Journal of Technology Research (JTR)
Volume 3, Special Issue, (2025), pp 164-178, ISSN 3005-639X
The 7th Conference of Engineering Sciences and Technology
(CEST-2025)

# Study and Evaluation of Polymer-Modified Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend Test

Bashir M. Aburawi[1*], Hamza S. Aburawi[1]

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Al-Mirqab University, Al-Khums, Libya.
*Corresponding author email: Aburawi2018@gmail.com.

Received: 20-07-2025 | Accepted: 05-11-2025 | Available online: 25-12-2025 | DOI:10.26629/jtr.2025.19

**ABSTRACT**

Crack resistance in asphalt mixtures is a vital element for extending the lifespan of pavements and improving road quality. This research aims to study the effect of aging and polymer addition on crack resistance in asphalt mixtures using the Semi-Circular Bend (SCB) test. Asphalt samples were prepared and cut according to test requirements, then subjected to various aging conditions. The results showed that increasing the depth of the crack leads to a significant reduction in indirect tensile strength, regardless of the aging condition. The study also observed that aging enhances the stiffness and brittleness of the asphalt, increasing the likelihood of cracking. The use of appropriate additives is deemed essential for improving the performance of mixtures and extending their lifespan. The study emphasizes the importance of conducting regular tests and continuous maintenance of pavements, as well as the necessity of increasing the number of samples in laboratory experiments to achieve higher statistical accuracy, particularly when examining the effects of aging and different temperatures. The results highlight the significance of the SCB test as an effective tool for assessing crack resistance and stress the need to consider aging and additives to improve the long-term durability of roads.

**Keywords:** Modified asphalt, polymer, Semi-Circular Bend test, aging, indirect tensile strength.

# دراسة وتقييم الخلطات الاسفلتية المعدلة بالبوليمر باستخدام اختبار الانحناء النصف الدائري

بشير معمر أبوراوي[1]، حمزه سليمان أبوراوي[1]

[1] قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة الخمس، جامعة المرقب، الخمس، ليبيا.

**ملخـــــص البحـــــث**

تعد مقاومة التشقق في الخلطات الإسفلتية عنصرًا حيويًا لإطالة عمر الرصف وتحسين جودة الطرق. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير التقادم وإضافة البوليمر على مقاومة التشقق في الخلطات الإسفلتية من خلال استخدام اختبار الانحناء نصف الدائري. تم إعداد عينات إسفلتية وقصها وفقًا لمتطلبات الاختبار، ثم تعريضها لظروف تقادم متنوعة. أظهرت النتائج أن زيادة عمق الشق تؤدي إلى انخفاض ملحوظ في مقاومة الشد الغير مباشرة، بغض النظر عن حالة التقادم. كما لاحظت الدراسة أن التقادم يُعزز من قساوة وهشاشة الإسفلت، مما يزيد من احتمالية حدوث التشققات. يُعتبر استخدام إضافات مناسبة أمرًا ضروريًا لتحسين أداء الخلطات وزيادة عمرها الافتراضي. كما تؤكد الدراسة على أهمية إجراء اختبارات دورية وصيانة مستمرة للرصف، بالإضافة إلى ضرورة زيادة عدد العينات في التجارب


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

المعملية، لتحقيق دقة إحصائية أعلى، خاصة عند دراسة تأثيرات التقادم ودرجات الحرارة المختلفة. تُبرز النتائج أهمية اختبار **(SCB)** كأداة فعالة لتقييم مقاومة التشقق، وتشدد على ضرورة مراعاة التقادم والإضافات لتحسين متانة الطرق على المدى الطويل.

**الكلمات الدالة:** الأسفلت المعدل، البوليمر، اختبار الثني نصف الدائري، التقادم، مقاومة الشد الغير مباشر.

## 1. المقدمـة

تعد الخلطات الإسفلتية العمود الفقري لإنشاء الطرق الحديثة نظرًا لدورها الحيوي في تحمُّل الأحمال المرورية العالية والتقلبات المناخية الشديدة. ومع تزايد الضغوط على شبكات الطرق بسبب النمو السكاني وازدياد حركة النقل برزت الحاجة إلى تطوير خلطات أسفلتيه متطورة قادرة على مقاومة التشققات الناتجة عن الإجهادات الحرارية والميكانيكية. ومن هنا تأتي أهمية دراسة الخلطات الإسفلتية المُعدَّلة بالبوليمر والتي تُضاف لتحسين خواص الأسفلت التقليدي وزيادة متانته مقارنةً بالخلطة العادية . في هذا السياق يُعتبر اختبار الثني نصف الدائري-(Semi Circular Bend Test - SCB) اختبار دقيق لتقييم مقاومة التشقق في الخلطات الإسفلتية حيث يُحاكي الظروف الواقعية التي تتعرض لها الطبقات الإسفلتية أثناء الخدمة. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل أداء خلطة مدمجة مع (البوليمر) باستخدام اختبار SCB تحت ظروف معينة وذلك لتحديد مدى تأثير إضافة البوليمر على تحسين مقاومة التشقق وإطالة العمر التشغيلي للرصف. يتميز الاختبار بقدرته على قياس مؤشرات حيوية مثل طاقة الكسر (Fracture Energy) وإجهاد الكسر (Fracture Stress) والتي تعكس قدرة الخلطة على امتصاص الطاقة ومنع انتشار التشققات. كما يوفر مقارنةً موضوعيةً بين الخلطات عبر تحليل منحنيات الحمل– الإزاحة مما يساعد في فهم سلوك المواد تحت ظروف الإجهاد المختلفة. ومن خلال تطبيق المعايير الدولية مثل (ASTM D8044) . تكتسب هذه الدراسة أهميتها من دورها في دعم صناعة الطرق المستدامة حيث تُسهم الخلطات المُعدلة بالبوليمر في تقليل الحاجة إلى الصيانة الدورية وخفض التكاليف طويلة المدى. كما تُقدّم رؤىً علمية حول تفاعل البوليمر مع المكونات الإسفلتية مما يفتح آفاقًا جديدةً لتحسين تصميم الخلطات في المستقبل. باختصار تمثل هذه البحث خطوةً عمليةً نحو تعزيز جودة البنية التحتية من خلال دمج التكنولوجيا الحديثة مع تقنيات الاختبارات المتقدمة مثل SCB .

تركز هذه الدراسة على تقييم أداء الخلطة المعدلة بالبوليمر من خلال استخدام اختبار الانحناء النصف الدائري (SCB)لفهم سلوك الكسر في الخرسانة الإسفلتية وتأثيره على تصميم خلطات أكثر مقاومة للتشقق، مما يسهم في إطالة العمر الافتراضي للطرق وتقليل تكاليف الصيانة. إن ظهور التشققات في الرصف يؤدي إلى تدهور سطح الطريق، مما يزيد من حوادث المرور ويعرض سلامة المستخدمين للخطر. وبما أن غياب منهجية واضحة لتقييم أداء الكسر يعيق مقارنة النتائج بين الدراسات، فإن هذه الدراسة تسهم في سد هذه الفجوة، مما يقلل الحاجة إلى إصلاحات متكررة ويخفض استهلاك الموارد الطبيعية والانبعاثات الكربونية المرتبطة بأعمال الإنشاء.

تؤدي التشققات في الرصف الأسفلتي إلى مشكلات عديدة، حيث تسمح بتسرب المياه إلى طبقات الرصف الأساسية، مما يضعف قدرتها التحميلية ويسرع من تدهور الرصف ويزيد من خشونة سطح الطريق، مما يؤثر سلبًا على راحة وسلامة المستخدمين. كما أن تكاليف صيانة وإعادة تأهيل الطرق المتشققة تكون مرتفعة، مما يشكل عبئًا كبيرًا على ميزانيات الدول. وتواجه صعوبة في التنبؤ بسلوك التشقق نتيجة لتعقيد التفاعلات بين مكونات الخلطة الإسفلتية، مثل الركام والأسفلت والفراغات والمضافات، فضلاً عن التحديات التقنية في محاكاة الظروف الواقعية خلال الاختبارات المعملية، مما يؤدي إلى وجود فجوة بين النتائج النظرية والتطبيق العملي. يهدف هذا البحث إلى تقييم الطرق الحالية لاختبار الكسر في الخرسانة الإسفلتية

باستخدام اختبار الثني (SCB) ومقارنة فعاليتها في ظروف مختلفة، وتحليل العوامل المؤثرة على سلوك الكسر، مثل درجة الحرارة وخصائص الخلطة الإسفلتية. كما يقدم توصيات عملية لتحسين تصميم الخلطات الإسفلتية وتعزيز أداء الرصف في المناطق ذات الأحمال المرورية العالية.

