطية (Rubberized Asphalt Concrete – RAC)، وطورت مواصفات فنية خاصة بها، وأظهرت الدراسات أن هذه الخلطات أسهمت في تقليل التشوه الدائم بنسبة (35–50%) في المناطق ذات المناخ الحار.

2- الدراسات المختبرية:

في دراسة أجراها Zanotto و Kenne Pohl عام (1996)، تم تحليل التفاعل الفيزيائي بين مسحوق المطاط والبيتومين، وخلصت الدراسة إلى أن حبيبات المطاط تمتص المكونات الخفيفة (Maltenes) من البيتومين، مما يؤدي إلى تورمها بنسبة تصل إلى (300%) وتكوين شبكة ثلاثية الأبعاد داخل الطور السائل، وهو ما يفسر التحسن في الخصائص الريولوجية للرابط الأسفلتي.

كما أجرى Putman وآخرون (2006) سلسلة من الاختبارات على روابط أسفلتية معدلة بالمطاط، وأثبتت النتائج أن الاستعادة المرنة (Elastic Recovery) ارتفعت من أقل من (20%) في البيتومين التقليدي إلى أكثر من (60%) في البيتومين المعدل، وفقاً لاختبار ASTM D6184، مما يعكس تحسناً واضحاً في السلوك الميكانيكي للرابط.

3- الدراسات الميدانية:

أشار تقرير الإدارة الفيدرالية للطرق السريعة الأمريكية (FHWA) الصادر عام (2018) بعنوان Asphalt–Rub–

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

ber: State of the Practice إلى أن استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره يسهم في خفض تكاليف دورة الحياة (Life–Cycle Cost Analysis – LCCA) بنسبة تتراوح بين (20%–30%) على مدى عشرين عاماً، رغم ارتفاع التكلفة الأولية بنسبة (10%–15%) مقارنة بالخلطات التقليدية.

ومن جهته، قارن Al–Qadi وآخرون (2015) بين أداء الرابط الأسفلتي المعدل بمسحوق المطاط والرابط الأسفلتي المعدل بالبوليمرات التقليدية مثل (SBS)، وأظهرت النتائج تفوق مسحوق المطاط في مقاومة التشقق الحراري، في حين أظهر (SBS) أداءً أفضل بدرجة طفيفة في مقاومة التشوه عند درجات الحرارة المرتفعة، مع بقاء مسحوق المطاط خياراً مناسباً من حيث الاستدامة البيئية والتكلفة الكلية.

4- الدراسات في المنطقة العربية:

في المملكة العربية السعودية، نُفذ مشروع تجريبي عام (2022) على طريق الرياض–الدرعية باستخدام خلطة أسفلتية معدلة بمسحوق المطاط بنسبة (20%) بطريقة (Wet Process). وبعد سنتين من الخدمة، أظهرت النتائج انخفاضاً في عمق التشوه الدائم بنسبة (32%)، إلى جانب تحسن ملحوظ في مقاومة الانزلاق، ولا سيما في الظروف المناخية الحارة.

وفي مصر، أجرى Elkashef وآخرون (2020) دراسة مختبرية نُشرت في مجلة Construction and Build–ing Materials، أوضحت أن إضافة (18%) من مسحوق المطاط المعاد تدويره إلى الرابط الأسفلتي أسهمت في رفع عمر التعب (عدد الدورات حتى الفشل) بنسبة (45%) تحت ظروف مناخية مشابهة للمناخ الصحراوي.

التعقيب على الدراسات السابقة والفجوة البحثية:

أظهرت الدراسات السابقة أن استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره يُعد من الأساليب الواعدة لتحسين خصائص وأداء الرابط الأسفلتي، حيث أكدت نتائجها تحسناً في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية، إلى جانب تعزيز مقاومة التشوه الدائم وتحسين أداء الرصف في الظروف المناخية الحارة.

وعلى الرغم من أهمية هذه الدراسات، فإنها أظهرت تبايناً في نسب إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره، كما اختلفت في طبيعة الاختبارات المعملية المستخدمة لتقييم خصائص وأداء الرابط الأسفلتي، الأمر الذي يجعل نتائجها غير قابلة للمقارنة بصورة مباشرة، ويحد من إمكانية تحديد نسبة إضافة تحقق أفضل أداء للرابط الأسفلتي في الطرق السريعة.

وتتمثل الفجوة البحثية في الحاجة إلى دراسة تأثير نسب مختلفة من مسحوق المطاط المعاد تدويره ضمن إطار تجريبي موحد، وباستخدام مجموعة متكاملة من الاختبارات المعملية، لتقييم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية للرابط الأسفلتي، وصولاً إلى تحديد نسبة الإضافة التي تحقق أفضل أداء ضمن نطاق هذه الدراسة.

وانطلاقاً من هذه الفجوة البحثية، جاءت الدراسة الحالية لتقييم تأثير ثلاث نسب من مسحوق المطاط المعاد تدويره (3%، 6%، 9%) على خصائص الرابط الأسفلتي باستخدام الاختبارات المعملية المعتمدة في هذه الدراسة، بهدف تحديد نسبة الإضافة التي تحقق أفضل أداء للرابط الأسفلتي المستخدم في الطرق السريعة.

منهجية وإجراءات البحث

تتناول الدراسة المواد المستخدمة والإجراءات التجريبية والاختبارات المعملية التي أُجريت لتقييم خصائص

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

الرابط الأسفلتي التقليدي والرابط الأسفلتي المعدل باستخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره (Crumb Rubber). كما تستعرض المنهجية الاختبارات المعملية المستخدمة لتقييم خصائص الرابط الأسفلتي قبل التعديل وبعده، مع بيان أهمية كل اختبار والأجهزة المستخدمة والمواصفات القياسية المعتمدة.

وتهدف هذه المنهجية إلى توفير بيانات دقيقة وموثوقة لتقييم أثر استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره في تحسين خصائص الرابط الأسفلتي، بما يسهم في رفع كفاءة أداء الطرق السريعة وتحقيق أهداف الدراسة.

يعد اختيار نوع الأسفلت من العوامل الأساسية في تصميم الدراسات المتعلقة بمواد الرصف، إذ تتأثر خصائص يُعد اختيار نوع الأسفلت من العوامل الأساسية في تصميم الدراسات المتعلقة بمواد الرصف، إذ تتأثر خصائص الطرق ومتانتها بنوع المادة الرابطة المستخدمة. في هذا البحث تم اعتماد الأسفلت التقليدي (Conventional Asphalt) نظراً لكونه الأكثر استخداماً في مشاريع البنية التحتية داخل المملكة العربية السعودية، حيث يتمتع بخواص فيزيائية مناسبة مثل اللزوجة والصلابة والمرونة، مما يجعله ملائمًا للطرق ذات الحركة المرورية المتوسطة إلى العالية.

