

تأثير مسحوق نفايات الزجاج على خصائص البيتومين والأداء الميكانيكي ومقاومة الرطوبة للخلطات الإسفلتية

*احلا حمزة نزال،¹مسعد امير اسماعيل،¹سهيله سعيد عبد الرزاق،¹احمد كامل عبد،¹مصطفى عبد الزهره

¹وزارة الاعمار والاسكان والبلديات العامة، دائرة بحوث البناء، بغداد، العراق

الخلاصة

تُعد نفايات الزجاج من المخلفات الصلبة التي تتردد كمياتها بشكل مستمر في مختلف دول العالم، سواء المتقدمة أو النامية، وتشكل عملية التخلص منها تحدياً بيئياً بسبب عدم قابليتها للتحلل الحيوي وبقائها لفترات طويلة في البيئة. لذلك أصبح البحث عن طرق فعالة لإعادة استخدام هذه المخلفات من الاتجاهات المهمة لتحقيق الاستدامة وتقليل الأثر البيئي الناتج عن تراكمها. ومن هذا المنطلق، فإن استخدام نفايات الزجاج في الخلطات الإسفلتية يمكن أن يمثل حلاً بيئياً واقتصادياً من خلال تقليل كمية المخلفات المطروحة وتحسين بعض خواص الخلطات الإسفلتية المستخدمة في رصف الطرق.

تكمّن الأهمية العلمية لهذه الدراسة في تقييم إمكانية استخدام مسحوق نفايات الزجاج كمادة محسنة في الخرسانة الإسفلتية ودراسة تأثيرها على الخواص الفيزيائية للإسفلت وأداء الخلطات الإسفلتية. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد النسبة المثلى من مسحوق نفايات الزجاج المضاف إلى الإسفلت، ومن ثم تقييم تأثيرها على أداء الخلطات الإسفلتية مقارنة بالخلطات التقليدية الخالية من نفايات الزجاج. لتحقيق هذا الهدف، تم طحن نفايات الزجاج وغربلتها باستخدام غربال بحجم 100 مايكرومتر، ثم إضافتها إلى الإسفلت بنسب 2%، 4%، 6%، 8%، و10% من وزن الإسفلت الصافي. بعد ذلك تم إجراء مجموعة من الاختبارات الفيزيائية التقليدية للإسفلت، شملت اختبار الاحتراق، اللزوجة، المطيلية، الليونة واختبار الوميض والاحتراق، بهدف تحديد المحتوى الأمثل لمسحوق نفايات الزجاج اعتماداً على أفضل النتائج المتحصل عليها.

بعد تحديد النسبة المثلى لنفايات الزجاج، تم تحديد المحتوى الأمثل للإسفلت باستخدام طريقة مارشال للخلطات الإسفلتية الخاصة بالطبقة السطحية. تضمنت مكونات الخلطات الإسفلتية المستخدمة في الدراسة الإسفلت الأسمنتي بدرجة اختراق 40-50 المنتج من مصفى ذي قار، والركام بتدرج المقاس الأقصى الاسمي مقداره 19 ملم، وغبار حجر الكلس كمادة مالئة، بالإضافة إلى مسحوق نفايات الزجاج. بلغ العدد الكلي للنماذج المستخدمة 21 نموذجاً لاختبار مارشال و12 نموذجاً لاختبار مقاومة الشد غير المباشر.

تم تقييم أداء الخلطات الإسفلتية من خلال اختبار مارشال لتحديد قيم الثبات، والزحف، والفراغات الهوائية، والفراغات في الركام، والفراغات المملوءة بالبيتومين. كما تم استخدام اختبار مقاومة الشد غير المباشر لحساب نسبة مقاومة الشد غير المباشر لتقييم حساسية الخلطات للرطوبة.

أظهرت النتائج أن الخلطة الإسفلتية المحتوية على النسبة المثلى من نفايات الزجاج حققت قيمة ثبات أعلى مقارنة بالخلطة التقليدية الخالية من نفايات الزجاج، كما سجلت انخفاضاً نسبياً في قيم الزحف. كذلك أظهرت النتائج ارتفاع نسبة مقاومة الشد غير المباشر للخلطة المحتوية على نفايات الزجاج بنسبة بلغت 3.5% مقارنة بالخلطة التقليدية.

الكلمات الرئيسية: اختبار مارشال، قوة الشد غير المباشرة ، مخلفات مسحوق الزجاج ، الخلطات الإسفلتية المستدامة.

Effect of Waste Glass Powder on Bitumen Properties, Mechanical Performance, and Moisture Resistance of Asphalt Mixtures

¹ Hala Hamza, ² Musaad Ameer, ³ Suhaila Saeed

Ministry of Construction, Housing, Municipalities and Public Works/ Building Research
directorate, Baghdad, Iraq

Abstract

Glass waste had been considered one of the solid waste materials whose quantities had continuously increased worldwide. The disposal of glass waste had represented an environmental challenge due to its non-biodegradable characteristics and its long-term persistence in the environment. Therefore, the investigation of effective methods for recycling and reusing such waste materials had become an important approach for achieving sustainability and reducing the environmental impacts associated with their accumulation. From this perspective, the incorporation of glass waste into asphalt mixtures had represented an environmental and economic solution by reducing the amount of disposed waste and improving some properties of asphalt mixtures used in pavement construction.

The scientific significance of this study had been to evaluate the potential of using waste glass powder as a modifying material in asphalt concrete and to investigate its effects on the physical properties of asphalt binder and the performance of asphalt mixtures.

The study had also aimed to clarify the effect of waste glass addition on asphalt mixture characteristics, including stability, resistance to deformation, volumetric properties, and moisture resistance, which had contributed to developing more efficient and sustainable asphalt mixtures.

The objective of this study had been to determine the optimum percentage of waste glass powder incorporated into asphalt binder and subsequently evaluate its effect on the performance of asphalt mixtures compared with conventional mixtures without waste glass. To achieve this objective, waste glass had been crushed and sieved using a 100 μm sieve, and then had been added to the asphalt binder at percentages of 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% by weight of the

pure asphalt binder. After that, a series of rheological tests had been conducted on the asphalt binder, including penetration, viscosity, ductility, and flash and fire point tests, in order to determine the optimum waste glass powder content based on the best obtained results.

After determining the optimum waste glass content, the optimum asphalt binder content had been determined using the Marshall mix design method for asphalt mixtures of the surface course. The asphalt mixtures used in this study had consisted of 40–50 penetration grade asphalt cement obtained from Dhi Qar refinery, aggregate with a nominal maximum aggregate size of 19 mm, limestone dust as mineral filler, in addition to waste glass powder. The total number of prepared specimens had been 21 specimens for the Marshall test and 12 specimens for the indirect tensile strength test.

The performance of the asphalt mixtures had been evaluated through the Marshall test to determine stability, flow, air voids, voids in mineral aggregate (VMA), and voids filled with bitumen (VFB). Furthermore, the indirect tensile strength test had been used to calculate the indirect tensile strength ratio (TSR) for evaluating the moisture susceptibility of the asphalt mixtures.

The results had indicated that the asphalt mixture containing the optimum percentage of waste glass had achieved a higher stability value compared with the conventional asphalt mixture without waste glass. In addition, the waste glass modified asphalt mixture had recorded a relatively lower flow value. The results had also revealed that the indirect tensile strength ratio of the asphalt mixture containing waste glass had increased by 3.5% compared with the conventional mixture.

Keywords: Marshall Test, Indirect Tensile Strength (ITS), Waste Glass Powder, Sustainable Asphalt Mixtures.

1- المقدمة

تلعب الطرق السريعة دورًا هامًا في التنمية الاجتماعية والاقتصادية للمجتمعات، وبشكل عام، تُبنى الطرق السريعة في العراق من التبليط الإسفلتي والحقيقة أن هذه الطرق لا تدوم طويلًا طوال المدة المُصممة لها نظرًا لعوامل عديدة تؤثر على أداء الطرق الإسفلتية، منها الضرر الناتج عن الرطوبة، والذي يُعد من أهم العوامل التي تُقلل من القدرة الهيكلية للطرق الإسفلتية، مما يُسبب تشوهات مختلفة فيه ويُقلل من عمره الافتراضي. علاوة على ذلك، يسعى العلماء والمهندسون إلى تحسين أداء الخلطات الإسفلتية. ولذلك، تُستخدم العديد من التقنيات لهذا الغرض، ومن أهم هذه التقنيات استخدام المخلفات في خليط الأسفلت الساخن (HMA).

وفي ظل التوجه العالمي نحو تقليل الاعتماد على المواد الخام غير المتجددة وتعزيز مفهوم إعادة التدوير في مواد الرصف، برزت مخلفات الزجاج كأحد النفايات الصلبة ذات الإمكانية العالية للاستخدام في الخلطات الإسفلتية. فقد أظهرت العديد من الدراسات السابقة إمكانية استخدام مسحوق الزجاج كبديل جزئي للركام الناعم أو كمادة محسنة للبيتومين في الخلطات الإسفلتية، وأسهم ذلك في تحسين بعض الخصائص مثل مقاومة التشوه وتقليل الكلفة البيئية [1]. كما يستعرض أهم النتائج التي توصلت إليها الدراسات السابقة حول نسب الإضافة المختلفة وحجم جزيئات الزجاج وتأثيرها على أداء الخلطات الإسفلتية، بهدف تحديد الفجوة البحثية وتوضيح أهمية الدراسة الحالية في تقييم استخدام مسحوق نفايات الزجاج كإضافة محسنة ومستدامة للمواد الإسفلتية.

Downer وزملاؤه (1997) [2] يعد من الرواد الأوائل الذين بحثوا إمكانية استخدام نفايات الزجاج المسحوق في طبقات الأساس الإسفلتي في أستراليا، إذ استنتجوا أن الاستبدال الجزئي للركام الدقيق بالزجاج المطحون لا يؤثر سلباً على أداء الخلطة عند النسب الدنيا.

Chan و Poon (2006) [3] أسفرت دراسة لهما في هونغ كونغ عن نتائج واعدة تُثبت تحسن مؤشرات مقاومة الانزلاق عند استخدام حبيبات الزجاج الخشنة كبديل للركام.

Arabani وزملاؤه (2012) [4] درسوا تأثير الزجاج المُعاد تدويره على الخصائص الريولوجية للبيتومين، ووجدوا أن الجسيمات الزجاجية الدقيقة تعمل بوصفها مواد حشو نشطة تُعزز صلابة المزيج الإسفلتي في درجات الحرارة المرتفعة.