تعتبر مقاومة التشقق من الخواص الأساسية التي تؤثر بشكل كبير على أداء ومتانة الخلطات الإسفلتية المستخدمة في رصف الطرق.

فالتشققات التي تظهر في الرصف الأسفلتي تؤدي إلى تدهوره التدريجي مما ينعكس سلبًا على جودة القيادة ويزيد من احتمالية وقوع الحوادث بالإضافة إلى ارتفاع تكاليف الصيانة والإصلاح اللازمة لإعادة الرصف إلى حالته الجيدة. تنشأ هذه التشققات غالبًا نتيجة للإجهادات المتكررة الناتجة عن أحمال المرور والتي تتسبب بمرور الوقت في إجهاد وتعب المادة الإسفلتية مما يؤدي في النهاية إلى فشلها وظهور الشقوق.

تعتمد الخلطات الإسفلتية المستخدمة في الرصف المرن على مبدأ الانحناء الطفيف تحت الأحمال ثم العودة إلى وضعها الأصلي مما يمثل خاصية المرونة لهذا النوع من الرصف. وتتنوع الخلطات الإسفلتية المستخدمة حول العالم ويعكس هذا التنوع اختلاف الاستخدامات والخبرات بالإضافة إلى الظروف البيئية والاقتصادية المتاحة في منطقة إنشاء الطريق خاصة فيما يتعلق بتوفر المواد والآلات والتقنيات اللازمة. ومع ذلك تتفق جميع أنواع الخلطات الإسفلتية في ضرورة تحقيق خصائص أساسية معينة وهو ما يمكن الوصول إليه من خلال الالتزام بالمواصفات الفنية وطرق التصميم والإنشاء.

تلعب البوليمرات دوراً هاماً في تحسين أداء الخلطات الإسفلتية وهي مواد عضوية تتكون من وحدات متكررة ترتبط معًا لتشكيل سلاسل طويلة عند إضافتها تتفاعل مع مكونات الخلطة لتعزيز خصائصها. من أهم فوائد استخدام البوليمرات:

- **تحسين المرونة والمتانة:** إضافة بوليمرات مثل المعدلة بالمطاط يزيد من مرونة ومتانة الخلطة مما يقلل من التشققات والتآكل.
- **زيادة مقاومة التآكل:** استخدام بوليمرات معدلة كيميائياً يحسن مقاومة الخلطة للتآكل والتأثيرات البيئية.
- **تعزيز مقاومة الماء:** تساعد البوليمرات المعدلة في زيادة مقاومة الخلطة للماء وبالتالي منع تدهورها.
- **تحسين قابلية التشغيل:** بعض البوليمرات تحسن قابلية تشغيل الخلطة في درجات الحرارة المنخفضة مما يجعلها أكثر مرونة وسهولة في التطبيق.
- **زيادة التصاق الأسفلت:** استخدام البوليمرات يقوي التصاق الأسفلت بالركام والرمل مما يضمن تماسكاً جيداً بين المكونات.

بشكل عام يمكن لتحسين خواص الخلطات الإسفلتية باستخدام البوليمرات أن يزيد من عمرها التشغيلي وكفاءتها في مقاومة التآكل والظروف البيئية المختلفة. تتوفر أنواع عديدة من البوليمرات المناسبة لهذا الغرض مثل البوليمرات البتروكيماوية واللدائن المطاطية المصنعة (SEBS SBS - - EVA وغيرها). يعتمد اختيار نوع البوليمر المناسب وتركيزه الأمثل على خصائص الخلطة والظروف المحيطة.

يتطلب تطوير الخلطات الإسفلتية المحتوية على البوليمرات دراسة دقيقة للتركيبة والتفاعلات الكيميائية والخواص الميكانيكية بالإضافة إلى إجراء اختبارات وتحليلات لضمان الأداء المطلوب.

تتطور تقنيات تحسين خواص الأسفلت والخلطات الإسفلتية بشكل مستمر مما يساعد في زيادة متانة الطرق وتحسين أدائها. حيث تستخدم المضافات البوليمرية لتحسين المرونة والصلابة مما يقلل من التشققات الناجمة عن تغيرات درجات الحرارة. وتساعد في تحسين أداء الأسفلت في الظروف الباردة. ويمكن بتسخين الأسفلت

أثناء الخلط ان يحسن خصائص الأسفلت الفيزيائية مما يساعد في التصاقه بشكل أفضل بالركام. ويستخدم أسفلت يحتوي على مواد تستطيع إصلاح نفسها عند ظهور التشققات مما يزيد من عمر الطرق. ويتم استخدام تقنيات حديثة في محطات الخلط لضمان توازن دقيق بين المكونات وتحسين جودة الخلطات. ويوضح الشكل (1) بعض من انواع البوليمر المستخدمة في اعمال الطرق. وتساهم التقنيات الحديثة في تحسين خواص الأسفلت والخلطات الإسفلتية بشكل كبير مما يعزز من متانة الطرق وأدائها. من خلال الاعتماد على هذه الابتكارات يمكن تحقيق نتائج أفضل في مشاريع البناء وتوفير بيئة طرق أكثر استدامة.

**شكل 1.** أنواع البوليمر المستخدمة في اعمال الطرق.

يعد تقادم الأسفلت في الخلطة الإسفلتية عاملاً رئيسياً يؤثر سلباً على أداء الرصف الأسفلتي وعمره الافتراضي حيث يتسبب في أضرار وظيفية. تتضمن علامات التقادم ظهور تشققات على السطح فقدان المرونة تكسر الخلطة وضعف التصاق الأسفلت بالركام. ويعرف التقادم بأنه تغير في خصائص الأسفلت والخلطة الإسفلتية نتيجة لتغيرات في تركيبها الكيميائي ويحدث على مرحلتين رئيسيتين:

- **التقادم قصير المدى:** يحدث بسرعة خلال عمليات الخلط والتخزين والنقل حيث يتعرض الأسفلت للهواء ودرجات حرارة مرتفعة مما يؤدي إلى تبخر المواد الخفيفة وزيادة صلابة المادة الإسفلتية.
- **التقادم طويل الأمد:** يحدث بعد رصف الخلطة في درجات الحرارة المحيطة نتيجة للعوامل الجوية والأحمال المرورية خلال فترة خدمة الأسفلت.

يؤدي التقادم إلى تغييرات في خصائص الخلطة الإسفلتية مما يقلل من متانتها ويزيد من صلابتها وهشاشتها ويجعل الرصيف أكثر عرضة للفشل والتعب والتشققات الحرارية. تزيد التشققات السطحية من سرعة تقادم الأسفلت بسبب زيادة تعرضه للأكسجين. بالمقابل إذا كانت طبقة الرصف ذات تدرج جيد ومدموكة بشكل جيد فإن معدل التقادم يكون أقل نظراً لانخفاض نسبة الفراغات الهوائية.

للحد من تأثير التقادم على الخلطات الإسفلتية يمكن اتباع إجراءات وقائية مثل الصيانة الدورية للطرق وإصلاح التشققات بانتظام واستخدام مواد معالجة لتحسين مقاومة الخلطة للتقادم بالإضافة إلى تطبيق تقنيات حديثة في تصميم وتنفيذ هذه الخلطات.