تعتمد الجهات الرسمية في المملكة على معايير هندسية دقيقة لضمان جودة الأسفلت المستخدم، إذ تلزم الهيئة السعودية للمواصفات والمقاييس والجودة (SASO) المنتجين والمقاولين بالالتزام بالمواصفات المعتمدة في وزارة النقل، والتي تستند بدورها إلى معايير الجمعيات العالمية مثل ASTM International وAASHTO لضمان أداء الأسفلت تحت الظروف البيئية القاسية، خصوصًا الارتفاع الكبير في درجات الحرارة وتفاوت الرطوبة الموسمية.

تستخدم الإطارات المطاطية المطحونة كإضافة أساسية في هذه الدراسة بهدف تحسين الخواص الميكانيكية والبيئية للأسفلت. يتم الحصول على هذه المادة من إعادة تدوير الإطارات التالفة بعد طحنها إلى جزيئات دقيقة يتراوح حجمها بين 0.5 و2 ملم النوع الثالث أو الدرجة (b)، مطاط مدور مقاس (30–mesh) تمتاز هذه المادة بقدرتها على الارتباط الجزئي بالبيتومين وتعديل خصائصه من حيث المرونة والصلابة ومقاومة التشققات.

الخطوات المعملية:

- تم تحديد نسب الإضافة وفق دراسات سابقة وتجارب أولية تراوحت فيها كمية الإطارات المضافة بين 5% و20% من وزن البيتومين. تم اختيار ثلاث نسب رئيسية (3%، 6%، و9%) لدراسة أثرها على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للأسفلت.
- زمن الخلط الأمثل لمسحوق المطاط الطبيعي قليل التصلب هو 30 دقيقة عند درجة حرارة 180 درجة مئوية
- جرى تسخين البيتومين إلى درجات حرارة تراوحت بين 160 و190 درجة مئوية أثناء الخلط لضمان تجانس توزيع جزيئات المطاط داخل المزيج. إذ تعد درجة الحرارة عاملاً حاسمًا في نجاح عملية الدمج، حيث يؤدي ارتفاعها إلى تحسين الامتزاج الجزئي بين الزيت والمطاط، بينما يؤدي انخفاضها إلى ضعف الترابط بين المكونين.

– يتم إعداد الخلطات الإسفلتية المعدلة بالمطاط وفق طريقتين رئيسيتين:

1_ الطريقة الرطبة (Wet Process) : يتم فيها خلط جزيئات المطاط مع البيتومين السائل عند درجات حرارة تتراوح بين 170 و190 درجة مئوية، مع التحريك المستمر لمدة تتراوح من 45 إلى 60 دقيقة. يسمح ذلك بامتصاص جزيئات المطاط لجزء من الزيوت الموجودة في البيتومين، مما يؤدي إلى زيادة لزوجته وتحسين مرونته ومقاومته للانسياب.

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

2_ الطريقة الجافة (Dry Process): تضاف جزيئات المطاط إلى الركام الساخن قبل إدخال البيتومين، بحيث تعمل كمواد مالئة تساهم في تحسين تماسك الخلطة دون تفاعل كيميائي مباشر مع البيتومين.

أظهرت الدراسات أن الطريقة الرطبة تعطي أداءً أفضل في مقاومة التشققات الحرارية، بينما تتميز الطريقة الجافة بسهولة التنفيذ وانخفاض الكلفة التشغيلية.

– تم استخدام الطريقة الرطبة (Wet Process) في الدراسة.

الاختبارات المعملية التي تم إجراؤها:

(1) اختبار الكثافة النوعية وتحديد الوزن النوعي (Specific Gravity):

- تستخدم قيم الكثافة لتحويل الحجوم إلى وحدات كتلة، ولتصحيح الحجوم المقاسة من درجة حرارة القياس إلى درجة حرارة قياسية.
- **الأجهزة والمعدات التي تم استخدامها:** جهاز بكنوميتر قياسي زجاجي، حمام مائي، مقياس الحرارة، ميزان حساس، وكأس 600 مل.

(2) اختبار تحديد صلابة زحف الانحناء لرابط الأسفلت (BBR Test):

- تعتمد درجات الحرارة لهذا الاختبار على درجة حرارة الشتاء التي تتعرض لها الرصيف في المنطقة الجغرافية التي يُراد استخدام رابط الأسفلت فيها. يرتبط أداء التشقق الحراري في درجات الحرارة المنخفضة للرصف الأسفلتي بصلابة الزحف وقيمة m لرابط الأسفلت الموجود في الخليط.
- **الأجهزة والمعدات التي تم استخدامها:** إطار تحميل مع دعامات عينات الاختبار، حمام سائل ذو درجة حرارة مسيطر عليها يحافظ على عينة الاختبار عند درجة حرارة الاختبار، نظام لاكتساب البيانات محوسب، قوالب عينات الاختبار، وعناصر للتحقق من دقة النظام ومعايرته.

(3) اختبار نقطة تليين البيتومين (Softening Point Test):

- البيتومين هو عبارة عن مادة لزجة ومرنة بدون نقاط انصهار محددة بوضوح، تصبح أكثر ليونة وأقل لزوجة تدريجياً مع زيادة درجة الحرارة. ولهذا السبب، يجب تحديد نقاط التليين بطريقة تعسفية ومحددة بدقة إذا كانت النتائج قابلة للتكرار. نقطة التليين مفيدة في تصنيف البيتومين، كعنصر واحد في تحديد انتظام الشحنات أو مصادر الإمداد، وتشير إلى ميل المادة للتدفق عند درجات الحرارة العالية التي يتم مواجهتها أثناء الاستخدام.
- **الأجهزة والمعدات التي تم استخدامها:** حلقتين من النحاس، لوحة الصب: عبارة عن لوحة نحاسية مسطحة ناعمة بحوالي 50–75 ملم، كرات فولاذية اثنتان بقطر 9.5 ملم [3⁄8 بوصة] لكل منها كتلة 3.50 ± 0.05 ج، أدلة تمركز الكرات – دليلان من النحاس لتمركز الكرات الفولاذية، واحد لكل حلقة متوافقان مع الشكل والأبعاد العامة، إناء زجاجي يمكن تسخينه بقطر داخلي لا يقل عن 85 مم وعمق لا يقل عن 120 مم من قاع الفتحة، حامل من النحاس مصمم لدعم الحلقتين في وضع أفقي، مقياس حرارة بمدى من –2 إلى 80 درجة مئوية، وسخان كهربائي.