Sathishkumar وزملاؤه (2017) [5] نشروا دراسة مقارنة شاملة في الهند تناولت ثلاثة أشكال من الزجاج المُعاد تدويره (الحبيبي والمسحوق والمقطع)، واستنتجوا إلى أن المسحوق الزجاجي بمتوسط حجم جسيم 75 ميكرون يُحقق أعلى قيم استقرارية مارشال عند نسبة استبدال 10% من وزن الحشو، مع انخفاض ملحوظ في نسبة الامتصاص.

Gavriletea (2017) [6] أجرى مراجعة شاملة للدراسات البيئية المتعلقة بنفايات الزجاج، وأكد أن المخاوف البيئية الرئيسية تنصبّ حول: (أ) تسرب العناصر الثقيلة من إضافات الطلاء الزجاجية، و(ب) التفاعل الكيميائي بين القلوية الزجاجية والبيتومين

Belouadah و Kaouche (2018) [7] قاموا بإجراء سلسلة اختبارات على خلطات أسفلتية تضمنت مسحوق زجاج النوافذ المُعاد طحنه بنسب من 0% إلى 20%، وأثبتت دراستهم أن نسبة 12% تُمثل النقطة المثلى التي تُحقق توازناً بين الاستقرار والمرونة ومقاومة الإجهاد.

الحمداني والعاني (2019) [8] ، تناولوا دراسة أجريت في بغداد عن تأثير استخدام الزجاج المحلي المُعاد تدويره في الطبقة السطحية الأسفلتية، وكشفوا عن تحسن بنسبة 15% في قيمة الاستقرار عند إضافة 8% من مسحوق الزجاج، مع الإشارة إلى ضرورة معالجة مشكلة الانزلاق الناجمة عن أسطح الزجاج الملساء.

Tan وزملاؤه (2019) [9] تم نشر دراسة مرجعية في مجلة *Journal of Hazardous Materials*، تبين أن الزجاج السليكا المُعاد تدويره (كزجاج النوافذ والزجاجات) يُظهر معدلات تسرب متدنية جداً للعناصر الثقيلة، في حين قد تختلف النتائج بالنسبة لأنواع الزجاج المُعالج كيميائياً (كزجاج الشاشات الإلكترونية).

الدباغ وزملاؤها (2020) [10] قاموا بإجراء بحثاً مقارناً بين ثلاثة أنواع من الإضافات الزجاجية (مسحوق، حبيبات خشنة، ألياف) واستنتجوا إلى أن المسحوق الناعم أكثر فعالية من الناحية الميكانيكية، في حين تُقدّم الألياف تحسناً أفضل في مقاومة التشقق.

أما على صعيد البصمة الكربونية، فقد قُدّرت دراسة **Aurangzeb وزملائه (2021) [11]** أن توظيف مخلفات الزجاج في خلطات الرصف الأسفلتي يُخفّض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بإنتاج الخلطة بنسبة تتراوح بين 8% و 14% تبعاً لنسبة الاستبدال.

في بحثنا تم اختيار نسب إضافة مسحوق مخلفات الزجاج (2%، 4%، 6%، 8%، 10% من وزن البيتومين) استناداً إلى الدراسات السابقة التي اعتمدت هذا المدى لتقييم تأثير مسحوق الزجاج على خصائص البيتومين والخلطات الأسفلتية. ويُعد هذا المدى مناسباً لتحديد النسبة المثلى التي تحقق أفضل أداء، إذ يسمح بدراسة التغير التدريجي في الخواص الهندسية والفيزيائية للبيتومين بعد التعديل. وقد استندت هذه الدراسة بصورة خاصة إلى دراسة **Abdullah et al (2022) [12]**، التي استخدمت النسب نفسها (0%، 2%، 4%، 6%، 8%، 10%) لتقييم أداء البيتومين المعدل بمسحوق الزجاج.

1-1 مشكلة البحث

تتمثل مشكلة البحث في الزيادة المستمرة في كميات نفايات الزجاج الناتجة عن الأنشطة البشرية، والتي تشكل تحدياً بيئياً بسبب صعوبة التخلص منها وعدم قابليتها للتحلل، مما يؤدي إلى تراكمها في المكبات وزيادة الأثر البيئي الناتج عنها. في المقابل، تواجه الخلطات الإسفلتية التقليدية العديد من المشكلات المتعلقة بانخفاض الأداء تحت تأثير الأحمال المرورية والعوامل البيئية، وخاصة تأثير الرطوبة الذي يؤدي إلى تدهور الخصائص الميكانيكية وتقليل العمر الخدمي للرصف الإسفلتي [13].

لذلك تتمحور مشكلة هذا البحث حول تقييم إمكانية استخدام مسحوق نفايات الزجاج كمادة معدلة محسنة للبيتومين والخلطات الإسفلتية، وتحديد تأثيره على الخصائص الفيزيائية للبيتومين والخصائص الميكانيكية للخلطات الإسفلتية، للوصول إلى نسبة الإضافة المثلى التي تحقق أفضل أداء هندسي للخلطات الإسفلتية.

2-1 الهدف من البحث

- 1- تحديد النسب المثلى لمسحوق نفايات الزجاج المضافة إلى البيتومين لتحسين الخواص الفيزيائية للبيتومين والخصائص الميكانيكية للخلطات الإسفلتية.
- 2- دراسة تأثير اضرار الرطوبة للخلطات الاسفلتية التي تحتوي على النسبة المثلى من مخلفات الزجاج.

2. المواد والمنهجية

المواد المستخدمة في هذا العمل متوفرة محليًا وتستخدم حاليًا في بناء الطرق في العراق. وهي تنقسم إلى:

1- المواد الخام تشمل: الإسفلت، والركام، والفيلر.

2- مخلفات مسحوق الزجاج.

1-2 المواد الخام

1- الاسفلت

المادة الرابطة المستخدمة في هذا البحث هي الإسمنت الإسفلتي ذو الاختراق (40-50)، والمُستخرج من مصفى ذي قار. يُوضح الجدول (1) الخصائص الفيزيائية للإسمنت الإسفلتي المستخدم في هذا البحث. جميع نتائج الاختبارات مطابقة لمواصفات الهيئة العامة للطرق والجسور (SCR B R/9)، (2003).

الجدول (1) الخصائص الفيزيائية للأسفلت (40-50)

Test	Unit	ASTM Designation No.	Test result	SCR B Specification
Penetration @ (25°C, 100 gm, 5sec)	1/10 mm	D-5	47	40-50
Softening Point.(Ring & Ball)	(°C)	D-36	54.7	-----
Rotational Viscosity	mPa.s	D-4402	300	-----
Ductility @ (25°C, 5cm/min)	cm	D-113	150	>100
Flash Point, (Cleveland open Cup)	(°C)	D-92	275	>232
After Thin-Film Oven Test ASTM D 1754				
Retained Penetration of original	%	D-5	64	>55
Ductility @ (25°C, 5cm/min)	cm	D-113	96	>25

2- الركام الخشن

تم استخدام الركام الخشن من معمل خلط الخرسانة التابع لبلدية بغداد (معمل خلط العبيدي). مصدر الركام هو مقلع النباعي. ووفقاً لمواصفات (SCR B R/9، 2003)، تتراوح تدرجات الركام الخشن بين 4/3 انج (19مم) وغربال رقم 4 (4.75 مم) للطبقة السطحية المثبتة بالإسفلت، كما هو موضح في الشكل (1). وتوضح الخواص الفيزيائية للركام الخشن في الجدول (2).

الجدول (2) الخصائص الفيزيائية للركام الخشن

Property	ASTM Designation No.	Coarse Aggregate	SCR B Specification
Bulk Specific Gravity	C-127	2.618	-----
Apparent Specific Gravity	C-127	2.644	-----
Percent Water Absorption	C-127	0.435	-----
(Los Angeles Abrasion) %	C-131	19	30 Max



الشكل (1) الركام الخشن

3- الركام الناعم

يتكون الركام الناعم من الحصى الناعم المطحون والرمل الطبيعي المستورد من مقالع كربلاء. وهو عبارة عن حبيبات صلبة، خالية من أي كميات ضارة من الطين ومن أي مائه عضويه أو أي مواد ضارة أخرى. يتراوح تدرج الركام الناعم بين حجم المنخل رقم 4 (4.75 مم) وحجم المنخل رقم 200 (0.075 مم). يوضح الجدول (3) الخصائص الفيزيائية للركام الناعم.

الجدول (3) الخصائص الفيزيائية للركام الناعم.

Property	ASTM Designation No.	Fine Aggregate	SCRB Specification
Bulk Specific Gravity	C-128	2.576	-----
Apparent Specific Gravity	C-128	2.589	-----
Percent Water Absorption	C-128	0.562	-----

4- الفلر

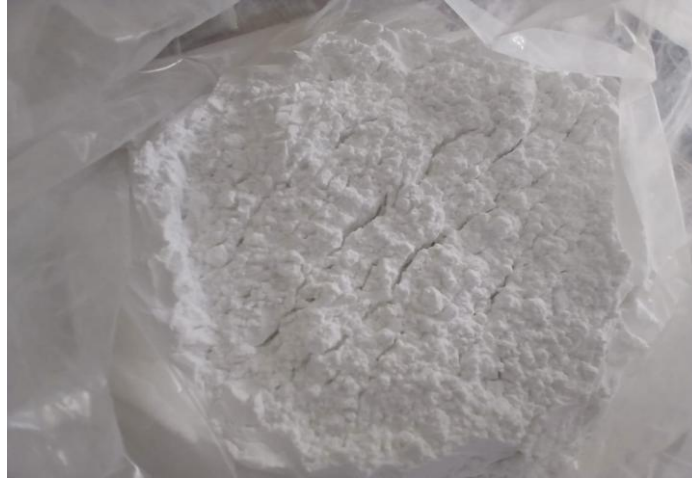
الفلر عبارة عن مادة تمر عبر منخل رقم 200 (0.075 مم). تتميز هذه المادة بجفافها التام وخلوها من أي تكتلات أو تجمعات للجزيئات الدقيقة. وتم استخدام غبار الحجر الجيري كماده مألئة في تحضير الخلطة الإسفلتية نظراً لتوفره وانخفاض تكلفته نسبياً. وقد جُلب من مصنع الجير في محافظة كربلاء. يوضح الجدول (4) الخصائص الفيزيائية لغبار حجر الكلس Limestone .