استخدم الرابط الأسفلتي المعدل منذ أكثر من 50 سنة وقد لاقى اهتماماً إضافياً في العقد الماضي وعلى الرغم من أن استخدام الأسفلت المعدل مكلف أكثر من استخدام الأسفلت التقليدي إلا أنه يزيد من عمر الرصف الأسفلتي ويتم ذلك التعديل من خلال إضافة عدة مواد كالبوليميرات أو المواد المالئة والألياف الصناعية والإطارات البالية وغيرها من الإضافات وذلك لتحسين خواص الأسفلت . وقد استخدم الأسفلت المعدل بالبولمير لتحسين أداء الرصف الأسفلتي في مجالات عديدة منها إنقاص تشققات الرصف الناتجة عن الإجهادات الحرارية والحمولات المتكررة وانقاص التخدد والناتج عن التشوهات اللدنة وزيادة مقاومة الرابط الأسفلتي للتعب الناتج عن درجات الحرارة العالية المرافقة للإنشاء واعطاء الرابط الأسفلتي قساوة عالية في درجات حرارة الخدمة العالية ومرونة أكبر في درجات حرارة الخدمة المنخفضة وللوصول أيضاً إلى التصاق أكبر بين حبيبات الركام والأسفلت في حال وجود

الرطوبة [1–3]. يعتبر استخدام البوليمر في أعمال الطرق تطورا هاما في صناعة البنية التحتية للطرق حيث يساهم في تحسين جودة الطرق وزيادة عمرها الافتراضي وتقليل تكاليف الصيانة. كما يساهم في الاستدامة البيئية عن طريق تعزيز إعادة التدوير وتقليل استهلاك الموارد الطبيعية [4].

تستخدم تقنية استخدام ألياف البولمير كتقوية في الخلطات الإسفلتية في السنوات الأخيرة وتحظى بشعبية متزايدة. من خلال إضافة أنواع مختلفة من ألياف البولمير إلى الخلطات الإسفلتية مثل ألياف البولمير الاصطناعية مثل الزجاج والكربون وألياف البولمير الطبيعية مثل القنب والكتان يمكن زيادة قوة الشد للأسفلت وهذا يعزز متانة الأسفلت ويمنع تدهوره بشكل أسرع مما يحدث في خلطات الأسفلت التقليدية.

ويعتبر الغرض الرئيسي من إضافة ألياف البولمير إلى الخلطات الإسفلتية هو تعزيز قوة الشد مما يحسن خصائص الكسر للرصف. وتساعد ألياف البولمير في توزيع الأحمال المطبقة بشكل أكثر توازنا في الخلطات الإسفلتية مما يقلل من تكون وانتشار التشققات. وبالتالي يتم زيادة قدرة الشد للرصف الأسفلتي مما يجعله أكثر مقاومة للتشقق ويحسن أدائه العام [5].

تعمل ألياف البولمير كتقوية عن طريق ربط التشققات ومنع انتشارها مما يزيد من قوة الشد ويساعد وجود ألياف البولمير في التقليل من تكون ونمو التشققات مما يعزز مقاومة الرصف الأسفلتي لتشققات التعب والتشققات الحرارية. ويمكن أن تعزز تقوية ألياف البولمير متانة الرصف الأسفلت من خلال تقليل حدوث التشققات الانعكاسية والتي غالبًا ما يسببها التشققات الأساسية في طبقات الرصف. ومن خلال تحسين خصائص الكسر والمتانة للرصف الأسفلتي يمكن أن تسهم تقوية ألياف البولمير في زيادة عمر الخدمة للرصف وبالتالي تقليل الحاجة لأعمال الصيانة المتكررة [6].

من المهم أن نلاحظ أن فعالية تقوية ألياف البولمير يمكن أن تختلف اعتمادًا على عوامل مثل نوع ألياف البولمير ونسبة محتوى ألياف البولمير وتصميم الخلطة الإسفلتية. لذلك فإن اختيار الأنواع المناسبة من ألياف البولمير وتحسين معلمات تصميم خلطة الأسفلت هي أمور حاسمة لتحقيق التحسينات المرغوبة في أداء رصيف الأسفلت.

بشكل عام إضافة ألياف البولمير إلى خلطات الأسفلت تعزز قدرتها على مقاومة الكسر والتآكل وبالتالي تعزز أدائها ومتانتها على المدى الطويل. ومع ذلك يجب مراعاة العوامل المحددة لكل مشروع وتصميم الخلطة بعناية لضمان تحقيق أفضل النتائج الممكنة [7].

التشوه الدائم (التخدد) هو واحد من أكثر أنواع الأضرار التي ترتبط بالحمولة والتي تؤثر في أداء الرصف الأسفلتي [8]. وفقًا لمسح شامل قامت به إدارة الطرق السريعة الفدرالية في عام 1998 اعتبر أول الأضرار في الطرق الإسفلتية يليها تشقق الإجهاد وبعده التشققات الحرارية. يشكل ضرر التشوه الدائم (التخدد) قلقا كبيرا لسببين على الأقل. فالحفريات تحتجز الماء وتسبب الانزلاق مما يشكِل تهديدًا والحفر التي تتطور في العمق تجعل التوجيه يصعب بشكل متزايد مما يؤدي إلى قلق كبير بشأن السلامة [9]. ويوضح الشكل (2) شكل ضرر التشوه الدائم الذي يحث على الطرق نتيجة لزيادة الاحمال المرورية. تعتبر الخلطات الإسفلتية المعدلة بالبوليمر أكثر انتشارا في إنشاء الطرق لتلبية الأحمال المرورية العالية في الوقت الحالي وبالإضافة إلى ذلك تكرس العديد من الجهود لتعديل الخلطات الإسفلتية باستخدام أنواع مختلفة من البوليمرات لتعزيز مقاومة الأسفلت المعدل إلى التأثيرات الناتجة عن درجات الحرارة العالية والمنخفضة مما يسمح بالحد من آليات الفشل المعتادة مثل تشققات الإجهاد والتشققات الحرارية وللوصول أيضاً إلى التصاق أكبر بين حبيبات الركام والأسفلت [10].

**شكل 2.** أضرار التخدد على الطرق الاسفلتية.

تهدف هذه التقنيات إلى تحويل المواد المستهلكة إلى بليمرات الطرق المستدامة والقابلة للاستخدام. يجري العديد من الأبحاث والتطويرات في هذا المجال لتحسين هذه التقنيات وتحقيق كفاءة أفضل وجودة عالية للمنتجات المتولدة عنها. ان استخدام بليمرات الطرق المستدامة يوفر العديد من الفوائد البيئية وتشمل عدة فوائد.

يعتبر استخدام بليمرات الطرق المستدامة وسيلة فعالة لتقليل كمية النفايات البلاستيكية التي تنتجها المجتمعات. بدلاً من التخلص من المواد البلاستيكية المستهلكة في المكبات الصحية أو الحرق يتم إعادة تدويرها واستخدامها في صناعة بليمرات الطرق مما يساهم في تقليل تراكم النفايات وتدفقها إلى المناطق البيئية.

يمكن أن يساهم استخدام بليمرات الطرق المستدامة في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. إنتاج البلاستيك التقليدي يكون مرتبطًا بانبعاثات غازات الدفيئة من عمليات استخراج وتكرير النفط وإنتاج البلاستيك. وعلى العكس من ذلك يعتمد إنتاج بليمرات الطرق المستدامة على إعادة تدوير المواد البلاستيكية المستهلكة مما يقلل من الاحتياج إلى استهلاك النفط ويقلل من انبعاثات الكربون المرتبطة به.

يساعد استخدام بليمرات الطرق المستدامة في تحقيق التوازن بين الاحتياجات البشرية والحفاظ على البيئة. من خلال إعادة تدوير المواد البلاستيكية واستخدامها في إنتاج بليمرات الطرق يتم تعزيز مفهوم الاقتصاد الدائري واستدامة الموارد ويتم تقليل الاعتماد على المواد الأولية الجديدة.

يمكن للبليمرات أن تقلل من نفاذية الماء إلى طبقات الطرق مما يقلل من تأثير التآكل الناجم عن المياه ويحسن استقرار الأساس الطرقي.

تتمتع بليمرات الطرق المستدامة بخواص ميكانيكية ممتازة مثل مقاومة التآكل والتشقق والتآكل. وبالتالي تحسن جودة الطرق المصنوعة من بليمرات الطرق المستدامة مما يؤدي إلى تقليل الحاجة إلى الصيانة وإعادة البناء المتكررة وبالتالي تقليل استهلاك المواد والطاقة المرتبطة بهذه العمليات وتقليل الأثر البيئي العام للطرق.

يمكن للبليمرات أن تزيد من متانة ومقاومة الطرق للتآكل والتشقق والتآكل الكيميائي [11]. وتساعد في تقليل حدوث تشققات وحفر في الطرق وتطيل عمرها الافتراضي.