(4) اختبار نقطتي الوميض والاشتعال باستخدام جهاز كوب كليفلاند المفتوح (Flash and Fire Points Test):

- يتم استخدام اختبار نقطة الوميض في الشحن ولوائح السلامة لتحديد المواد القابلة للاشتعال والقابلة للاحتراق

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

كما يمكن أن تشير نقطة الوميض إلى احتمال وجود مواد شديدة التطاير وقابلة للاشتعال في مادة غير متطايرة أو غير قابلة للاشتعال نسبياً.

- الأجهزة **والمعدات التي تم استخدامها:** جهاز كليفلاند المفتوح، مقياس حرارة مقياس حرارة بمدى من –6 إلى 400 درجة مئوية، ومصدر تطبيق لهب بقطر 3.2 ملم.

(5) اختبار تأثير الحرارة والهواء على فيلم متحرك من رابط الأسفلت (اختبار فرن الأغشية الدوارة RTFO):

- معرفة التغيير التقريبي في خصائص البيتومين أثناء الخلط الساخن عند درجة حرارة 150 درجة مئوية وتحديد مقدار التغيير في الكتلة نتيجة تعرض البيتومين للهواء والتسخين المتكرر في محطات انتاج الخلطات الاسفلتية على الساخن.
- **الأجهزة والمعدات التي تم استخدامها:** فرن الاختبار الأغشية الدوارة، فرن تسخين، أوعية زجاجية قياسية، حامل لتبريد زجاجات العينات، مكشط معدني، ميزان الكتروني بدقه 0.001 جرام، وضاغط هواء (كمبروسر).

(6) الممارسة القياسية لتعتيق رابط الاسفلت بوعاء التقادم بالضغط (PAV TEST):

- تم تصميم هذه الاختبار لمحاكاة التعتيق التأكسدي أثناء الخدمة الذي يحدث في روابط الأسفلت أثناء خدمة الرصف. يمكن استخدام البقايا من ممارسة التكييف هذه لتقدير الخصائص الفيزيائية أو الكيميائية لروابط الأسفلت بعد عدة سنوات من التعتيق أثناء الخدمة في الطرق.
- **الأجهزة والمعدات التي تم استخدامها:** نظام معدات يتكون من وعاء ضغط، وأفران، وأجهزة تحكم في الضغط، وأجهزة تحكم في درجة الحرارة، وأجهزة قياس الضغط ودرجة الحرارة، ونظام تسجيل درجة الحرارة والضغط (أوعية العينات – ميزان الكتروني– فرن تجفيف– أسطوانة هواء مضغوط).

(7) اختبار الزحف واستعادة الإجهاد المتعدد (MSCR) لرابط الأسفلت باستخدام جهاز القص الديناميكي (DSR):

- تُستخدم طريقة الاختبار هذه لتحديد وجود الاستجابة المرنة في المادة الرابطة والتغير في الاستجابة المرنة عند مستويين مختلفين من الإجهاد. لقد ثبت أن امتثال الزحف غير القابل للاسترداد يُعد مؤشرًا على مقاومة مادة الرابط الأسفلتي للتشوه الدائم تحت التحميل المتكرر. يساعد هذا الاختبار في تحديد درجة الأداء للرابط الأسفلتي دون رفع درجة الأداء (الرابطة الأمريكية لمسؤولي الطرق السريعة والنقل AASHTO M332).
- **الأجهزة والمعدات التي تم استخدامها:** جهاز قياس القص الديناميكي (DSR)، قالب السليكون، مواد التنظيف وتشمل الأقمشة والمناشف الورقية، والمذيبات مثل البنزين والأستون، ولوح قياسي بقطر 25 ملم.

(8) اختبار قابلية التمدد لمادة البيتومين (Ductility Test):

- يستخدم الاختبار لتحديد قدرة البيتومين على التمدد قبل الانكسار، مما يعكس مرونته ومقاومته للتشققات الناتجة عن الأحمال أو التغيرات الحرارية.
- **الأجهزة والمعدات التي تم استخدامها:** جهاز المطولية، قوالب تشكيل العينة، حمام مائي بدرجة حرارة 25 درجة مئوية، وساعة توقيت.

(9) اختبار الغرز (Penetration Test):

- يستخدم اختبار الاختراق كمقياس للتماسك. تشير القيم الأعلى للاختراق إلى تماسك أكثر ليونة.
- **الأجهزة والمعدات التي تم استخدامها:** معدات الاختراق، أبره الاختراق وزنها 50 جرام، حمام مائي، وعاء الاختبار، وجهاز توقيت.

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

(10)اختبار اللزوجة الدوراني (Rotational Viscosity Test):

- قياس لزوجة الاسفلت في درجة حرارة الخلط والدمك.
- **الأجهزة والمعدات التي تم استخدامها:** جهاز اللزوجة الدوراني، جهاز التحكم في درجة الحرارة، وميزان الكتروني.

التحليل ومناقشة النتائج

تناولت الدراسة تحليل نتائج الاختبارات المعملية التي أجريت على عينات الرابط الأسفلتي بعد تحسينه بإضافة المطاط المعاد تدويره مقاس (mesh 30) بنسب مختلفة بلغت 3% و6% و9% من وزن الرابط، وذلك بهدف تحديد النسبة المثالية التي تُحقق أفضل توازن بين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للرابط، وتحديد درجة أدائه (Perfor-mance Grade) المناسبة لظروف التشغيل في الطرق السريعة بمدينة الرياض.

نتائج الاختبارات المعملية:

نتائج اختبار نقطة تليين البيتومين (Softening Point Test):

جدول (1): نتائج اختبار نقطة تليين البيتومين

Addition (CRM)	Result Softening Point (C°)		Average
	Ball No.1	Ball No.2	
0%	47.1	46.8	46.95
3%	50.9	51.3	51.1
6%	56.2	56.8	56.5
9%	61.1	60.6	60.9

نتائج اختبار نقطتي الوميض والاشتعال (Flash and Fire Point):

حسب المواصفة ASSHTO M332 نقطة الوميض يجب أن تكون اعلى من 230 C°، نقطة الاشتعال يجب أن تكون اعلى من 250 C° كقيمة إرشادية للسلامة التشغيلية.