الجدول (4) الخصائص الفيزيائية لغبار حجر الكلس

Property	Limestone
% Passing No.100	100
% Passing No.200	98
Bulk Specific Gravity	2.78

2-2 مخلفات مسحوق الزجاج

جُمعت نفايات الزجاج الصلبة محلّياً من نفايات بلدية مدينة بغداد. وتتمثل مواردها في التخلص من زجاج النوافذ والأبواب والزجاجات غير الصالحة للاستخدام. وقد أُجريت عدة عمليات لإعادة استخدام هذه النفايات كماده مضافه للأسفلت. وبعد جمع نفايات الزجاج، أُجريت عملية تكسير لتحويل قطع الزجاج الكبيرة إلى جزيئات صغيرة وطحنها بجهاز الطاحونه الكهربائي في مختبر التطبيقات في دائره بحوث البناء. وأخيراً، أُجريت عملية غربلة للزجاج المطحون وتم اخذ الجزء المار من غربال 100 مايكرومتر. وتم اضافتها بنسب مختلفة 2%، 4%، 6%، 8%، 10% لماده الاسفلت وحدها. يوضح الجدول (5) الخصائص الكيميائية لمخلفات الزجاج والتي تم فحصها في مختبر الكيمياء بدائره بحوث البناء



شكل (2) مخلفات الزجاج التالف

الجدول (5) الخصائص الكيميائية لمخلفات الزجاج

النسبة المئوية	الناتج
SiO ₂	68.58%
Al ₂ O ₃	3%
Fe ₂ O ₃	0.65%
SO ₃	1.9%
CaO	9.02%
MgO	5.89%

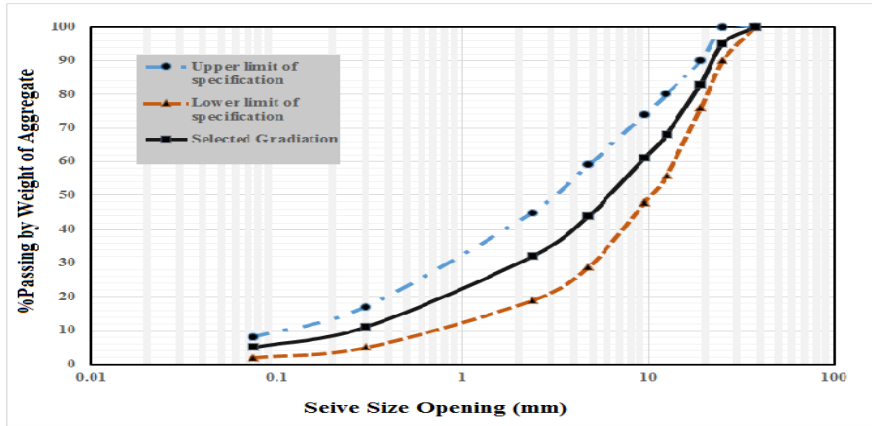
3-تدرجات الركام

تم غربلة الركام الخشن والناعم وتم فصله إلى أحجام مختلفة. في هذا البحث، استُخدم نوع واحد من التدرجات، وهو الحد الأقصى الاسمي (2/1 انج 12.5 مم). يُلبى التدرج للركام نطاق حدود التدرجات المحددة للمواصفة العراقية (SCR B R/9، 2003) لطبقة السطحية المُتَبَتَّة بالإسفلت. يُوضَّح تدرج الركام في الجدول (6) ويُرسَم في الشكل (3).

الجدول (6) تدرجات الركام للطبقة السطحية

Sieve Opening (mm)	Sieve Size	Specification passing Range (%)*	Mid-point Gradation (%)
19	3/4"	100	100
12.5	1/2"	90-100	95
9.5	3/8"	76-90	83
4.75	No.4	44-74	59
2.36	No.8	28-58	43
0.3	No.50	5-21	13
0.075	No.200	4-10	7

*(SCRB R/9, 2003)

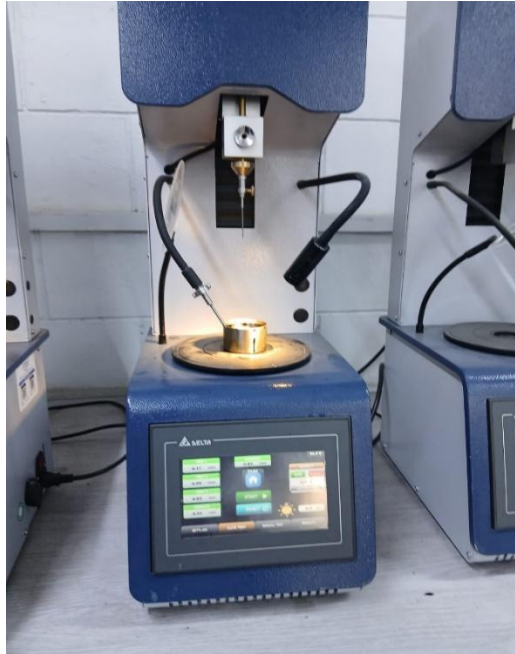


شكل (3) تدرجات حدود المواصفة للطبقة السطحية

4- الفحوصات الفيزيائية للأسفلت

1- فحص الاختراق Penetration test

تم اجراء الفحص وفق المواصفة القياسية ASTM D5/D5M ، مع ضرورة التحكم الدقيق بدرجة الحرارة وظروف الاختبار لضمان دقة النتائج وإمكانية الاعتماد عليها في التحليل والمقارنة العلمية حيث يتم الفحص عادة عند درجة حرارة 25°م باستخدام وزن كلي مقداره 100 غرام وزمن تحميل يبلغ خمس ثوانٍ، وتُقاس قيمة الاختراق بوحدّة أعشار المليمتر، والتي تُعرف اصطلاحاً بوحدّة الاختراق (dmm) وشكل (4) يوضح جهاز الاختراق الحديث في قسم الطرق في دائره بحوث البناء.



شكل (4) جهاز الاختراق

2- فحص الليونة Softening point

يتم تحديد درجة الليونة للأسفلت باستخدام فحص نقطة التليّن (Softening Point) بطريقة الحلقة والكرة، وذلك وفق المواصفة القياسية ASTM D36. يهدف هذا الفحص إلى تحديد درجة الحرارة التي يفقد عندها البيتومين قوامه شبه الصلب ويبدأ بالتحول إلى حالة أكثر ليونة تحت تأثير الحمل الحراري، مما يعكس سلوكه عند التعرض لدرجات الحرارة المرتفعة. شكل (5) يوضح جهاز الليونة الحديث في قسم الطرق في دائره بحوث البناء



شكل (5) جهاز اللبونة

3- فحص اللزوجة Viscosity test

يتم تحديد اللزوجة الدورانية للبيتومين باستخدام جهاز اللزوجة الدورانية (Rotational Viscometer) من شركة Anton paar وفقاً لمتطلبات المواصفة القياسية ASTM D4402 ، وذلك لغرض تقييم قابلية الجريان وسلوك التدفق للبيتومين عند درجات الحرارة العالية التي تمثل ظروف الخلط والدمك في الخلطات الأسفلتية.

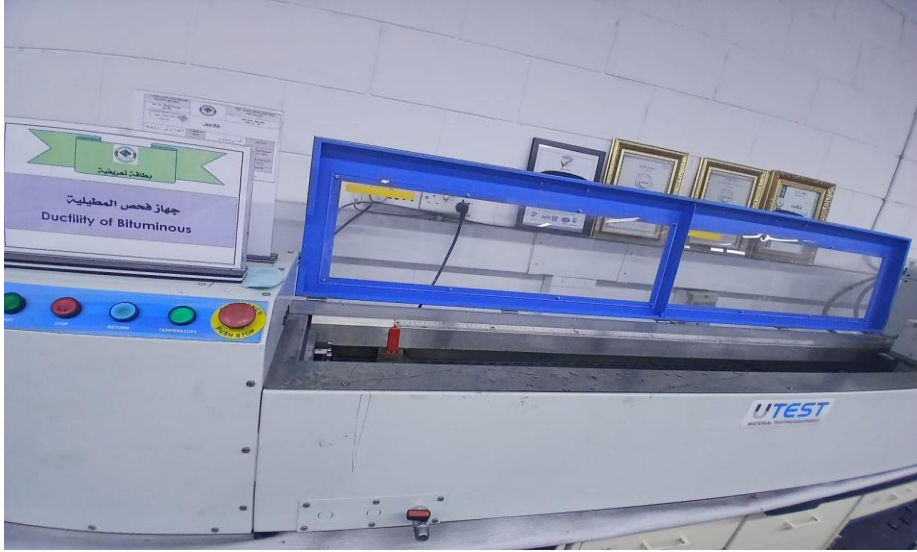
يُعد فحص اللزوجة الدورانية من الفحوصات الأساسية لتقييم أداء البيتومين، إذ تعكس قيم اللزوجة مدى ملائمتها لعمليات الخلط والتشغيل، حيث إن ارتفاع اللزوجة يشير إلى مقاومة أعلى للتدفق، في حين أن انخفاضها يدل على سهولة التشغيل. كما يُستخدم هذا الفحص لتحديد درجات الحرارة المثلى للخلط والدمك، بالإضافة إلى تقييم تأثير الإضافات المختلفة على سلوك البيتومين عند درجات الحرارة العالية شكل (6) يوضح جهاز اللزوجة الحديث في قسم الطرق في دائره بحوث البناء



شكل (6) جهاز اللزوجة

4- فحص المطيلية Ductility test

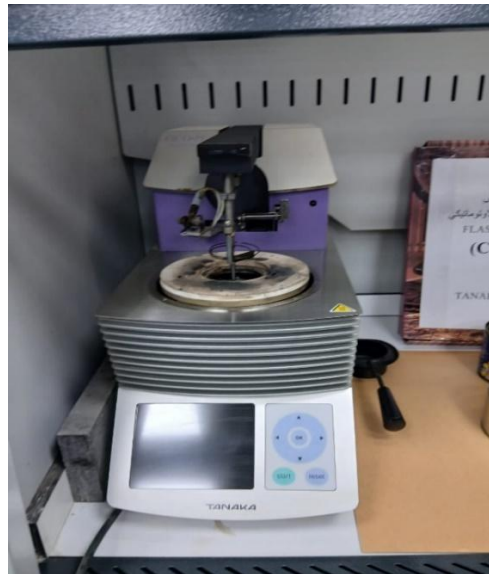
يُعد فحص المطيلية من الفحوصات الأساسية المستخدمة لتقييم السلوك الميكانيكي للبيتومين، إذ يعبر عن قدرة المادة على التمدد تحت تأثير الشد قبل حدوث الانقطاع. وتُعد هذه الخاصية ذات أهمية كبيرة في الخلطات الأسفلتية، لما لها من دور في مقاومة التشقق الناتج عن الأحمال المرورية والتغيرات الحرارية، خصوصًا في درجات الحرارة المتوسطة والمنخفضة. تم إجراء فحص المطيلية وفق المواصفة القياسية ASTM D113، شكل (7) يوضح جهاز المطيلية الحديث في قسم الطرق في دائرة بحوث البناء