يمكن للبوليمرات أن تزيد من استقرار الطرق وتقليل تشوهاتها الناتجة عن التغيرات المناخية وحركة المرور الثقيلة. وتحسن البولميرات أيضًا قدرة الطرق على التحمل وتقليل تأثير العوامل البيئية الضارة.

يتطلب إنتاج البلاستيك التقليدي استهلاك كميات كبيرة من الموارد الطبيعية مثل النفط والغاز الطبيعي. ومع استخدام بليمرات الطرق المستدامة يمكن تقليل الاعتماد على هذه الموارد الطبيعية غير المتجددة وتوفيرها للاستخدامات الأخرى. ويعتبر استخدام البولمير في الطرق أحد الطرق الصديقة للبيئة لتحسين استدامة البنية التحتية للطرق. يساعد في تقليل استخدام المواد الحجرية التقليدية ويوفر إعادة تدوير البلاستيك والمواد البلاستيكية الأخرى.

ويلخص الشكل (3) فؤائد استخدام البوليمر وتحسين الأسفلت في أعمال الطرق.

**شكل 3.** فوائد استخدام البوليمر وتحسين الأسفلت في أعمال الطرق.

### 9.2. تقليل تكاليف الصيانة

بفضل مقاومتها الأعلى للتآكل والتشقق تقلل الطرق المحتوية على البولميرات من التكاليف المرتبطة بالصيانة وإعادة البناء المتكررة.

تتنوع أنواع البولميرات المستخدمة في الطرق وتكويناتها وفقًا لمتطلبات كل مشروع والتحديات المحددة. ويتم استخدام البولميرات عادة في صورة مواد إضافية تمتزج مع المواد الأساسية للطرق مثل الأسفلت أو الركام الأساسي. استخدم اختبار SCB لتحليل مقاومة الكسر لـ13 خلطة اسفلتية مصممة بطريقة Superpave. أظهرت النتائج أن قيم (Jc) كانت حساسة للتغيرات في نوع المادة الرابطة وحجم الركام الأقصى الاسمي. واقترحت الدراسة أن اختبار SCB يمكن أن يكون أداة قيمة لتقييم مقاومة الكسر في الخلطات الإسفلتية [12].

في دراسة اخرى تم تقييم مقاومة الكسر في درجات الحرارة المنخفضة لستة خلطات إسفلتية باستخدام اختبار SCB. أشارت النتائج إلى اعتماد قوي لمقاومة الكسر في درجات الحرارة المنخفضة على درجة حرارة الاختبار. كما وجدوا أن كلًا من معدل التحميل وطول الشق لهما تأثير كبير على طاقة الكسر عند أعلى درجة حرارة اختبار [13].

بالتحقيق في تأثير الرطوبة على خصائص الكسر في الخلطات الإسفلتية باستخدام اختبار SCB. تم استخدم تقنية Plackett-Burman لتحليل حساسية سبعة عوامل تؤثر على نتائج الاختبار. أظهرت النتائج أن عمق الشق وموقعه كانا أكثر العوامل تأثيرًا إيجابيًا بينما كان معدل التحميل والفراغات الهوائية أكثر العوامل تأثيرًا سلبيًا [14].

بتقييم تكرار اختبار SCB وإمكانية تكراره في ولاية يوتا. أظهرت النتائج أن اختبار SCB قادر على التمييز بين الخلطات المختلفة وأن قيمة مؤشر المرونة (FI) بين 6 و 8 يمكن أن تميز الخلطات غير المناسبة [15].

ركزت دراسة اخرى على تقدير مقاومة التشقق في الخلطات الإسفلتية في درجات الحرارة المتوسطة من خلال تقييم خصائص التماسك والالتصاق لأنظمة الركام المربوط باستخدام طريقة طاقة السطح الحرة. تم استخدام اختبار الثني النصف الدائري (SCB) لدعم تحليل طاقة السطح الحرة. أظهرت نتائج الاختبار تأثير SBS الإيجابي على أداء الخلطات الإسفلتية [16].

بتقييم تأثير معدل التحميل لاختبار الثني النصف الدائري على معايير ميكانيكا الكسر المختلفة للخلطات الإسفلتية في درجة حرارة متوسطة. أوصت الدراسة بمعدلات تحميل تتراوح بين 3 و 5 مم/دقيقة [17]. بالتحقيق في تأثير تعديل الأسفلت بالبوليمر SBS على مقاومة التشقق باستخدام اختبار SCB. أظهرت النتائج أن إضافة SBS زادت من مقاومة الكسر والحمل الأقصى الذي يمكن أن تتحمله الخلطة قبل الفشل [18].

استخدم العديد من الباحثين اختبار الثني النصف الدائري (SCB) كأداة لتقييم مقاومة التشقق في الخلطات الإسفلتية التقليدية. وقد ركزت هذه الدراسات على فهم كيفية تأثير العوامل المختلفة المتعلقة بتركيب الخلطة وظروف الاختبار على نتائج هذا الاختبار. حيث قام العديد من الباحثين بتقييم تأثير نوع الركام المستخدم في الخلطة الإسفلتية وتدرجه الحبيبي بالإضافة إلى محتوى الأسفلت المستخدم ونسبة الفراغات الهوائية الموجودة في العينة المختبرة على مقاومة التشقق التي تم قياسها باستخدام اختبار SCB وقد أظهرت نتائج هذه الدراسات أن نتائج اختبار SCB تعتبر حساسة بشكل كبير للتغيرات التي

تحدث في تركيب الخلطة الإسفلتية وكذلك الظروف التي يتم فيها إجراء الاختبار مثل درجة الحرارة وسرعة التحميل.

في سياق تحليل نتائج هذه الدراسات تم تحديد عدد من المؤشرات الرئيسية التي يتم استخدامها بشكل شائع لتقييم مقاومة التشقق في الخلطات الإسفلتية باستخدام اختبار SCB. تشمل هذه المؤشرات طاقة الكسر (Gf) والتي تمثل الطاقة اللازمة لإنشاء وحدة مساحة جديدة من سطح الكسر؛ ومعامل المرونة (FI) الذي يعكس قدرة الخلطة على تحمل التشقق والتعب؛ وصلابة الكسر (KIC) التي تشير إلى مقاومة المادة لبدء انتشار الشقوق؛ بالإضافة إلى معدل إطلاق طاقة الإجهاد الحرج (Jc) الذي يستخدم لتقييم مقاومة التشقق في ظل ظروف معينة من التحميل ودرجات الحرارة.

تجدر الإشارة إلى أن قيمة Jc تعتبر مؤشرًا مهمًا بشكل خاص لتقييم مقاومة التشقق في درجات الحرارة المتوسطة وقد تم تضمينها في مواصفات وزارة النقل والتنمية في ولاية لويزيانا (DOTD) كمعيار لتقييم أداء الخلطات الإسفلتية.

بالإضافة إلى ذلك يعكس معامل المرونة (FI) قدرة الخلطة الإسفلتية على تحمل التشقق الناتج عن التعب حيث تشير القيم الأعلى من FI إلى زيادة في مقاومة الخلطة لهذا النوع من الفشل.

عند مناقشة تأثير العوامل المختلفة على نتائج اختبار SCB للخلطات الإسفلتية العادية تبين أن نوع الركام المستخدم في الخلطة وتدرجه الحبيبي يلعبان دورًا كبيرًا في تحديد مقاومة الكسر.

كما أن نسبة الفراغات الهوائية الموجودة في الخلطة تؤثر أيضًا على نتائج الاختبار وفي بعض الحالات لوحظ أن قيمة معامل المرونة (FI) قد تزداد مع زيادة نسبة الفراغات الهوائية وهو ما قد يشير إلى زيادة في مرونة الخلطة .

بالإضافة إلى ذلك يلعب محتوى الأسفلت دورًا حاسمًا في مقاومة التشقق حيث أن الخلطات الإسفلتية التي تحتوي على نسبة أعلى من الأسفلت البكر قد تظهر مقاومة أفضل لانتشار الشقوق.