جدول (2): نتائج اختبار نقطتي الوميض والاشتعال

(Addition (CRM)	Flash Point C°	Fire Point C°
0%	304	338
3%	318	345

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

6%	335	373
9%	358	397

نتائج اختبار الكثافة وتحديد الوزن النوعي (Specific Gravity):

جدول (3): نتائج اختبار الكثافة وتحديد الوزن النوعي

Addition (CRM)	A	B	C	D	Specific Gravity
0%	43.826	72.390	64.708	72.012	0.979
3%	43.826	72.390	66.754	73.955	1.064
6%	43.826	72.390	68.588	75.905	1.162
9%	43.826	72.390	70.663	77.812	1.249

$$\text{Relative Density} = \frac{(C-A)}{(B-A)-(D-C)} \text{ Density at water Kg/L 25 C}^{o}$$

Where:

A = mass of pycnometer (plus stopper).

B = mass of pycnometer filled with water.

C = mass of pycnometer (plus stopper) partially filled with asphalt.

D = mass of pycnometer plus asphalt plus water.

نتائج اختبار الغرز (Penetration Test):

جدول (4): نتائج اختبار الغرز

Addition (CRM)	1st Penetration Value, mm	2nd Penetration Val–ue, mm	3rd Penetration Value, mm	Average
0%	6.20	6.18	6.27	6.21

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

3%	5.77	5.83	5.30	5.63
6%	5.46	5.48	5.23	5.39
9%	5.16	5.13	4.95	5.08

نتائج اختبار قابلية التمدد لمادة البيتومين (Ductility Test):

جدول (5) نتائج اختبار التمدد لمادة البيتومين (الممطولية)

Addition (CRM)	Ductility Length, cm
0%	91.5
3%	77.1
6%	63.1
9%	49.3

نتائج اختبار الزحف واستعادة الإجهاد المتعدد (MSCR):

جدول (6): نتائج اختبار الزحف واستعادة الإجهاد المتعدد (MSCR)

Test Result	Non-recoverable creep (J-nr 3.2)	Non-recoverable creep (J-nr 0.1)	Testing Temperature °C	Addition (CRM)
64S-10	2.61846	2.65413	64	0%
64H-10	1.84358	1.49593	64	3%
70S-10	2.42641	2.24899	70	6%
76S-10	2.14026	2.15346	76	9%

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

جدول (7): مواصفات التشوه الدائم عند3.2) J-nr)

Type of Grade	Specification for non-recoverable creep compliance at 0.1 kPa (J-nr 3.2)
S	J-nr (3.2) >4.5 >2
H	J-nr (3.2) >2 >1
V	J-nr (3.2) >1.0 >0.5
E	J-nr (3.2) >0.5 >0.0

نتائج اختبار اللزوجة الدوراني (Rotational Viscosity Test)

جدول (8): يوضح نتائج اختبار اللزوجة الدوراني

Addition	Rotational Viscosity @ Temp,135	Rotational Viscosity @ Temp,165	Compaction Temperature	Mixing Temperature
0%	0.528	0.150	148-153	159-165
3%	0.530	0.161	154-159	165-170
6%	1.050	0.270	162-167	172-178
9%	1.288	0.320	166-170	175-181

التحليل والمناقشة:

في هذا الجزء من البحث يتم مناقشة وتحليل النتائج المتحصل عليها من الاختبارات المعملية التي تم أجراؤها على الرابط الأسفلتي التقليدي بعد أضافة نسب مختلفة من المطاط المعاد تدويره مقاس (mesh 30) ومقارنة النتائج بناءً على تحديد درجة الأداء للرابط الأسفلتي وفق الخطوات التي تم وصفها في المواصفة (AASHTO M332)، يتم تحديد درجة الأداء اعتماداً على التالي:

1. النماذج الرياضية المعتمدة أو الخارطة الحرارية للمملكة العربية السعودية، يرمز لدرجة الأداء المحددة بواسطة هذه الطريقة بالرمز PG-HH D-LL

حيث:

PG = درجة الأداء للرابط الأسفلتي.

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

HH = متوسط أعلى درجة حرارة متوقعة للرصف لسبعة أيام متوالية خلال عمره التصميمي.

LL = أدنى درجة حرارة متوقعة للرصف أثناء عمره التصميمي.

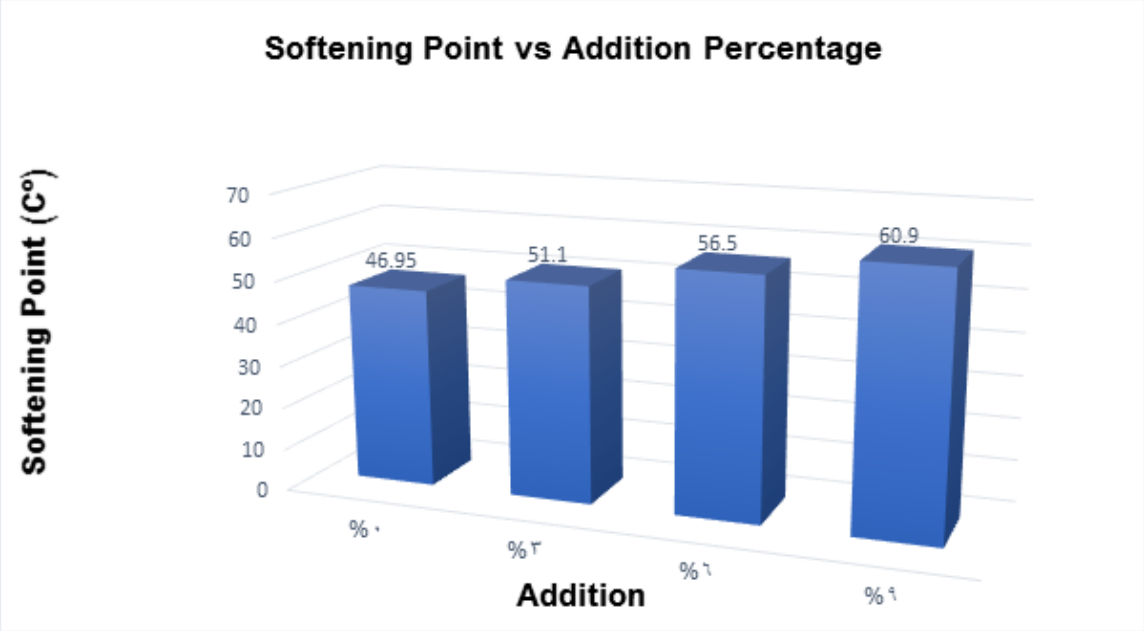
2. الرتب (D) وتحدد على حسب حجم المرور للمركبات في الطريق والسرعة التصميمية للطريق وتقسم الى (S, H، V, E).