شكل (7) جهاز المطيلية

5- فحص نقطة التوهج والاحتراق fire&flash point

يُعد فحص نقطة التوهج ونقطة الاحتراق من الفحوصات الأساسية لتقييم السلامة الحرارية للأسفلت أثناء عمليات التسخين والخلط والنقل. تم إجراء فحص نقطة التوهج ونقطة الاحتراق للأسفلت وفقاً للمواصفة القياسية ASTM D92 باستخدام جهاز كأس كليفلاند المفتوح (Cleveland Open Cup) شكل (8) يوضح جهاز التوهج والاحتراق



شكل (8) جهاز التوهج والاحتراق

5- خلط مخلفات الزجاج مع الاسفلت

تمت عملية خلط مخلفات الزجاج مع البيتومين وفق منهجية مختبرية مضبوطة لضمان تجانس الإضافة وتحقيق توزيع منتظم لجزيئات الزجاج داخل الوسط الرابط وتمت عملية الخلط كالتالي:-

1- تجهيز مخلفات الزجاج:

- * تم جمع مخلفات الزجاج وتنظيفها لإزالة الشوائب والمواد العالقة.
- * تم تجفيف الزجاج للتخلص من الرطوبة.
- * تم طحن الزجاج في الطاحونة الكهربائية الخاصة بمختبر التطبيقات في دائرة بحوث البناء للحصول على مسحوق ناعم بالحجم المطلوب.
- * تم إجراء عملية النخل للحصول على الحجم الحبيبي لمسحوق نفايات الزجاج بحيث يكون ناعماً ($100 \mu m$) لضمان توزيعه بصورة أكثر تجانساً داخل المادة الرابطة الإسفلتية، وزيادة مساحة سطح التلامس بين جسيمات الزجاج والبيتومين، مما يساعد على تحسين عملية التفاعل الفيزيائي بينهما، ويقلل من احتمال ترسب أو تكثف الجسيمات أثناء الخلط. كما أن استخدام حجم حبيبي دقيق يساعد على بقاء مسحوق الزجاج كمحسن للمادة الرابطة بدلاً من تصرفه كركام خشن داخل الخلطة.
- 2- تسخين البيتومين:
 - * تم تسخين البيتومين إلى درجة الحرارة المحددة 160 درجة مئوية حسب المواصفات المعتمدة ASTM D 6926 .
- 3- إضافة مخلفات الزجاج إلى البيتومين:
 - * تم وزن كمية مسحوق نفايات الزجاج حسب النسب المحددة في برنامج البحث.
 - * أضيف مسحوق الزجاج تدريجياً إلى البيتومين الساخن لتجنب حدوث تجمعات للجزيئات.
- 4- عملية الخلط:
 - * تم إجراء عملية الخلط باستخدام خلاط كهربائي ميكانيكي مختبري، وبسرعة مناسبة لضمان تجانس مسحوق مخلفات الزجاج مع البيتومين، واستمر الخلط حتى الحصول على خليط متجانس بصورة جيدة.



شكل (9) جهاز خلط مخلفات الزجاج مع الاسفلت

6- فحوصات الخلطة الإسفلتية

1- تحضير الخلطة

تم غربلة الركام وفصله إلى أحجام مختلفة ثم دمجه لتحقيق التدرج المحدد لطبقة السطحية المستقرة بالإسفلت (SCR B/9، 2003). تم تسخين الصفيحة الأساسية والقالب إلى 160 درجة مئوية ثم نقوم بتزييت القالب من الداخل لسهولة إزالة العينة من القالب. وبعد ذلك تم تسخين الركام إلى درجة حرارة 160 درجة مئوية، بينما تم تسخين الأسفلت إلى درجة حرارة 140 درجة مئوية لإنتاج اللزوجة الحركية (170 ± 20) سنتيستوك ثم تمت إضافة الأسفلت إلى الركام المسخن مسبقاً للوصول إلى الكمية المطلوبة من محتوى الأسفلت. تم خلط الأسفلت والركام في وعاء الخلط يدوياً على الصفيحة الساخنة لمدة (3-4) دقائق حتى يغطي الأسفلت سطح الركام بشكل كافٍ.

2- فحوصات مارشال

تغطي هذه الطريقة قياس مقاومة الجريان للعينات الأسطوانية من خلطات الرصف الإسفلتية المحملة على السطح الجانبي بواسطة جهاز مارشال وفقاً لمواصفة ASTM (D 6927). تتضمن هذه الطريقة تحضير عينات أسطوانية قطرها 4 إنش (101.6 مم) وارتفاعها 0.05 ± 2.5 إنش (1.27 ± 63.5 مم). يتكون جهاز الاختبار من (مطرقة للضغط، قالب و spatula)، ويتم تسخين درجة حرارتها إلى 120 درجة مئوية. يتم صب الخلطات الإسفلتية في القالب ويتم طرقها ب spatula 15 ضربة للجزء الجانبي و 10 ضربات للجزء الداخلي. وبعد ذلك يتم وضع ورقة ترشيح في أعلى وأسفل الخلطات. تتراوح درجة حرارة الخليط قبل الضغط مباشرة بين (142-146 درجة مئوية). بعد ذلك، يتم طرقه للقالب 75 ضربة على أعلى وأسفل العينة بمطرقة مارشال وزنها 4.535 كجم، مع سقوط حر في ارتفاع 18

انج(457.2 مم). ثم بعد ذلك تترك العينة في القالب لتبرد في درجة حرارة الغرفة لمدة 24 ساعة، وبعد ذلك يتم إزالتها من القالب بواسطة جك هيدروليكي. أُجريت اختبارات مارشال للاستقرار والزحف على كل عينة. وبعد ذلك يتم وضع العينة الأسطوانية في حمام مائي عند درجة حرارة 60 درجة مئوية لمدة 30 إلى 40 دقيقة، وبعدها مباشرة يتم وضعها على جهاز مارشال على السطح الجانبي بمعدل ثابت 2 انج/دقيقة (50.8 مم/دقيقة) حتى الوصول إلى أقصى حمل (فشل). كما هو موضح في الشكل (10). يتم تسجيل أقصى مقاومة للحمل وقيمة الزحف المقابلة له. وأُعدت ثلاث عينات لكل نسبة أسفلت، وتم أخذ المعدل للثلاث عينات.

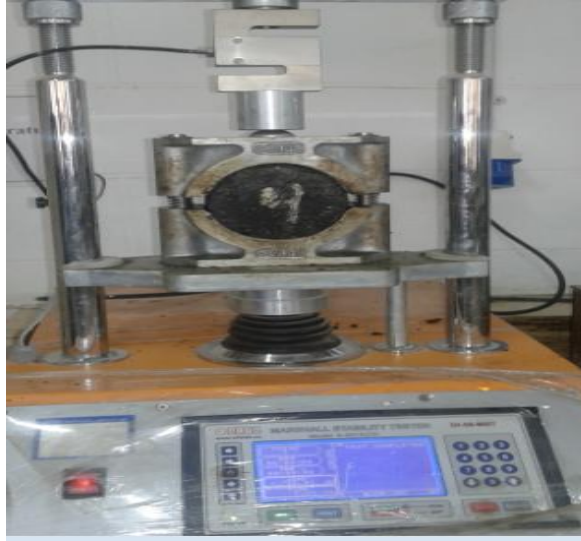
تم حساب الوزن النوعي الإجمالي Bulk sp.gr (ASTM D-2726)، والوزن النوعي النظري (الأقصى) Max. Theo. sp.gr (ASTM D-2041)، ونسبة الفراغات الهوائية (ASTM D-3203) لكل عينة باستخدام الخصائص الحجمية الأخرى لخليط الأسفلت ونسبة الفراغات المملوءة بالإسفلت (VFA%)، ونسبة الفراغات في الركام المعدني (VMA%). تم حساب نسبة الفراغات الهوائية (AV) Air Voids % من الصيغة الموضحة أدناه:

$$\% \text{ Air Voids} = [1 - \text{Bulk sp.gr.} / \text{Max. Theo. sp.gr.}] * 100 \quad \dots\dots 1$$

تم اختيار محتوى الأسفلت الأمثل كمتوسط محتوى لأقصى كثافة نوعية، وأقصى ثبات stability، ونسبة فراغات هوائية 4 % في الخليط الكلي، مع مراعاة حدود (SCR B R/9، 2003). وُجد أن محتوى الأسفلت الأمثل هو 5.1% لطبقة السطحية.



شكل (10) نماذج مارشال



شكل (11) جهاز مارشال

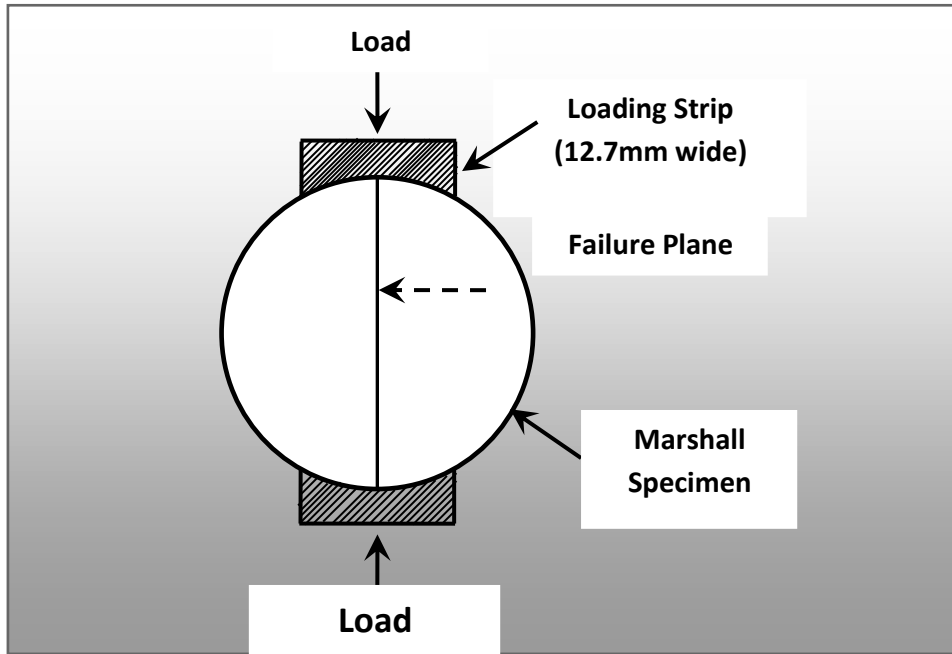


شكل (12) مطرقة مارشال

3- فحص مقاومة الشد غير المباشر
تُحدد قوة الشد غير المباشر وفقاً للمواصفة الموضحة في (ASTM D-6931) أعدت العينات وفقاً لـ (ASTM D-6927)، وكانت أبعادها 4 انج (101.6 مم) قطراً و 0.05 ± 2.5 انج (1.27 $\pm$ 63.5 مم) ارتفاعاً. ثم تُركت العينات لتبرد في درجة حرارة الغرفة لمدة 24 ساعة، ثم وُضعت في حمام مائي لمدة 30 دقيقة على الأقل عند درجة حرارة 25 درجة مئوية. وُضعت شرائح التحميل بعرض 12.7 مم، وُضع الحمل بمعدل إجهاد 2 انج (50.8 مم)/دقيقة كما هو موضح في الشكل (13).