تم استخدام اختبار الثني النصف الدائري (SCB) على نطاق واسع في العديد من الدراسات لتقييم أداء الخلطات الإسفلتية التي تم تعديلها باستخدام أنواع مختلفة من البوليمرات. وقد تناولت هذه الدراسات تأثير إضافة البوليمرات مثل (ستايرين – بوتادين – ستايرين (SBS)) و(إيثيلين – فينيل أسيتات (EVA)) وغيرها على مقاومة التشقق في الخلطات الإسفلتية .

ركزت بعض هذه الدراسات بشكل خاص على تحديد تأثير نسبة البوليمر المضاف إلى الخلطة على مقاومتها للتشقق باستخدام اختبار SCB بالإضافة إلى ذلك تم في العديد من الأبحاث فحص تأثير أنواع مختلفة من البوليمرات على أداء الخلطات الإسفلتية في اختبار SCB بهدف تحديد أي من هذه البوليمرات يوفر أفضل تحسين في مقاومة التشقق.

أظهرت نتائج هذه الدراسات بشكل عام أن إضافة البوليمرات مثل SBS إلى الخلطات الإسفلتية يؤدي إلى زيادة في مقاومة الكسر وقيم الحمل الأقصى التي يمكن أن تتحملها الخلطة قبل الفشل وذلك في كل من درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة وقد توصلت بعض الدراسات إلى أن استخدام نسبة 4% من بوليمر SBS في تعديل الخلطة الإسفلتية يوفر أفضل أداء من حيث مقاومة التشقق مقارنة بالنسب الأخرى التي تم اختبارها .بالإضافة إلى ذلك تم في العديد من الأبحاث دراسة تأثير استخدام أنواع أخرى من البوليمرات مثل EVA والبولي يوريثان والمطاط المعاد تدويره على أداء الخلطات الإسفلتية في اختبار SCB وقد أظهرت هذه البوليمرات أيضًا قدرة على تحسين مقاومة التشقق في بعض الحالات.

تعمل عملية تعديل البوليمر على تعزيز مرونة وقوة الخلطات الإسفلتية مما يؤدي إلى زيادة مقاومتها لتكوين الشقوق وانتشارها.

بالإضافة إلى ذلك يمكن أن يؤدي استخدام البوليمرات في تعديل الخلطات الإسفلتية إلى تحسين خواص الالتصاق بين الركام والأسفلت وهو ما يساهم بدوره في زيادة مقاومة التشقق في هذه الخلطات .علاوة على ذلك قد يقلل تعديل

البوليمر من حساسية الخلطات الإسفلتية للتغيرات في درجات الحرارة مما يحسن من أدائها في مختلف الظروف الجوية التي قد تتعرض لها.

تعتبر التشققات أحد أبرز أشكال التلف التي تصيب طبقات الرصف الأسفلتي مما يؤثر على سلامة هيكلها ومتانتها على المدى الطويل. لذلك تبرز أهمية استخدام طرق اختبار متقدمة لتقييم مقاومة المواد لهذه الأنواع من التلف. يشير اختصار (SCB) الي ( Semi-Circular Bending) يصف هذا المصطلح تحديدًا طريقة اختبار يتم فيها تعريض عينة نصف دائرية غالبًا ما تحتوي على شق لقوى انحناء باستخدام نظام تحميل ثلاثي النقاط حتى يحدث الكسر يستخدم هذا الاختبار على نطاق واسع لتقييم مقاومة التكسير وخواص الكسر في الخلطات الإسفلتية.

يُعد اختبار الانحناء نصف الدائري SCB أحد الاختبارات القياسية المعتمدة والمهمة في مجال هندسة مواد الرصف الأسفلتي لتقييم الخواص الميكانيكية الحيوية ومقاومة التشقق. تم اعتماده من قبل الجمعية الأمريكية لاختبار المواد (ASTM) كطريقة قياسية لمقارنة مقاومة التشقق في الخلطات الإسفلتية المختلفة. يوفر اختبار SCB طريقة بسيطة نسبيًا لكنها قوية لتقييم مقاومة الكسر مما يجعله أداة قيمة لأغراض البحث العلمي ومراقبة الجودة في المشاريع الإنشائية. إن التطور نحو استخدام مواصفات الأداء في تصميم الرصف يسلط الضوء على الأهمية المتزايدة لاختبارات مثل SCB التي تقيم وظائف المواد بشكل مباشر بدلاً من التركيز فقط على تركيبها. ويستخدم اختبار SCB بشكل أساسي في تقنية الأسفلت للأغراض التالية:

**تقييم مقاومة الكسر:** الهدف الرئيسي هو تقييم مقاومة الكسر أو مقاومة التشقق في الخلطات الخرسانية الإسفلتية . يساعد هذا الاختبار في تحديد خصائص الكسر للخرسانة الإسفلتية وهو أمر حيوي نظرًا لأن الكسر الناتج عن الأحمال الميكانيكية يُعد سببًا رئيسيًا لتلف طرق الأسفلت. ويمكن استخدام الاختبار لتقييم مقاومة التكسير الناتج عن الإجهاد المتكرر (التعب) في عينات أسفلتيه نصف دائرية مدموكة. يعمل اختبار SCB كأداة أساسية لفهم كيفية تصرف الخلطات الإسفلتية المختلفة تحت الضغوط والإجهادات الناتجة عن حركة المرور والعوامل البيئية خاصة فيما يتعلق بالتكسير.

يمكن تطبيق اختبار SCB في مراقبة الجودة وضمانها للخلطات الإسفلتية لضمان أن المواد المنتجة والمدموكة تلبي معايير مقاومة التكسير المحددة. يمكن أن يُكمل هذا الاختبار تصاميم الخلطات التقليدية القائمة على الحجم من خلال توفير تقييم قائم على الأداء. ولا يزال البحث جاريًا لتطوير مواصفات عملية لتطبيق اختبار SCB في عمليات مراقبة الجودة الروتينية. إن دمج اختبار SCB في إجراءات مراقبة الجودة يمكن أن يؤدي إلى طرق أكثر متانة من خلال ضمان استخدام خلطات ذات مقاومة كافية للتكسير في الإنشاء. يمكن لهذا النهج الاستباقي أن يمنع حالات الفشل المبكر.

كما يستخدم الباحثون اختبار SCB للتحقيق في تأثير العوامل المختلفة على مقاومة التكسير في الخلطات الإسفلتية مثل درجة الحرارة ومعدل التحميل وعرض الشق والفراغات الهوائية في العينة وخصائص رابط الأسفلت وخصائص الركام واستخدام المواد المعاد تدويرها أو الإضافات. كما يساعد في تقييم فعالية الإضافات والمعدلات والمجددات المختلفة في تحسين أداء الأسفلت فيما يتعلق بالتكسير. يُستخدم الاختبار أيضًا لتطوير والتحقق من صحة معايير ومواصفات أداء جديدة للخلطات الإسفلتية. يلعب اختبار SCB دورًا حاسمًا في تطوير تقنية الأسفلت من خلال توفير طريقة موثوقة لتقييم تأثير المواد الجديدة ونهج التصميم على مقاومة التكسير. هذا يسهل الابتكار في هذا المجال

قامت منظمات مثل ASTM International, والرابطة الأمريكية لمسؤولي النقل والطرق السريعة بالولايات (AASHTO), واللجنة الأوروبية للتوحيد القياسي (CEN) بتطوير معايير لاختبار SCB. كما شاركت إدارات النقل الحكومية المحددة (DOTDs) مثل Louisiana DOTD و Nebraska Department

of Transportation في تطوير وتنفيذ طرق اختبار SCB.

ويعد اختبارًا بسيطًا نسبيًا ولكنه قوي لتقييم مقاومة الكسر. يمكن تحضير العينات بسهولة من أجهزة الضغط الدوراني أو الجسات المأخوذة من الموقع. وتعتبر إجراءات الاختبار سهلة التنفيذ في بيئة المعمل. يوفر قدرة تحميل متعددة الاستخدامات في أوضاع كسر نقية ومختلطة. ويسمح التصميم الهندسي للعينة بإجراء محاكاة تفاعلية وتحليل التحميل باستخدام برامج العناصر المحدودة . تشير بعض الدراسات إلى أن اختبار SCB يوفر تمثيلاً أكثر دقة لقوة الشد مقارنة باختبارات مثل اختبار الشد غير المباشر (IDT). يمكن إجراء اختبار SCB على كل من العينات المحضرة في المعمل والعينات المأخوذة من الرصف في الموقع.