جدول (5): اختيار صنف الأداء بناءً على حجم وسرعة المرور

Traffic Class	Designa–tion	ESAL, Repetition	Condition		Speed, Km/h	
Standard	S	< 10 mil–lion	And		70 km/h <	
High	H	10 to 30 million	Or		20 to 70 km/h	
Very High			V	30 million <	Or	< 20 km/h
Extreme			E	30 million <	And	< 20 km/h

اختبار نقطة تليين البيتومين (Softening Point Test):

- عند إضافة المطاط المعاد تدوره بنسب 3% و6% و9% لتحسين خواص الرابط التقليدي، كانت هنالك زيادة تدريجية في نقطة تليين البيتومين، مما يجعله أكثر مقاومة للتدفق عند درجات الحرارة المرتفعة.



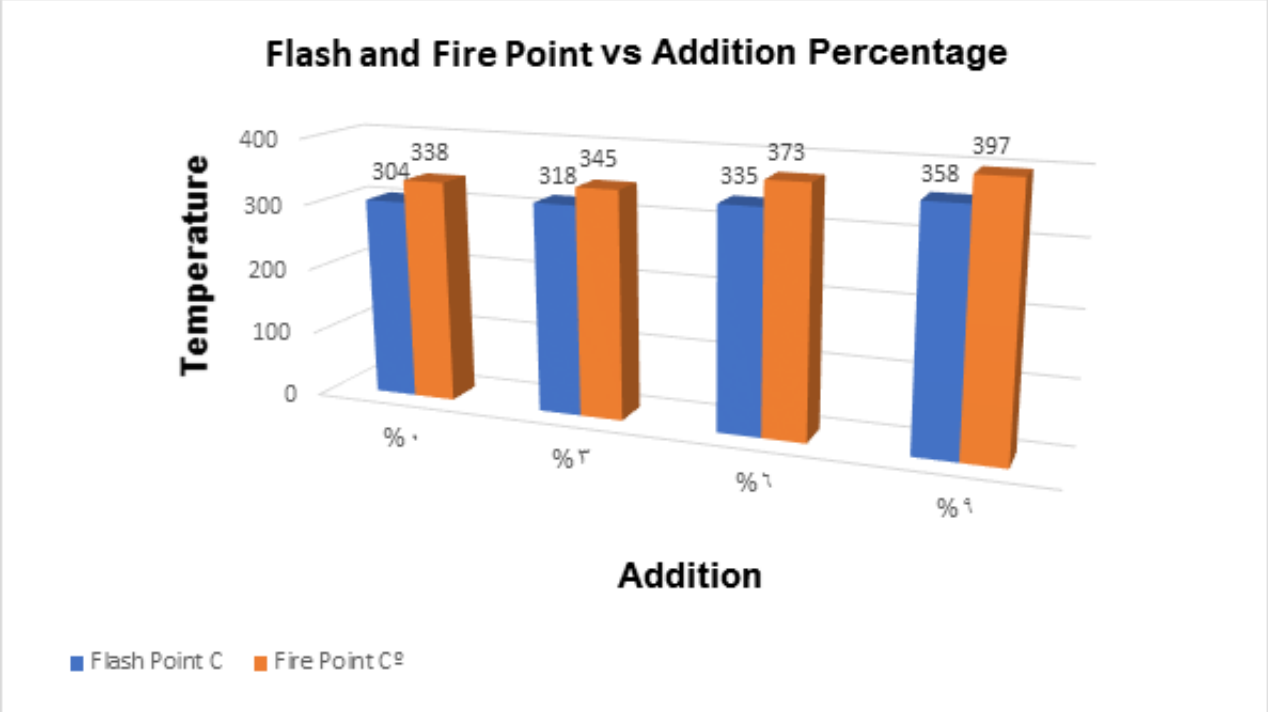
شكل (1) العلاقة بين نقطة تليين البيتومين والمادة المضافة

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

- البيتومين المعدل بالمطاط بنسبة 9% قد يكون الأنسب للطرق السريعة في المناطق ذات درجات الحرارة العالية مثل مدينة الرياض، حيث من خطر التشوهات الحرارية (Rutting).

اختبار نقطتي الوميض والاشتعال (Flash and Fire Point):

- عند أضافة نسبة 3% من المطاط يلاحظ زيادة طفيفة لكنها تشير الى تحسن تدريجي في الاستقرار الحراري.
- عند أضافة نسبة 6% الزيادة ملحوظة في نقطتي الوميض والاشتعال مما يدل على تحسين خصائص البيتومين وتأخر تصاعد الأبخرة القابلة للاشتعال.
- عند أضافة نسبة 9% أصبح البيتومين المحسن أكثر أمان للاستخدام والتسخين عندما يتعرض الى درجة حرارة عالية أثناء الخلط.

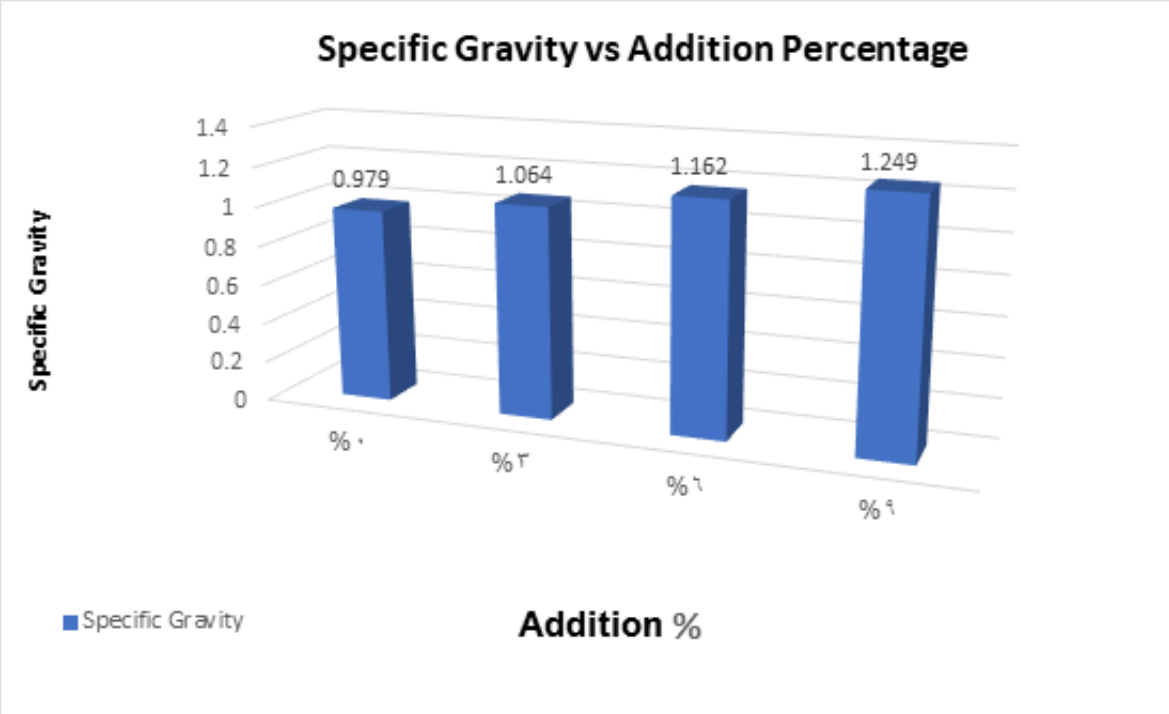


شكل (2) العلاقة بين نقطتي الوميض والاشتعال والمادة المضافة

اختبار الكثافة وتحديد الوزن النوعي (Specific Gravity):