اختُبرت ثلاث عينات لكل مزيج، وتم اخذ معدل متوسط النتائج. في الشكل (14) توضح عينات قوة الشد غير المباشر واختبار التشغيل. يتم حساب قوة الشد غير المباشرة (ITS) على النحو التالي:

$$ITS = 2000 P_{ult} / \pi t D \quad \dots\dots\dots 2$$



شكل (13) تسليط الحمل ومستوى الفشل لعينة في اختبار الشد غير المباشر.



شكل (14) جهاز الشد غير المباشر

4- نسبة مقاومة الشد غير المباشر

تم إعداد مجموعة من ست عينات لهذا الفحص. تم إعداد النماذج لكل مزيج وفقاً لإجراءات وتعليمات فحص مارشال وتم رص العينات لتحقيق نسبة فراغات هوائية $7 \pm 1\%$ باستخدام عدد مختلف من الضربات لكل وجه. تم اختبار العينات الثلاث الأولى لقوة الشد غير المباشرة بعد تخزينها في حمام مائي عند 25 درجة مئوية لمدة لا تقل عن 30 دقيقة، ثم تم حساب متوسط قيمة ITS لهذه العينات (ITS للعينات الجافة). تم وضع العينات الثلاث الأخرى في وعاء مفرغ من الهواء vacuum container مملوء بماء معقم عند 25 درجة مئوية ثم يتم تطبيق ضغط جزئي مفرغ من الهواء بمقدار 30 مم زئبق لمدة (5-10) دقائق لتحقيق مستوى التشبع بنسبة 70٪، ثم يتم تغطيتها بكيس بلاستيكي وحفظها في الفريز عند درجة حرارة -18 ± 3 درجة مئوية لمدة لا تقل عن 16 ساعة، ثم يتم إزالة الكيس البلاستيكي من كل عينة والسماح لها بالذوبان لمدة ساعتين عند درجة حرارة المختبر. بعدها يتم نقل العينات إلى حمام مائي عند درجة حرارة 60 ± 1 درجة مئوية لمدة 24 ساعة. ثم يتم نقلها إلى حمام مائي عند درجة حرارة 25 درجة مئوية لمدة ساعة، وفُحصت لقوة الشد غير المباشرة (ITS للعينات المُعالجة بالرطوبة). يوضح الشكل (15) عملية تجهيز العينات لاختبار TSR. تُحسب نسبة قوة الشد كما يلي وفقاً للمواصفة ASTM D4867، والتي يجب أن تكون 0.8 (أو 80%) كحد أدنى، وفقاً للمواصفة (ASTM D4867).

$$TSR = (S_{tm} / S_{td}) \times 100$$

$$..... 3$$

حيث ان

TSR = نسبة قوة الشد غير المباشرة (%).

Std = متوسط قوة الشد غير المباشرة (ITS) للعينات الجافة (كيلو باسكال).

Stm = متوسط قوة الشد غير المباشرة (ITS) للعينات المعالجة بالرطوبة (كيلو باسكال).



ب. عملية التفريغ للعينات



ا. عملية الانجماد للعينات



ج. وضع العينات بالحمام المائي

شكل (15) عملية تجهيز العينات لاختبار نسبة مقاومة الشد غير المباشر

7. النتائج والمناقشة

7-1 نتائج الفحوصات الفيزيائية للأسفلت

بالمقارنة مع قيم الخلطة المرجعية، أدت إضافة مخلفات الزجاج إلى الأسفلت إلى تغييرات في خصائصه الفيزيائية. وكما هو موضح في الشكل (16)، أظهرت نتائج فحص الاختراق انخفاضاً تدريجياً في قيم الاختراق مع زيادة نسبة مخلفات الزجاج بمقدار 4,2%, 14.8%, 21.3%, 25.5%, 36.1% عند إضافة مخلفات الزجاج بنسب 2%, 4%, 6%, 8%, 10% على التوالي. تشير هذه النتائج إلى أن الأسفلت المضاف له مخلفات الزجاج يتميز بصلابة أكبر مقارنةً بالأسفلت الخام، حيث انخفضت القيمة من (47) في البيتومين المرجعي إلى (30) عند نسبة 10%. ويُعزى هذا الانخفاض إلى الطبيعة الصلبة لجزيئات الزجاج، والتي تحد من حركة جزيئات البيتومين وتزيد من صلابته. لوحظ أن نسب الإضافة المنخفضة والمتوسطة (2-4%) أدت إلى انخفاض معتدل في الاختراق، مما يشير إلى تحسن مقاومة التشوه دون الوصول إلى سلوك هش. في المقابل، أدت النسب العالية (8-10%) إلى انخفاض حاد في الاختراق، وهو ما قد يؤثر سلباً على أداء البيتومين عند درجات الحرارة الواطئة.

أما فحص نقطة الليونة للأسفلت أظهرت نتائج فحص نقطة الليونة زيادة طفيفة ولكن منتظمة مع زيادة نسبة الزجاج، حيث ارتفعت من (53.2°م) للبيتومين المرجعي إلى (55.6°م) عند نسبة 10%. ويشير هذا السلوك إلى تحسن الاستقرار الحراري للبيتومين المعدل وزيادة مقاومته للجريان عند درجات الحرارة العالية.

وقد كان تأثير نسب الإضافة (4-6%) أكثر توازناً، حيث تحسنت نقطة الليونة دون التأثير الكبير على الخواص المرنة للبيتومين، مقارنةً بالنسب الأعلى التي قد تؤدي إلى زيادة الصلابة بشكل مفرط والشكل (17) يوضح تأثير مخلفات الزجاج على نقطة الليونة للأسفلت.

تشير نتائج فحص المطيلية انخفاضاً واضحاً في قيم المطيلية مع زيادة نسبة مخلفات الزجاج. فقد انخفضت المطيلية من (150 سم) للبيتومين المرجعي إلى حوالي (70 سم) عند نسبة 10%. ويُعزى هذا الانخفاض إلى أن الزجاج مادة غير مرنة، مما يقلل من قدرة البيتومين على الاستطالة. سجلت نسبة 4% مطيلية مرتفعة نسبياً (140 سم)، مما يدل على احتفاظ البيتومين بمرونته، في حين أن النسب الأعلى (8-10%) أظهرت انخفاضاً حاداً في المطيلية قد يؤدي إلى زيادة احتمالية حدوث التشققات، خصوصاً في الظروف المناخية الباردة والشكل (18) يوضح تأثير مخلفات الزجاج على المطيلية (الاستطالة) للأسفلت.

أظهرت نتائج فحص نقطة التوهج والاحتراق تحسناً واضحاً عند إضافة مخلفات الزجاج، حيث ارتفعت نقطة التوهج من (275 C°) للبيتومين المرجعي إلى (330 C°) عند نسبة 4%، وهي أعلى قيمة مسجلة. ويعود ذلك إلى كون الزجاج مادة غير قابلة للاشتعال، مما يقلل من تطاير المكونات الخفيفة في البيتومين. ويُعد هذا التحسن ذا أهمية عملية، إذ يساهم في زيادة عوامل السلامة أثناء عمليات الخلط والنقل، مع بقاء جميع القيم ضمن الحدود القياسية المعتمدة. والشكل (19) يوضح تأثير مخلفات الزجاج على نقطة التوهج والاحتراق للأسفلت.

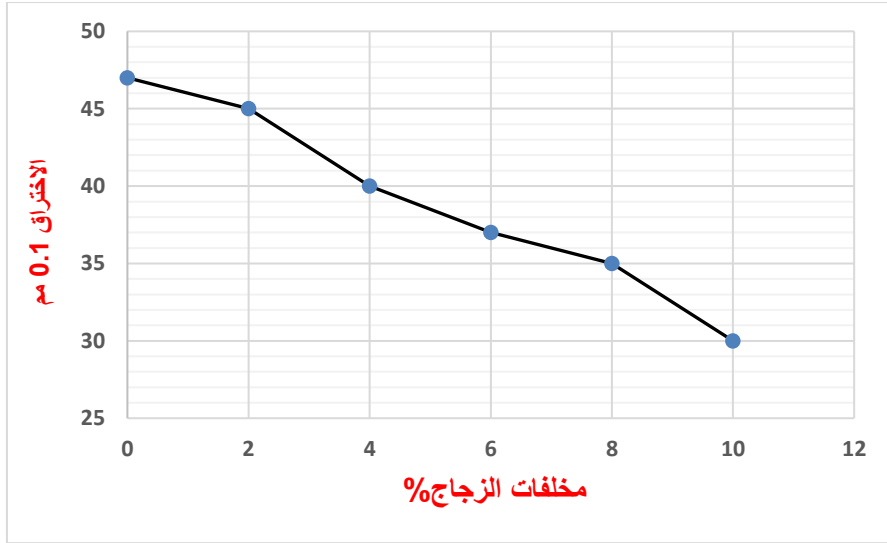
أظهرت نتائج فحص اللزوجة الدورانية زيادة ملحوظة في اللزوجة مع زيادة نسبة الزجاج، حيث ارتفعت من (300 mPa.s) للبيتومين المرجعي إلى أكثر من (750 mPa.s) عند نسب 8% و 10%. ويُعزى ذلك إلى زيادة مقاومة القص نتيجة وجود الجسيمات الصلبة داخل البيتومين. كانت اللزوجة

عند نسبة 4% معتدلة (375 mPa.s)، مما يشير إلى تحسن في مقاومة التشوه دون التأثير الكبير على قابلية التشغيل. بينما أدت النسب الأعلى إلى لزوجة مرتفعة قد تتطلب رفع درجات حرارة الخلط والفرش، وهو ما يُعد غير مرغوب عملياً. والشكل (20) يوضح تأثير مخلفات الزجاج على اللزوجة الدورانية للأسفلت.