يمكن أن يتأثر اختبار مؤشر المرونة SCB بعوامل مثل درجة حرارة الاختبار ومعدل التحميل وعرض الشق والفراغات الهوائية. قد يتطلب الاختبار معدات محددة على الرغم من الجهود المبذولة لتكييفه مع أجهزة تحميل أكثر شيوعًا مثل أجهزة اختبار

## 2. الجانب العملي والمنهجية:

سيتم عرض الآلية المتبعة للحصول على النتائج المتعلقة بالعينات، بما في ذلك طريقة إعداد العينات وتعريضها لظروف التقادم المختلفة، بالإضافة إلى تعديلها لتلبية المواصفات المطلوبة لإجراء الاختبار وتحقيق الأهداف المنشودة. في هذه الدراسة، تم استهداف الخلطة الإسفلتية المستخدمة في مشاريع رصف الطرق، حيث تم اختيارها لتقييم تأثير زمن التقادم على خواصها.

العينات هي ذات أشكال أسطوانية ذات قطر 100 mm أخذت باستخدام جهاز القص الاسطواني في الموقع كما يبين الشكل رقم (4) شكل العينات.

**شكل 4.** شكل العينات من الموقع.

تم قص العينات التي أخذت من الموقع للطريق السابق ذكرها لتحاكي الاشتراطات اللازمة لتحقيق اختبار SCB بأبعاد المطلوبة والشكل رقم (5) يوضح العينات بعد عملية القص والتسوية ويبين الجدول رقم (1) ابعاد العينات وحالة التقادم.

**شكل 5.** يوضح العينة بعد القص والتسوية.

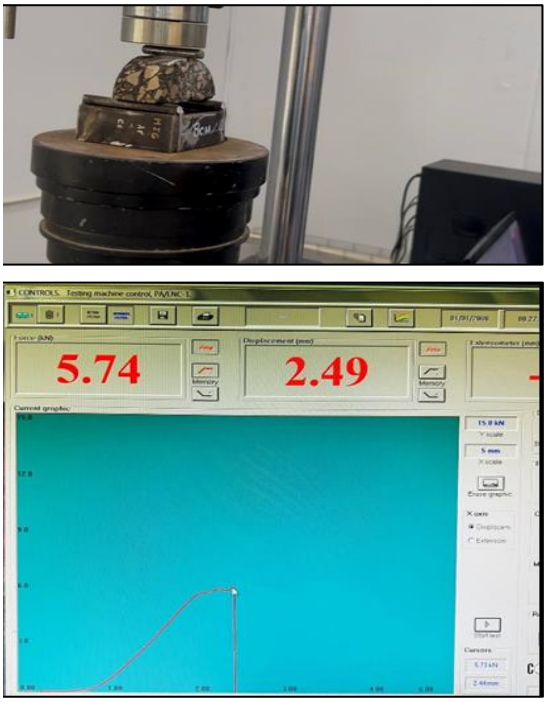
**جدول 1**. ابعاد وحالة العينات.

| رقم العينة | عمق الفتحة (mm) | التقادم عن 85 (يوم) |
|---|---|---|
| A | 0 | 0 |
| B | 0 | 5 |
| 1 | 5 | 0 |
| 2 | 5 | 0 |
| 5 | 10 | 0 |
| 6 | 10 | 0 |
| 9 | 15 | 0 |
| 10 | 15 | 0 |
| 3 | 5 | 5 |
| 4 | 5 | 5 |
| 7 | 10 | 5 |
| 8 | 10 | 5 |
| 11 | 15 | 5 |
| 12 | 15 | 5 |

تم تقســـيم العينات الي مجموعتين المجموعة الاولى تم اخضـــاعها لدرجة حرارة الغرفة والمجموعة الثانية عند درجة حرارة 85 درجة مئوية لخمســة أيام متواصــلة. وتم اختبار جميع العينات عند درجة حرارة 15 درجة مئوية. والشــكل رقم (6) يوضــح شــكل العينات عند تعريضــها لظروف التقادم.

**شكل 6.** العينات داخل فرن التقادم.

ولقد تم اجراء الاختبار على هذه العينات لتبيين مقدار أقصي حمل بواسطة الجهاز والشكل رقم (7) يوضح شكل الجهاز المتصل بالحاسب الالي. ولقد قمنا بصناعة قاعدة تمكننا من تثبيت العينة في الجهاز لتوفير الشروط والمعايير لهدا الاختبار. والشكل رقم (8) يوضح وآلية وضع العينة في جهاز الاختبار.

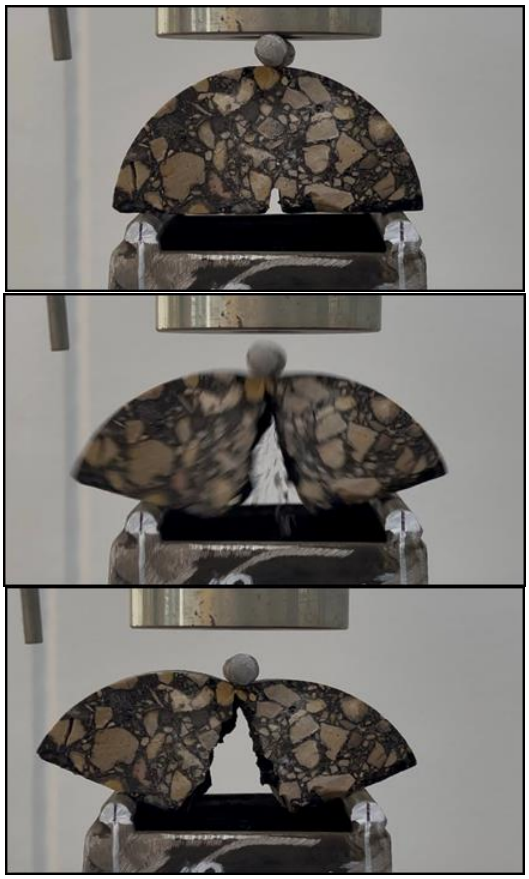



**شكل 7.** الجهاز المستخدم في الاختبار.

**شكل 8.** ألية وضع العينة على القاعدة.

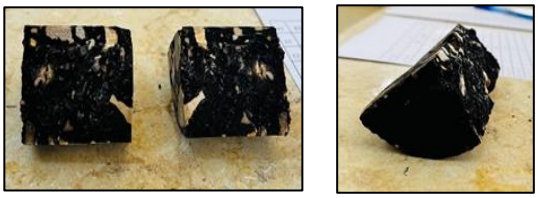
ويتم فيه هذا الاختبار تسليط حمل بمعدل 0.5 mm/min ويتم تسجيل اقصى حمل للعينة (P) قبل الكسر والذي يظهر على لوحة جهاز الحاسوب المشغل للجهاز وتظهر ايضا قيمة التدفق (الازاحة) منذ بداية تسليط الحمل حتى لحظة الكسر.

عند تعريض العينة لحمل فأنها تتأثر بالحمل المسلط على مراحل حتى الكسر والشكل رقم (9) يوضح مراحل الاختبار من بداية التحميل حتى مرحلة كسر العينة.

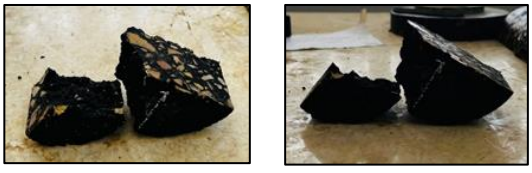


**شكل 9.** مراحل الاختبار.

شكل الكسر بعد اجراء الاختبار عادة ما يعبر عن بعض الخواص الميكانيكية حيث تفقد هذه العينات مقاومتها عند الكسر والشكل رقم (10) يوضح اتجاه وشكل الكسر في العينات الموجود بها شق والشكل رقم (11) يوضح اتجاه وشكل الكسر للعينات بدون شق فيها .