- الكثافة النوعية للبيتومين بدون أي إضافات يقع ضمن النطاق القياسي (0.970 – 1.02) وعند أضافة البوليمرات البيتومين التقليدي يكون النطاق القياسي (0.970 – 1.20).
- زيادة المطاط رفعت الكثافة تدريجياً بسبب اندماج الجزيئات المطاطية داخل مصفوفة البيتومين، مما زاد تماسكه الداخلي.
- ارتفاع الكثافة يعكس زيادة في ثبات البنية الداخلية وارتباط المكونات بشكل أقوى، ما يساهم في أداء ميكانيكي أعلى.
- جميع القيم تقع ضمن النطاق القياسي للكثافة النوعية باستثناء عند أضافة نسبة 9% ارتفعت قيمة الكثافة قليلاً (1.249)، وقد يكون هذا مؤشراً على ضرورة مراقبة الكثافة النوعية عند أضافة نسب كبيرة من المطاط في البيتومين.

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X



شكل (3) العلاقة بين النوعية بين والمادة المضافة

اختبار الغرز (Penetration Test):

- انخفاض قيمة الغرز يعني أن البيتومين أصبح أكثر صلابة. وهذا مفيد لتحمل الأحمال العالية، لكنه قد يقلل من مرونة الرابط عند درجات الحرارة المنخفضة.
- النسبة المثالية (6–9%) توفر توازناً بين الصلابة والمرونة في ظروف الحرارة العالية.

شكل (4) يوضح العلاقة بين اختبار الغرز والمادة المضافة

اختبار قابلية التمدد لمادة البيتومين (Ductility Test):

- عند إضافة 3% من مادة المطاط:

هنالك انخفاض ملحوظ في الممطولية حوالي (15%–20%) بسبب زيادة اللزوجة وتغير التركيب الجزيئي للبيتومين. ومع ذلك، البيتومين لا يزال يحتفظ بقدر كافٍ من المرونة.

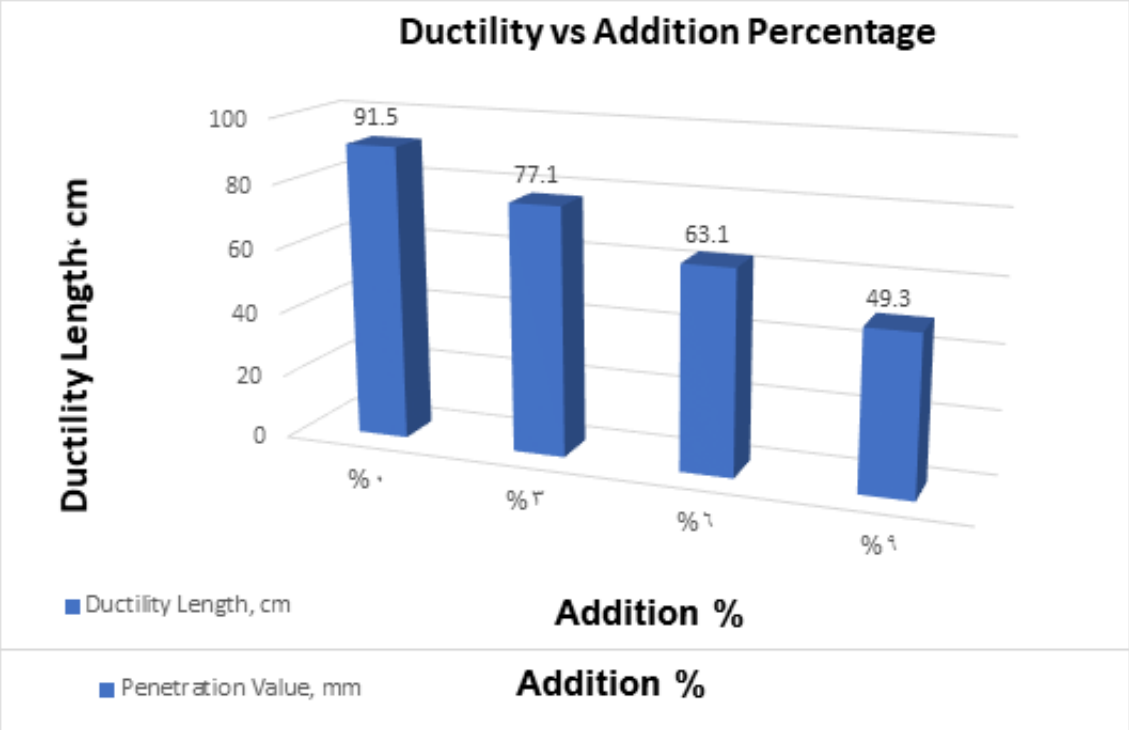
- عند إضافة 6% من مادة المطاط:

الانخفاض أصبح أكثر وضوحاً من (25%–35%). البيتومين أصبح أكثر صلابة وأقل استطالة، مما يجعله أقل عرضة للتشوهات الكبيرة.

عند إضافة 9% من مادة المطاط: انخفاض كبير في الممطولية (45%–55%) نتيجة لزيادة الصلابة، حيث يصبح البيتومين أكثر مقاومة للتمديد، فهذا يعني أن البيتومين أصبح أقل مرونة وأكثر هشاشة، ولا يمكنه التمدد كثيراً قبل أن يتشقق أو ينكسر لأنه فقد جزء من مرونته وقدرته على امتصاص الإجهادات الحرارية أو الحركية. النسبة العالية (9%) تعطي صلابة ممتازة لكنها تقلل الممطولية؛ لذلك يجب اختيار نسبة وسطية (6%) إذا كانت هناك

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

مخاوف من التشقق في درجات الحرارة المنخفضة.