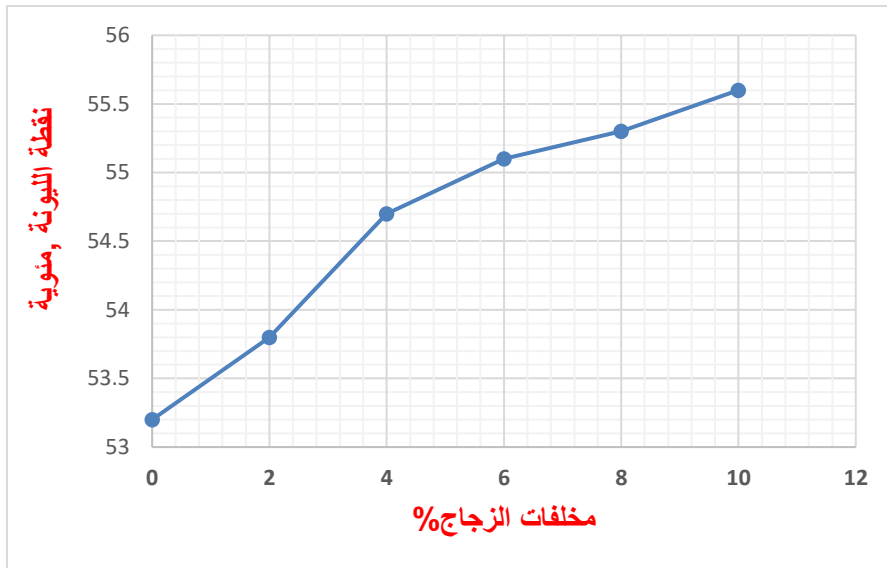
من خلال التحليل المتكامل لجميع الفحوصات، يتضح أن زيادة نسبة مخلفات الزجاج تؤدي إلى تحسين صلابة البيتومين واستقراره الحراري، إلا أن هذا التحسن يكون مصحوباً بانخفاض في المطيلية وارتفاع في اللزوجة عند النسب العالية. أظهرت نسبة 4% من مخلفات الزجاج أفضل توازن بين تحسين الصلابة ومقاومة التشوه والحفاظ على المطيلية ضمن حدود آمنة وتحقيق أعلى نقطة توهج وضمان قابلية تشغيل جيدة وعليه، يمكن اعتماد نسبة 4% كنسبة مثلى مقارنةً بالنسب الأعلى التي أظهرت سلوكاً أكثر هشاشة وصعوبات تشغيلية ويوضح الجدول (7) الخواص الفيزيائية للأسفلت الخام والأسفلت المضاف له مخلفات الزجاج.

النتائج						الوحدة	الفحوصات الريولوجية للأسفلت
10%	8%	6%	4%	2%	0%		
30	35	37	40	45	47	0.1 مم	الاختراق
55.6	55.3	55.1	54.7	53.8	53.2	درجة مئوية	نقطة الليونة
70	80	120	140	145	150	سم	المطيلية
750	750	675	375	350	300	mPa.s	اللزوجة
308	310	300	330	320	275	درجة مئوية	نقطة التوهج والاحتراق

الجدول (7) الخواص الفيزيائية للأسفلت الخام والأسفلت المضاف له مخلفات الزجاج



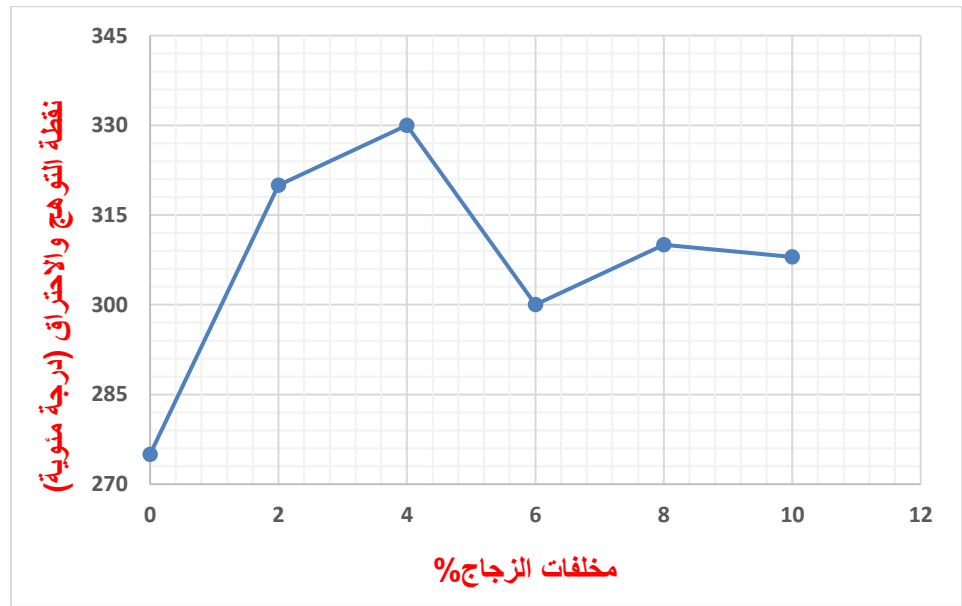
شكل (16) تأثير نسب مخلفات الزجاج على الاختراق



شكل (17) تأثير نسب مخلفات الزجاج على نقطة الليونة



شكل (18) تأثير نسب مخلفات الزجاج على المطيلية (الاستطالة)



شكل (19) تأثير نسب مخلفات الزجاج على نقطة التوهج والاحتراق



شكل (20) تأثير نسب مخلفات الزجاج على اللزوجة الدورانية

7-2 نتائج فحوصات مارشال

لتحديد محتوى الأسفلت الأمثل للخلطات الاسفلتية الساخنة HMA، استُخدمت خمس نسب مئوية من الإسفلت (4-4.5-5-5.5-6) من وزن الخليط الكلي، وأُخذت ثلاث عينات لكل نسبة مئوية من الأسفلت. خضعت العينات لسلسلة من الاختبارات، مثل ثبات مارشال، والزحف، والكثافة ونسبة الفراغات، لاختيار محتوى الأسفلت الأمثل، وذلك باستخدام الركام (تدرج الحجم الأقصى 12.5 مم)، 7% من غبار الحجر الجيري (من وزن الركام الكلي) كمادة مالئة فلر. استُخدمت ثلاثة من معايير مارشال؛ الثبات، والكثافة الظاهرية، و 4% فراغات هوائية، لاختيار محتوى الأسفلت الأمثل، بينما أُخذت المعايير الأخرى؛ الزحف و VMA و VFA في الاعتبار لتأكيد النسبة المئوية المختارة.

توصي المواصفة العراقية (SCR B R/9، 2003) لمعايير تصميم الخلطة لأحمال المرور الكثيفة بالقيم التالية للطبقة السطحية، كما توضح الجدول (8) نتائج الخلطة المرجعية. ويوضح الشكل (21) نتائج اختبار مارشال، حيث تم التوصل إلى نسبة الاسفلت المثلى هي (5.1%) وزناً للخلطة المرجعية.

الجدول (8) نتائج الخلطة المرجعية للطبقة السطحية

الخواص	النتائج للطبقة السطحية	حدود مواصفات [SCR B 2003]
ثبات مارشال KN	9,7	8 كحد ادنى
زحف مارشال مم	3,28	4-2
نسبة الفراغات الهوائية %	3,9	5-3
نسبة الفراغات في الركام %	15	14 حد ادنى
نسبة الفراغات المملوءه بالاسفلت %	74	85-70

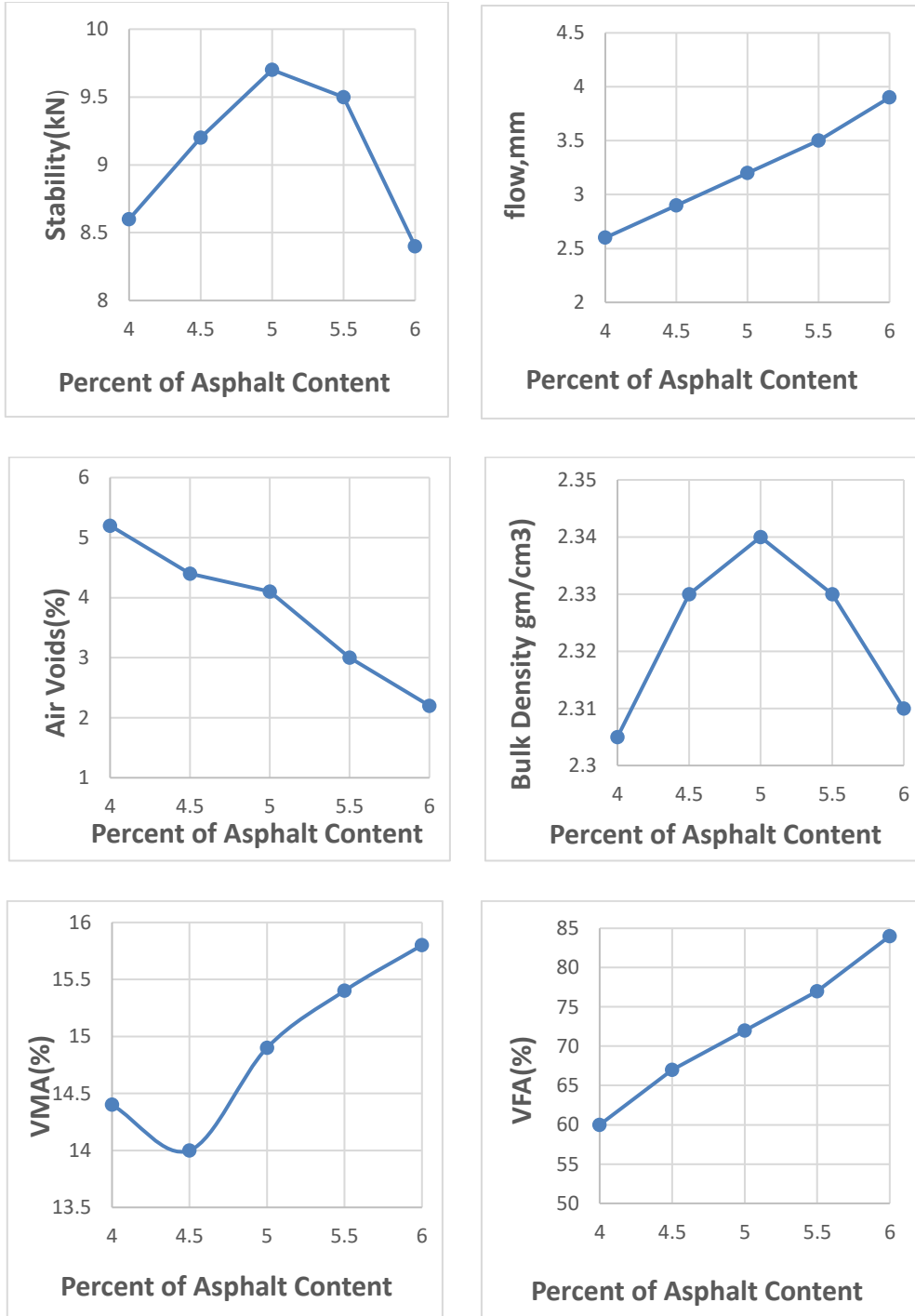
7-2-1 تأثير مخلفات الزجاج على فحوصات مارشال