**شكل 10.** شكل الكسر في العينات التي يوجد بها شق.



**شكل 11.** شكل الكسر في العينات التي لا يوجد بها شق.

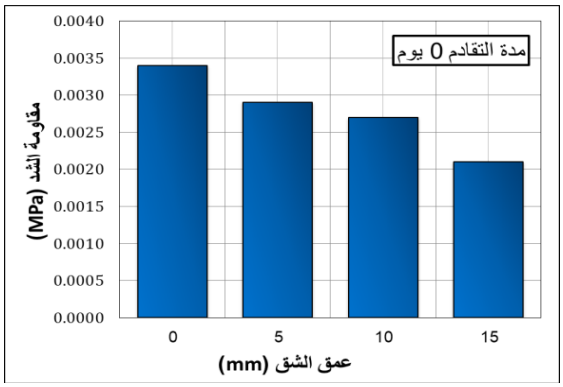
## 3. النتائج والمناقشة

سيتم عرض كافة النتائج المعملية التي تم إجرائها على كافة العينات بواسطة اختبار الانحناء النصف الدائري (SCB) على هيئة جداول وأشكال وسوف يتم تفسير وتوضيح وإعداد المقارنات للنتائج المختلفة وتبين مدى كفاءة كل منها وبناء صورة عامة عنها.

حيث تم اخد المتوسط لكل العينات سواء كانت العينات المرجعية وكذلك الامر بالنسبة للعينات المعرضة لظروف التقادم وتأكيد النتائج بطريقة علمية واضحة. تم ملاحظة التغير في لون العينات بعد اخضاعها لظروف التقادم وقد تغير الي اللون الاسود القاتم مما يدل على التغير في خواص مادة الاسفلت بعد التقادم نتيجة درجات الحرارة ويوضح الشكل رقم (12) لون العينات قبل اجراء الاختبار.

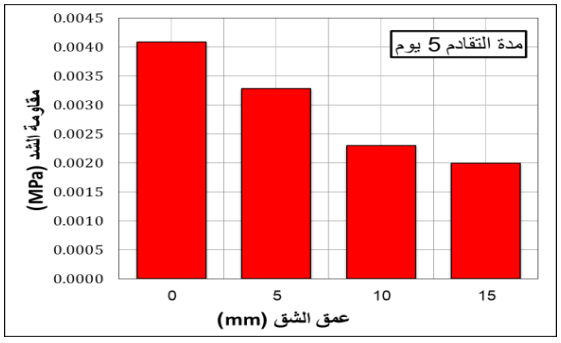
**شكل 12.** شكل العينات بعد اجراء الاختبار.

من خلال النتائج المتحصل عليها والموضحة بالشكل رقم (13) والذي يبين العلاقة بين مقاومة الشد لاختبار SCB للعينات مع عمق الشق للعينات التي لم تتعرض لظروف التقادم. ومن خلال الشكل نلاحظ ان قيمة مقاومة الشد لاختبار SCB للعينات تنخفض بزيادة عمق الشق في العينة حيث يتماشى هذا الاتجاه مع مبادئ ميكانيكا الكسر الأساسية حيث يقلل الشق الأعمق (أو الكسر) من مساحة المقطع العرضي الفعالة التي تقاوم الحمل وبالتالي يقلل من المقاومة للكسر الذي يمكن للعينة تحمله قبل الفشل.



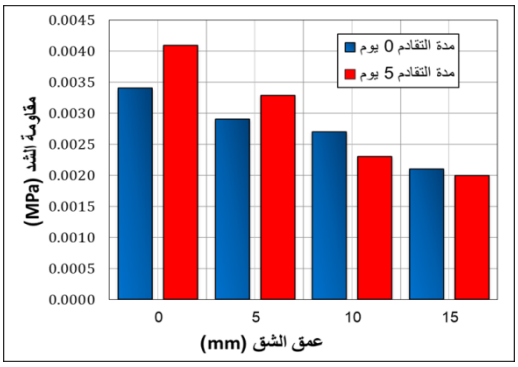

**شكل 13.** العلاقة بين مقاومة الشد مع عمق الشق للعينات التي لم تتعرض للتقادم.

من خلال الشكل رقم (14) والذي يبين العلاقة بين مقاومة الشد لاختبار SCB للعينات مع عمق الشق للعينات التي تعرضت لظروف التقادم. ومن خلال الشكل نلاحظ ان قيمة مقاومة الشد لاختبار SCB للعينات اخذت نفس سلوك العينة التي لم تتعرض للتقادم حيث انخفضت المقاومة بزيادة عمق الشق في العينات.



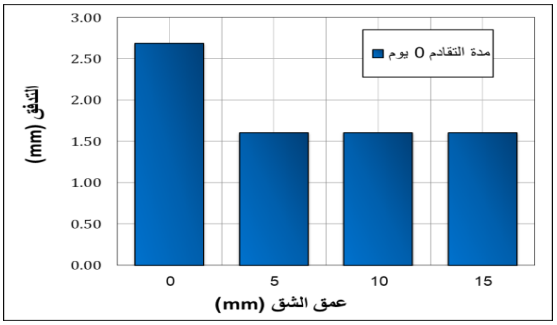

**شكل 14.** العلاقة بين مقاومة الشد مع عمق الشق للعينات التي تعرضت للتقادم.

من خلال الشكل رقم (15) والذي يبين العلاقة بين مقاومة الشد لاختبار SCB للعينات مع عمق الشق للعينات التي تعرضت وللعينات التي لم تتعرض لظروف التقادم. ومن خلال الشكل نلاحظ ان قيمة مقاومة الشد لاختبار SCB للعينات التي تعرضت للتقادم كانت اعلى من مقاومة الشد للعينات التي لم تتعرض للتقادم ويرجع ذلك الي المواد الملدنة الموجودة بالأسفلت قد تطايرت بفعل عوامل التقادم وأصبحت العينات متصلبة نتيجة لذلك.



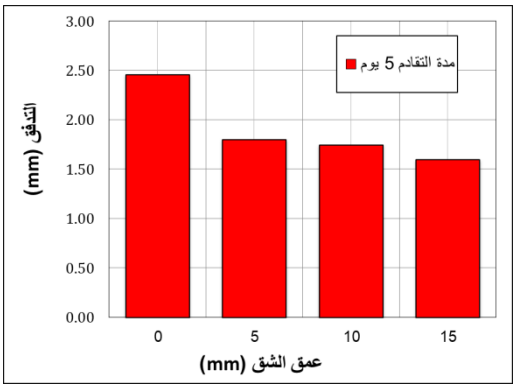

**شكل 15.** العلاقة بين مقاومة الشد مع عمق الشق لجميع العينات.

يوضح الشكل رقم (16) متوسط التدفق انخفاضاً كبيراً مع عمق الشق حيث تنخفض قيمة التدفق للعينات المشقوقة عن العينات التي لا يوجد بها شق بشكل واضح. يشير هذا إلى أن وجود عامل تركيز للإجهاد يقلل بشكل كبير من قدرة التشوه الكلية قبل الفشل بالنسبة لأعماق الشقوق التي تتراوح من 5 مم إلى 15 مم يظل متوسط التدفق متسويا للغاية حيث يظهر اختلافات طفيفة فقط يشير هذا التساوي اللافت للتدفق في العينات غير المتقادمة عند أعماق الشقوق 5 مم 10 مم و 15 مم إلى أنه بمجرد إدخال عمق شق حرج (في هذه الحالة 5 مم) تصبح قدرة التشوه الكلية للمادة قبل الفشل مستقرة إلى حد كبير .هذا يعني أنه بعد نقطة معينة يتم التحكم في سلوك انتشار الشق بمجرد بدئه بشكل أساسي بواسطة المطيلية المتأصلة ومتانة الكسر لخليط الإسفلت بدلاً من الزيادات الإضافية في عمق الشق الأولي .يشير هذا إلى أن قدرة المادة على التشوه وامتصاص الطاقة هي خاصية جوهرية تتأثر بشكل كبير بوجود شق ولكنها تتأثر بشكل أقل بعمقه.




**شكل 16.** العلاقة بين قيمة التدفق و عمق الشق للعينات التي لم تتعرض للتقادم.

يوضح الشكل رقم (17) متوسط التدفق للعينات المتقادمة تقلبات طفيفة مع تغير العمق للشقوق 1.805 مم عند 5 مم انخفاض طفيف إلى 1.75 مم عند 10 مم ثم انخفاض آخر إلى 1.6 مم عند 15 مم .على غرار العينات غير المتقادمة تظل قيم التدفق ضمن نطاق ضيق نسبياً مما يشير إلى أنه بمجرد وجود شق تكون قدرة الإزاحة الكلية قبل الفشل مستقرة نسبياً حتى بالنسبة للمواد المتقادمة.