شكل (5) العلاقة بين اختبار الممطولية والمادة المضافة

اختبار الزحف واستعادة الإجهاد المتعدد (MSCR):

- عند إضافة 3% ارتفع تصنيف الأداء الى PG64H-10، زيادة المطاط حسنت قدرة البيتومين على مقاومة التشوه الدائم عند الأحمال المتكررة، مما يناسب أحمال مركبات أكبر من 10 الى 30 مليون مركبة، وسرعة مرور أقل من 70 كلم/الساعة، ودرجات حرارة متوسطة. مما يجعله مناسب مع الطرق السريعة لمناطق جنوب وشمال المملكة العربية السعودية ذات دراجات الحرارة المتوسطة، ولكنه لا يصلح للطرق السريعة في منطقة الرياض ذات الحرارة المرتفعة.
- عند إضافة 6% ارتفع تصنيف الأداء الى PG70S-10، زيادة المطاط حسنت قدرة البيتومين على مقاومة التشوه الدائم عند درجات الحرارة المرتفعة، مما يجعله مناسب للاستخدام مع الطرق السريعة في مدينة الرياض ذات أحمال مركبات أقل من 10 مليون مركبة وسرعة تصميمية من 20 الى 70 كلم/الساعة، ولا يمكن استخدام هذه النسبة على الطرق السريعة ذات الأحمال المرورية التي تزيد عن 10 مليون مركبة أو ذات سرعة سرعه تصميمية أقل من 70 كلم/الساعة.
- عند أضافة نسبة 9% من المطاط ارتفع تصنيف الأداء إلى PG 76S-10، مما يناسب أحمال مركبات اقل من 10 مليون، وسرعة مرور أكبر من 70 كلم/الساعة، ودرجات حرارة مرتفعة جدًا. مما يظهر مقاومة أكبر للتشوه الدائم (Rutting) والتشققات (Fatigue Cracking).

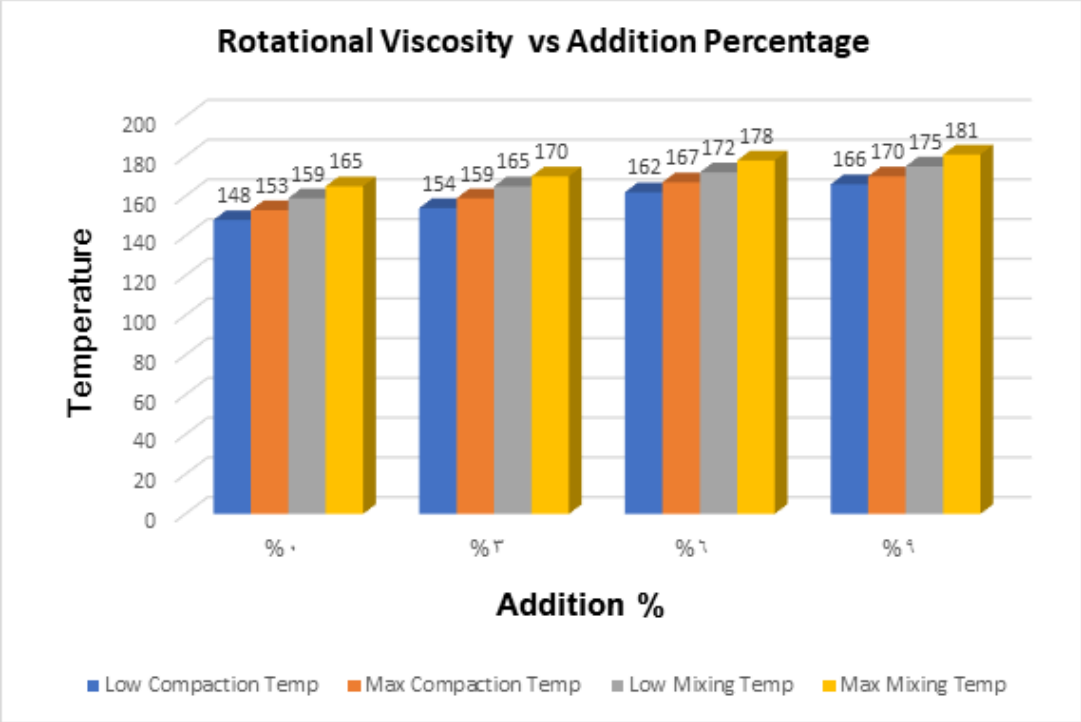
اختبار اللزوجة الدوراني (Rotational Viscosity Test):

- من نتائج اختبار اللزوجة تبين بانه تزداد اللزوجة مع زيادة المطاط، ما يعني الحاجة لدرجات حرارة خلط مرتفعة

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

في محطات انتتاج الاسفلت، ودرجة حرارة تشغيل أعلى عند وصول الاسفلت الى الموقع. لكن هذه الزيادة تبقى ضمن الحدود المسموح بها للمواصفة ((AASHTO M332.

- يزيد المطاط من محافظة الخلطة على درجة حرارة الاسفلت، حيث تنص مواصفات وزارة النقل السعودية للطرق، بأن لا تزيد المسافة بين موقع محطة انتتاج الاسفلت وموقع المشروع عن 150 كيلومتر. مما يجعل الرابط المحسن بالمطاط يحقق المعايير المطلوبةلإنتاج الخلطات الاسفلتية بجودة وكفاءة تشغيلية عالية.



شكل (6) العلاقة بين اختبار اللزوجة الدوراني والمادة المضافة

الخلاصة:

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره (Mesh 30) في تحسين خصائص وأداء الرابط الأسفلتي المستخدم في الطرق السريعة، وذلك من خلال تعديل الرابط الأسفلتي بإضافة ثلاث نسب وزنية من مسحوق المطاط المعاد تدويره (3%، 6%، 9%)، ثم إخضاع العينات المعدلة لمجموعة من الاختبارات المعملية وفقاً للمواصفات القياسية (ASTM وAASHTO).

أظهرت نتائج الدراسة تحسناً ملحوظاً في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية للرابط الأسفلتي المعدل، حيث أسهمت إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره في تحسين الاستقرار الحراري، وتعزيز مقاومة التشوه الدائم، وتحسين خصائص الزحف واستعادة الإجهاد المتكرر (MSCR). كما ارتفعت درجة أداء الرابط (Performance Grade) من PG 64–10 للرابط الأسفلتي التقليدي إلى PG 76–10 عند نسبة إضافة بلغت 9%. وبينت النتائج أن نسبة الإضافة 9% حققت أفضل أداء ضمن النسب المدروسة، مما يجعلها النسبة الأنسب لتحسين أداء الرابط الأسفلتي المستخدم في الطرق السريعة، ولا سيما في المناطق ذات درجات الحرارة المرتفعة، مثل مدينة الرياض. كما تؤكد الدراسة أهمية الاستفادة من مسحوق المطاط المعاد تدويره في تحسين أداء الرابط الأسفلتي، إلى جانب الإسهام في تعزيز الاستدامة البيئية من خلال إعادة تدوير مخلفات الإطارات.