تم إجراء سلسلة من خصائص مارشال كالثبات والزحف والكثافة ونسب الفراغات لاختيار محتوى الأسفلت الأمثل للخلطة الاسفلتية ذي النسبة المثلى لمخلفات الزجاج التالف. يلخص الجدول (9) نتائج اختبار مارشال. تم استخدام النسبة المثلى لمخلفات الزجاج وهي 4% من وزن الاسفلت وحده وتم الحصول على محتوى الأسفلت الأمثل للخلطة التي تحتوي على مخلفات الزجاج وهي 5.1% للطبقة السطحية. توضح الاشكال (21) (22) العلاقات النموذجية بين خصائص مارشال ومحتوى الأسفلت للخلطة التقليدية والخلطة المحتوية على النسبة المثلى لمخلفات الزجاج. تعكس هذه العلاقة الاتجاه النموذجي لسلوك خلطات مارشال.

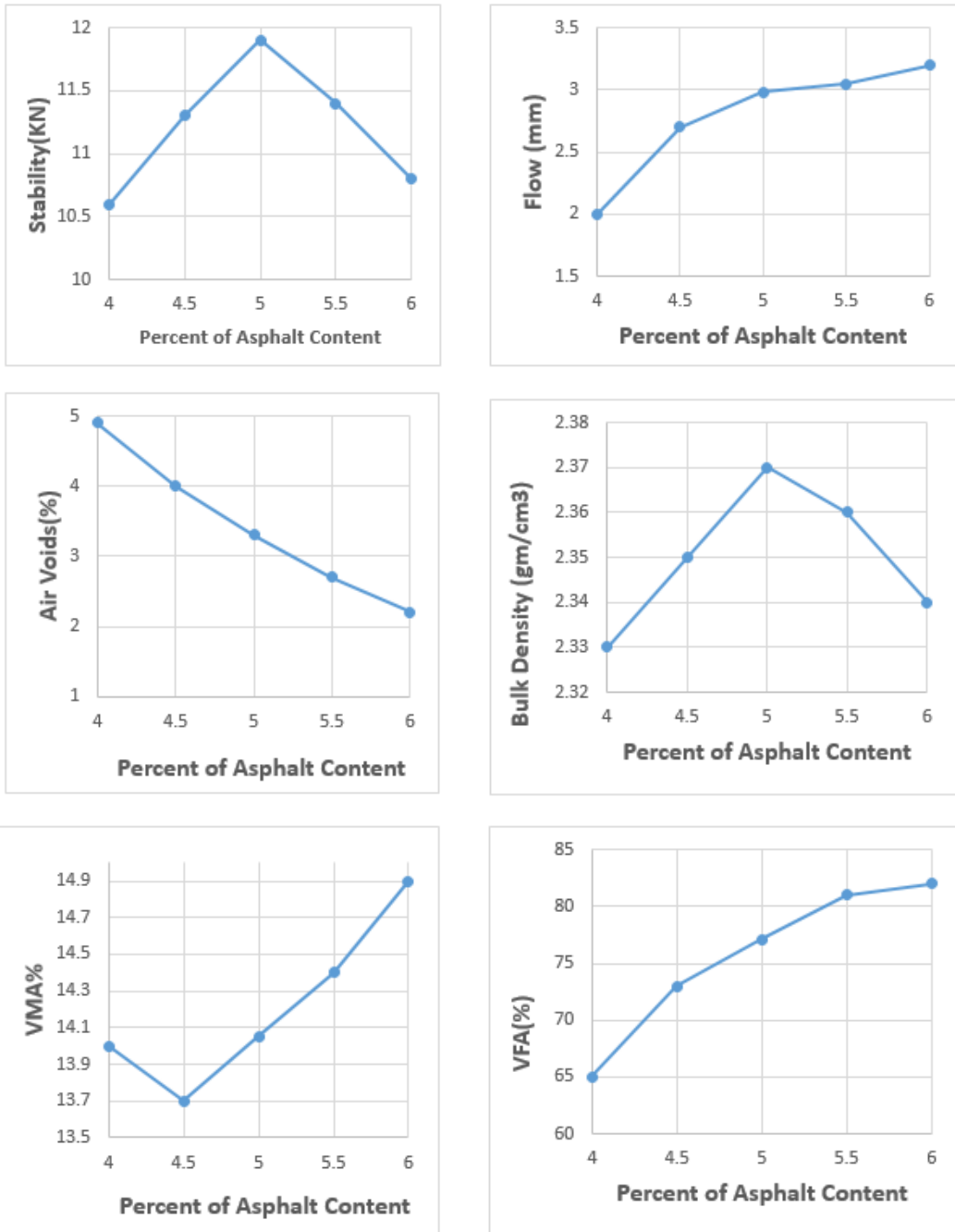
إن محتوى الأسفلت الأمثل المختار لتصميم مزيج الخلطة الاسفلتية يلبي معايير التصميم التي وضعتها المواصفة العراقية. (2003، SCRB R/9).

جدول (9) نتائج اختبار مارشال

النسبة المثلى للزجاج %	Stability, (kN) الثبات	Flow, (mm) الزحف	Bulk Density (gm/cm ³)	Air Voids, (%)	V.M.A., (%)	V.F.A., (%)
0	9.7	3.28	2.34	3.9	15	74
4	11.8	2.98	2.37	3.2	14	77.1



شكل (21) نماذج مارشال للخلطة الاسفلتية المرجعية



شكل (22) نماذج مارشال للخلطة الاسفلتية مع نسبة 4% مخلفات الزجاج

في الجدول (9) ظهرت نتائج الدراسة الحالية أن إضافة الزجاج المطحون بنسبة 4% أدت إلى تحسن ملحوظ في قيمة ثبات مارشال مقارنة بالخلطة المرجعية. وقد سجلت قيم الثبات زيادة تتراوح من 9.7 KN إلى 11.8 KN والسبب يعود إلى أن الزجاج المطحون، يعمل كمادة مالئة ذات صلادة عالية وخشونة سطحية مناسبة، مما يعزز من التماسك بين البليتومين والركام والاحتكاك الداخلي للخلطة إضافة إلى صلابة الاسفلت وأوضحت نتائج الفحص أن إضافة الزجاج المطحون بنسبة 4% أدت إلى انخفاض طفيف في قيم الزحف مع بقائها ضمن الحدود المسموح بها حسب مواصفات مارشال، ويرجع السبب لذلك أن الزجاج المطحون يزيد من صلابة الخلطة دون التأثير سلباً على مرونتها ويحسن مقاومة التخذد عند درجات الحرارة العالية ويُعد هذا الانخفاض مؤشراً إيجابياً على تحسن الأداء الإنشائي للخلطة الأسفلتية. نلاحظ أيضاً انخفاض في الفراغات الهوائية الكلية للخلطة عند إضافة الزجاج المطحون بنسبة 4%، حيث انخفضت القيم من حوالي 3,9% إلى 3,3% والسبب يعود إلى أن المواد المالئة الدقيقة تقلل من الفراغات الهوائية من خلال تحسين تغليف الركام بالبليتومين وتقليل المساحات الهوائية غير الفعالة داخل الخلطة كما أن بقاء قيم الفراغات ضمن المجال المثالي (3-5) % يساهم في تحسين متانة الخلطة وتقليل نفاذية الماء والهواء. أظهرت نتائج الدراسة انخفاضاً طفيفاً في قيم VMA عند إضافة 4% من الزجاج المطحون، إذ انخفضت القيم من حوالي 15% إلى 14% والسبب يعود إلى ملء الفراغات الداخلية للهيكل الركامي وتحسين الترابط بين حبيبات الركام الناعمة والخشنة ويُعد هذا الانخفاض مقبولاً هندسياً طالما بقي ضمن حدود المواصفات، إذ لم يؤثر سلباً على محتوى الاسفلت الفعال داخل الخلطة. ونتيجة لانخفاض الفراغات الهوائية وتحسن الكثافة، ارتفعت قيم VFA عند إضافة الزجاج المطحون بنسبة 4% حيث ازدادت النسبة من 74% إلى 77,1% مقارنة بالخلطة المرجعية. حيث أن ارتفاع VFA الفراغات المملوءة بالاسفلت يدل على تحسن تغليف الركام بالبليتومين وكذلك يعزز مقاومة الخلطة للتلف الرطوبي وكذلك يساهم في زيادة العمر الخدمي للطبقة الأسفلتية.

3-7 نتائج فحص مقاومة الشد غير المباشر

يُستخدم اختبار قوة الشد غير المباشر لتحديد خصائص الشد للخرسانة الإسفلتية، والتي يمكن ربطها أيضاً بخصائص تشقق التبليط.

استُخدمت نسبة قوة الشد (TSR) للتنبؤ بحساسية الخلطات للرطوبة. يُستخدم الحد الموصى به (0.8) لنسبة قوة الشد (TSR) للتمييز بين الخلطات الحساسة للرطوبة والخلطات المقاومة للرطوبة. تشير قيم TSR المرتفعة إلى أن الخليط سيكون على الأرجح أكثر قدرة على مقاومة أضرار الرطوبة. في الجدول (10) تظهر النتائج التي تم الحصول عليها من هذا الاختبار، والتي توضح تأثير النسبة المثلى للزجاج على قيم قوة الشد غير المباشر.