**شكل 17.** العلاقة بين قيمة التدفق وعمق الشق للعينات التي تعرضت للتقادم.

بالنسبة لعينات الإسفلت غير المتقادمة والمتقادمة على حد سواء تؤدي زيادة عمق الشق عموماً إلى انخفاض كبير في مقاومة الشد للعينات الذي يمكن أن تتحمله المادة. تتوافق هذه الملاحظة مع مبادئ ميكانيكا الكسر الأساسية مما يشير إلى أن العيوب أو الشقوق الموجودة مسبقاً تقلل من قدرة تحمل الحمل لخلطات الإسفلت. على العكس من ذلك أظهر متوسط التدفق تساوياً ملحوظاً مع اختلاف أعماق الشقوق المختلفة (5 مم 10 مم و 15 مم) لكلا الحالتين مما يعني أنه بمجرد وجود شق حرج تكون قدرة التشوه المتأصلة للمادة قبل الفشل متسقة إلى حد كبير. تزيد عملية التقادم من مقاومة الشد مما يؤكد الزيادة المتوقعة في الصلابة بسبب التصلب التأكسدي للمادة الرابطة الإسفلتية.

## 4. الخاتمة والتوصيات

يؤدي التقادم إلى تصلب الإسفلت وزيادة قساوته وهشاشته، مما يجعل الخلطات الاسفلتية أكثر عرضة للتشقق والانهيار. تتضح هذه الظاهرة من خلال النتائج المستخلصة من العينات التي تعرضت للتقادم والتي تشير إلى زيادة الصلابة. تعتبر أرصفة الإسفلت حساسة للظروف المناخية، لذا يجب تصميم الخلطات الإسفلتية لتتناسب مع هذه الظروف وتاريخها في المنطقة المحددة. من الضروري تحقيق توازن دقيق بين الصلابة الكافية لمقاومة التشوهات الدائمة (مثل التخدد) والمرونة اللازمة لمقاومة التشقق، خاصة عند الأخذ في الاعتبار التأثيرات طويلة الأمد للتقادم.

مع مرور الوقت، يفقد الإسفلت مكوناته المتطايرة والمواد الملدنة، مما يؤدي إلى انخفاض في المرونة والقابلية للتشكيل. كان تأثير التقادم على متوسط التدفق، الذي يعكس قدرة المادة على التشوه، معقدًا في بعض الاختبارات مثل اختبار (SCB) حيث لوحظت زيادة طفيفة أو عدم تغير ملحوظ في بعض الحالات بدلاً من الانخفاض المتوقع في المطيلية. هذه النتائج تتطلب مزيدًا من البحث لتفسيرها بشكل كامل.

يزيد التقادم من حساسية الإسفلت للتغيرات في درجات الحرارة، حيث يصبح أكثر صلابة في الطقس البارد وأكثر لدونة في الطقس الحار. كما تؤدي الرطوبة إلى ضعف الربط بين الإسفلت والركام، مما يقلل من قوة الخلطة الإسفلتية وقدرتها على التحمل.

يُعتبر اختبار الانحناء شبه الدائري (SCB) وسيلة فعالة لتقييم الخصائص الكسرية ومقاومة التشقق في خلطات الإسفلت. إذ يؤدي وجود وعمق الشقوق أو العيوب السابقة في الرصف إلى تقليل قدرة تحمل الحمل بشكل كبير. فقد أدت زيادة عمق الشق في عينات اختبار (SCB) إلى انخفاض ملحوظ في مقاومة الشد التي يمكن أن تتحملها المادة، سواء كانت متقادمة أو غير متقادمة.

يجب أن تكون دراسة التقادم على الطرق من الأولويات عند تصميم الخلطات الإسفلتية واختيار المواد .وينبغي تصميم الخلطات بشكل يقلل من تأثر خصائصها بالتقادم والرطوبة.

ينصح باستخدام الإضافات التي تقلل من تأثير التقادم على الخلطات الإسفلتية حيث أن لها تأثيراً جيداً في الحفاظ على حالة الطرق. ويجب أخذ درجة حرارة المكان بعين الاعتبار عند تصميم الخلطات الإسفلتية لضمان أداء مثالي طوال عمر الرصف. ويوصى بإجراء المراقبة الدورية للخلطات الإسفلتية وإجراء الصيانة اللازمة للحفاظ على أدائها وإطالة عمرها الافتراضي.

عند إجراء اختبارات مثل الانحناء شبه الدائري (SCB) يُقترح زيادة عدد العينات المكررة لكل حالة اختبار لتعزيز الموثوقية الإحصائية للنتائج خاصة عند ملاحظة اتجاهات غير متوقعة أو للتحقق من سلوك المواد بشكل دقيق.

## 5.المراجـــــع


[1] Tarefder, R.A. and A.M. Zaman, Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009. 22(7): p. 714-725.

[2] Gorkem, C. and B. Sengoz, Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. Construction and Building Materials, 2009. 23(6): p. 2227-2236.

[3] Berthelot, C., B. Crockford, and R. Lytton, Comparison of alternative test methods for predicting asphalt concrete rut performance. Proceedings of the 44th Annual Canadian Technical Asphalt Association, Québec City, Quebec, 1999: p. 14-17.

[4] Kim, S., et al., Performance of polymer-modified asphalt mixture with reclaimed asphalt pavement. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009(2126): p. 109-114.

[5] Shaffie, E., et al., Evaluation Of Volumetric Properties And Resilient Modulus Performance Of Nanopolyacrylate Polymer Modified Binder (NPMB) Asphalt Mixes. Jurnal Teknologi, 2015.(4)73 .

[6] Jin, F.-L. and S.-J. Park, Impact-strength improvement of epoxy resins reinforced with a biodegradable polymer. Materials Science and Engineering: A, 2008. 478(1): p. 402-405.

[7] Jaskuła, P., M. Stienss, and C. Szydłowski, Effect of Polymer Fibres Reinforcement on Selected Properties of Asphalt Mixtures. Procedia Engineering, 2017. 172: p. 441-448.

[8] Tayfur, S., H. Ozen, and A. Aksoy, Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. Construction and Building Materials, 2007. 21(2): p. 328-337.

[9] smael, H.M.H.M.Q., Effect of Polymers on Permanent Deformation of Flexible Pavement. Journal of Engineering, 2014. 20.

[10] Canestrari, F., et al., Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage. Road Materials and Pavement Design, 2010. 11(sup1): p. 11-32.

[11] Khattak, M.J., G.Y. Baladi, and L.T. Drzal, Low temperature binder-aggregate adhesion and mechanistic characteristics of polymer modified asphalt mixtures. Journal of materials in civil engineering, 2007. 19(5): p. 411-422.

[12] Wu, Z., et al. (2005). Fracture Resistance Characterization of Superpave Mixtures Using the Semi-Circular Bending Test .

[13] Li, X. J., & Marasteanu, M. O. (2010). Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete. Experimental Mechanics, 50(6) .

[14] Saadeh, S., et al. (2012). Semi-Circular Bending Test Asphalt Mixtures Studies .

[15] [15] Romero, P., et al. (2019). Evaluation of Materials for Asphalt Mixture Performance, Semi-Circular Bend Laboratory Tests .

[16] Kavussi, A., & Naderi, B. (2020). Application of SCB Test and Surface Free Energy Method in Evaluating Crack Resistance of SBS Modified Asphalt Mixes. Civil Engineering Infrastructures Journal, 53(1)

[17] Yousefi, A., Nowruzi, A., Yousefi, Y., & Sobhi, S. (2022). Evaluation of the effect of loading rate of Semicircular Bending test on different fracture mechanical parameters of asphalt mixtures at intermediate temperature. Journal of Transportation Research, 19(1) .

[18] Yalcin, E., Yilmaz, M., Demir, F., Guzel, B., Ozdemir, A. M., Şengur, A., & Çambay, E. (2024). Evaluation of asphalt anti-cracking performance of SBS polymer with SCB method and deep learning. Heliyon, 10(20), e39613.