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

النتائج:

أسفرت الدراسة عن النتائج الآتية:

1 – اسهمت إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره في تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية للرابط الأسفلتي مقارنة بالرابط الأسفلتي التقليدي.

2 – أدت إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره إلى زيادة نقطة التليين وقيم الومض والاشتعال، مما يعكس تحسناً في الاستقرار الحراري للرابط الأسفلتي.

3 – أظهرت نتائج اختبار الزحف واستعادة الإجهاد المتكرر (MSCR) تحسناً ملحوظاً في مقاومة التشوه الدائم وارتفاع قدرة الرابط الأسفلتي على الاستعادة المرنة.

4 – بينت نتائج الاختبارات المعملية زيادة في صلابة الرابط الأسفلتي المعدل، صاحبها انخفاض في قيم اختراق الإبرة والمطولية مقارنة بالرابط الأسفلتي التقليدي.

5 – ارتفعت درجة أداء الرابط (Performance Grade) من PG 64–10 للرابط الأسفلتي التقليدي إلى PG 76–10 عند نسبة إضافة بلغت 9%.

6 – حققت نسبة إضافة 9% من مسحوق المطاط المعاد تدويره أفضل أداء ضمن النسب المدروسة، مما يجعلها النسبة الأنسب لتحسين أداء الرابط الأسفلتي المستخدم في الطرق السريعة، ولا سيما في المناطق ذات درجات الحرارة المرتفعة، مثل مدينة الرياض.

التوصيات:

استناداً إلى نتائج الدراسة، توصي الدراسة بما يلي:

1_ اعتماد نسبة 9% من مسحوق المطاط المعاد تدويره (Mesh 30) بوصفها النسبة الأنسب لتحسين أداء الرابط الأسفلتي المستخدم في الطرق السريعة، ولا سيما في المناطق ذات درجات الحرارة المرتفعة، مثل مدينة الرياض.

2_ الاستفادة من نتائج هذه الدراسة عند تقييم استخدام الرابط الأسفلتي المعدل بمسحوق المطاط المعاد تدويره في مشاريع الطرق السريعة، وفقاً للمتطلبات الفنية والمواصفات المعتمدة.

3_ العمل على التوسع في استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره في تحسين خصائص الرابط الأسفلتي، بما يسهم في رفع كفاءة الرصف وتحقيق الاستفادة من مخلفات الإطارات.

4_ تشجيع تطبيق التقنيات التي تسهم في إعادة تدوير الإطارات المستهلكة واستخدامها في تحسين مواد الرصف، دعماً لمبادئ الاستدامة البيئية.

5_ الاستفادة من نتائج هذه الدراسة في دعم البحوث والتطبيقات المتعلقة بتطوير مواد الرصف باستخدام المواد المعاد تدويرها.

مقترحات للبحوث المستقبلية:

استناداً إلى نتائج هذه الدراسة، تُقترح الموضوعات البحثية الآتية لاستكمال الجوانب التي لم يتناولها البحث:

1_ إجراء دراسات ميدانية طويلة الأمد لتقييم أداء الرابط الأسفلتي المعدل بمسحوق المطاط المعاد تدويره تحت ظروف التشغيل الفعلية والظروف المناخية المختلفة.

المجلة العلمية المُحكمة للأكاديمية العربية الدولية
The Scientific Journal of the International Arab Academy
IUU Membership Certificate No.: 1102202600217 - Arab Impact Factor Certificate No.: 287
ISSN (ONLINE): 1858 - 8441 - ISSN (PRINT): 1858 - 845X

2_ دراسة تأثير استخدام أحجام حبيبات مختلفة من مسحوق المطاط المعاد تدويره، مثل (Mesh 20) و(40 Mesh)، على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والريولوجية للرابط الأسفلتي.

3_ دراسة تأثير آليات وطرق خلط مختلفة لمسحوق المطاط المعاد تدويره على خصائص وأداء الرابط الأسفلتي.

4_ دراسة إمكانية استخدام مسحوق المطاط المعاد تدويره بالاشتراك مع مواد محسِّنة أخرى، مثل البوليمرات أو المواد النانوية، وتقييم أثر ذلك على خصائص وأداء الرابط الأسفلتي.

5_ إجراء اختبارات معملية على عدد أكبر من نسب إضافة مسحوق المطاط المعاد تدويره، بهدف تحديد النسبة المثلى بدقة أكبر وتوسيع نطاق نتائج الدراسة.

6_ إجراء دراسات مقارنة لتقييم أداء الرابط الأسفلتي المعدل بمسحوق المطاط المعاد تدويره في ظروف تشغيل ومناخية مختلفة، بما يسهم في دعم تطبيقاته في الطرق السريعة.

المراجع:

1- Federal Highway Administration (FHWA), 2018.
2- Environmental Protection Agency (EPA), 2020.
3- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2015). Traffic and Highway Engineering (5th ed.). Cengage Learning.
4- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction (2nd ed.). NAPA Education Foundation.
5- Yang, H. H. (2020). Pavement Analysis and Design (2nd ed.). Pearson Education.
6- EPA. (2020). Tire Waste Management and Environmental Impact Report.
7- Asphalt Institute. (2001). Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types (Manual Series No. 2, 6th ed.).
8- Asphalt Institute, (2001), Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types (Manual Series No. 2, 6th ed.), Lexington, KY, p. 1.
9- Ministry of Transport (MOT), Saudi Arabia. (2020). General Specifications for Road and Bridge Construction (Section 400: Asphalt Works). Riyadh, Saudi Arabia.
10- AASHTO M 332-18. (2018). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
11- Hassan, H. F., & Al-Mansour, A. I. (2017). Effect of Crumb Rubber Modifier on the Performance of Asphalt Binder in Hot Climate Regions. International Journal of Pavement Engineering, 18(10), 890–902.
12- Al-Hadidy, A. I., & Yi-qiu, T. (2009). Effect of Polypropylene and Crumb Rubber Modifiers on Physical and Rheological Properties of Asphalt Binder. Construction and Building Materials, 23(1), 324–33.
13- ASTM Volume 04.03: Road And Paving Materials; Vehicle-pavement Systems
14- Saudi Aramco. Saudi Aramco Official Website. Accessed (2025) htt://ww.aramco.com