الجدول (10) نتائج اختبار مقاومة الشد غير المباشر

النسبة المثلى للزجاج %	Dry I.T.S. (kPa) مقاومة الشد الجافة	(kPa) Wet I.T.S. مقاومة الشد الرطبة	TSR (%) نسبة قوة الشد
0	1227	1008	82.1
4	1755	1492	85

7-3-1 تأثير مخلفات الزجاج على مقاومة الشد غير المباشر
أظهرت نتائج اختبار مقاومة الشد غير المباشر أن الخلطات الأسفلتية المعدلة بإضافة الزجاج المطحون بنسبة 4% سجلت تحسناً ملحوظاً في مقاومة الشد الجافة والرطبة مقارنة بالخلطة المرجعية.
حيث بلغت قيم مقاومة الشد الجافة للخلطة المعدلة بمخلفات الزجاج 1755 kPa، مقابل 1227 kPa للخلطة غير المعدلة. ويُعزى هذا الارتفاع إلى زيادة التماسك الداخلي للخلطة وتحسن خصائص الخلطة الأسفلتية نتيجة الدور المائي للزجاج المطحون. أما بخصوص مقاومة الشد الرطبة، فقد أظهرت الخلطة المعدلة بالزجاج قيماً 1492 kPa مقارنة بـ 1008 kPa للخلطة المرجعية، مما يدل على تحسن مقاومة الخلطة للتلف الرطوبي. ويعود هذا السلوك إلى تحسن تغليف الركام بالبيتومين وانخفاض نفاذية الماء نتيجة تقليل الفراغات الهوائية.
كما أظهرت نتائج نسبة قوة الشد (TSR) ارتفاعاً ملحوظاً للخلطة المعدلة بالزجاج، إذ تراوحت القيم 85% مقارنة بـ 82,1% للخلطة التقليدية، متجاوزة بذلك الحد الأدنى المطلوب حسب مواصفة ASTM D4867. وتؤكد هذه النتائج أن إضافة الزجاج المطحون بنسبة 4% ساهمت في تحسين مقاومة الخلطة للاضرار الناتجة عن تأثير الرطوبة.

8- الاستنتاجات والتوصيات

1-8 الاستنتاجات

- 1- أدت إضافة مخلفات الزجاج المطحون بنسب معينة أدت إلى تحسين الخواص الفيزيائية للأسفلت، حيث لاحظ انخفاض في قيم الاختراق وارتفاع في نقطة الليونة، مما يشير إلى زيادة صلابة البيتومين وتحسن أدائه عند درجات الحرارة العالية.
- 2- إن إضافة مخلفات الزجاج تقلل من قيمة الاستطالة (Ductility) للخلطة الإسفلتية، وكلما زادت نسبة الزجاج تدريجياً، أصبح الخلطة أقل مرونة وأكثر هشاشة.
- 3- أن الزجاج المطحون ساهم في زيادة اللزوجة الدورانية للأسفلت، الأمر الذي انعكس إيجابياً على مقاومة الانسياب والتشوه، دون التأثير السلبي على قابلية الخلط والدمك عند درجات الحرارة القياسية.
- 4- بخصوص فحص نقطة الوميض والاحتراق أن إضافة مخلفات الزجاج لم تؤثر سلباً على السلامة الحرارية للأسفلت، حيث بقيت القيم ضمن حدود المواصفات القياسية، مما يدل على أمان استخدام البيتومين المعدل في عمليات الإنتاج والتنفيذ.
- 5- أسهمت إضافة مخلفات الزجاج المطحون في زيادة ملحوظة لقيم ثبات مارشال، مما يعكس تحسن قدرة الخلطة الأسفلتية على مقاومة الأحمال المرورية المتكررة.
- 6- حققت الخلطات الأسفلتية المحتوية على الزجاج المطحون زيادة في الكثافة الظاهرية نتيجة تحسن الترابط الداخلي وملء الفراغات بين حبيبات الركام، مما أدى إلى بنية أكثر تماسكاً واستقراراً.
- 7- أن إضافة الزجاج المطحون أدت إلى انخفاض الفراغات الهوائية الكلية (Va) مع بقائها ضمن المجال المثالي، مما يساهم في تقليل نفاذية الماء والهواء وتحسين متانة الخلطة.
- 8- أدى استخدام مسحوق مخلفات الزجاج إلى انخفاض طفيف في قيم الفراغات في الركام المعدني (VMA)، إلا أن هذا الانخفاض بقي ضمن الحدود المقبولة هندسياً، ولم يؤثر سلباً في أداء الخلطة الأسفلتية.

- 9- ارتفعت قيم الفراغات المملوءة بالأسفلت (VFA) مع زيادة نسبة مسحوق الزجاج، مما يدل على تحسن تغليف الركام بالبيتومين وزيادة مقاومة الخلطة لتأثير الرطوبة.
- 10- حققت نسبة الإضافة 4% من مسحوق مخلفات الزجاج أفضل أداء بين النسب المدروسة، إذ وفرت توازناً بين تحسين الخواص الفيزيائية للبيتومين وتعزيز الأداء الميكانيكي للخلطة الأسفلتية.
- 11- أدت زيادة نسبة مسحوق مخلفات الزجاج إلى مستويات مرتفعة إلى زيادة صلابة البيتومين وانخفاض ليونته، الأمر الذي قد يؤثر سلباً في أداء الخلطة عند التعرض للأحمال المتكررة أو درجات الحرارة المنخفضة.
- 12- يسهم استخدام مسحوق مخلفات الزجاج في الخلطات الأسفلتية في تحقيق فوائد بيئية واقتصادية، من خلال إعادة تدوير النفايات الزجاجية، وتقليل كميات المخلفات المتجهة إلى مواقع الطمر، والاستفادة منها كمادة معدلة منخفضة الكلفة.
- 13- يمتلك البيتومين المعدل بمسحوق مخلفات الزجاج إمكانية واعدة للاستخدام في مشاريع رصف الطرق، ولا سيما في المناطق ذات الأحمال المرورية العالية ودرجات الحرارة المرتفعة، لما يوفره من تحسن في الأداء الهندسي للخلطات الأسفلتية.
- 14- إضافة الزجاج المطحون بنسبة 4% أدت إلى زيادة مقاومة الشد الجافة والرطبة للخلطة الأسفلتية ورفع نسبة قوة الشد (TSR) لتتجاوز الحد الأدنى المطلوب (<80%)، مما يعكس تحسن مقاومة الخلطة لاضرار الرطوبة وزيادة تماسك الركام بالبيتومين.

2-8 التوصيات

يُقترح تقييم المواضيع التالية كامتدادٍ للعمل الحالي، وهي:

- 1- تقييم تأثير إضافة مخلفات الزجاج المطحون على الخواص الفيزيائية للأسفلت باستخدام فحوص متقدمة مثل (DSR – Dynamic Shear Rheometer و Bending Beam Rheometer – BBR) وذلك لتقييم أداء البيتومين المعدل عند درجات الحرارة العالية والمنخفضة.
- 2- دراسة تأثير أحجام حبيبات مختلفة للزجاج المطحون (ميكروني، نانوي، أقل من 75 ميكرون) على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للأسفلت، بهدف تحديد الحجم الحبيبي الأكثر كفاءة.
- 3- تقييم التأثير طويل الأمد للتقادم على البيتومين والخلطة الأسفلتية المعدلة بالزجاج، من خلال تطبيق فحوص التقادم القصير والطويل الأمد (RTFO و PAV) ودراسة التغيرات في الخواص مع الزمن.
- 4- اجراء فحوص أداء متقدمة للخلطات الأسفلتية المعدلة بالزجاج، مثل: مقاومة التخذد (Wheel Tracking Test) مقاومة التعب (Fatigue Test) مقاومة التشقق الحراري وذلك للحصول على تقييم شامل لأداء الرصف.
- 5- اجراء تحليل اقتصادي وبيئي (Life Cycle Cost Analysis & Environmental Impact) لمقارنة الخلطات المعدلة بالزجاج مع الخلطات التقليدية، من حيث الكلفة، الاستدامة، وتقليل الانبعاثات.

المصادر

- 1- **Sebaaly, Peter E.** Comparison of Lime and Liquid Additives on the Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Mixtures. National Lime Association, April, 2007.
- 2- **Downer, E., et al.** (1997). Recycled glass in road base. Austroads Pavement Research Group Report. Sydney.
- 3- **Poon, C.S., & Chan, D.** (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. Construction and Building Materials
- 4- **Arabani, M., Tahami, S.A., & Hamedi, G.H.** (2012). Performance evaluation of dry process crumb rubber modified asphalt mixture with glass powder as a filler. International Journal of Pavement Engineering
- 5- **Sathishkumar, V., Saravanan, U., & Jeevanlal, M.** (2017). Use of waste .glass powder as filler in Marshall mix design for bituminous mix International Journal of Engineering Sciences & Research Technology.
- 6- **Gavriletea, M.D.** (2017). Environmental impacts of sand exploitation ,Analysis of sand market. Sustainability.
- 7- **Belouadah, M., & Kaouche, M.** (2018). Mechanical characterisation of asphalt mixtures incorporating recycled glass powder as mineral filler replacement. Construction and Building Materials
- 8- **الحمداي، م.، والعاني، أ.** (2019). تأثير إضافة مسحوق نفايات الزجاج على خصائص-الخلطات الأسفلتية الساخنة. مجلة الهندسة والتنمية المستدامة،
- 9- **Tan, J., Du, H., Poon, C.S., & Pan, X.** (2019). Recycled glass in construction applications – a review of its properties and environmental impacts. Journal of Hazardous Materials.
- 10- **الدباغ، ن.، وآخرون.** (2020). تقييم الأداء الميكانيكي للخلطات الأسفلتية المحتوية على مخلفات الزجاج. المجلة السعودية لعلوم الهندسة
- 11- **Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I.L., & Hilton, H.** (2021). Life cycle assessment of asphalt with glass waste powder: Environmental and economic benefits. Journal of Cleaner Production
- 12- **Abdullah, M. E., et al.** (2022). Performance of glass powder as bitumen modifier in hot mix asphalt.
- 13- **McGennis, R. B., Kennedy, T. W., & Machemehl, R. B.** (1984). Stripping and moisture damage in asphalt mixtures.