



تصميم الخلطات الإسفلتية الساخنة بطريقة مارشال

محمد عمران يعقوب، عبد الله علي اغويله*، أحمد الهادي أبوزبيدة، وأسامة عبد الله الصقلي

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، الجامعة الأسمرية الإسلامية، زليتن، ليبيا.

*البريد الإلكتروني: a.agwila@asmarya.edu.ly

Hot Mix Asphalt Design by Marshall Method

Mohammed Emran Yaqoub, Abdalla Ali Agwila*, Ahmad Alhadi Abuzbida, and Osama Abdullah Sagallye

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Alasmarya Islamic University, Zliten, Libya.

الملخص

تناول هذه الدراسة موضوع تصميم الخلطات الاسفلتية الساخنة مع التركيز على طريقة مارشال كأحد أهم وأكثر الطرق انتشارا في تصميم الرصف الاسفلتي. يعتمد تصميم الخلطة الاسفلتية على المزج الدقيق بين الركام والبيتومين، مع ضبط نسب المكونات لتحقيق التوازن المطلوب بين الثبات ومقاومة التشوه، والأداء طويل الأمد تحت الأحمال المرورية المختلفة والظروف البيئية المتنوعة. في هذا البحث تم إجراء اختبارات معملية على عينات الركام والبيتومين وعينات الخلطة الإسفلتية وقد بينت النتائج أن الركام المستخدم يمتلك الخصائص اللازمة والمطابقة للمواصفات المعمول بها في هذا المجال، والبيتومين المستخدم أعطى نتائج مقبولة وفق المواصفات القياسية المستخدمة. وقد تم في هذه الدراسة تجهيز عدد من الخلطات الاسفلتية بإضافة نسب مختلفة من البيتومين وهي (3.5% و4% و4.5% و5% و5.5%) ومن خلال تحليل النتائج المتحصل عليها لخصائص الخلطة الاسفلتية تم تحديد نسبة البيتومين المثلى التي تحقق أفضل أداء للخلطة الاسفلتية وكانت 4.2% من الوزن الكلي للركام، حيث أعطت نتائج الاختبارات للخلطة الاسفلتية عند هذه النسبة فراغات هوائية بقيمة 4.0% والاستقرار بقيمة 1100 كجم والتدفق بقيمة 2.54 ملم والفراغات الهوائية المملوءة بالبيتومين 68.0% وفراغات الركام بقيمة 13.25% وكلها كانت ضمن حدود المواصفات القياسية. وللتحقق من صحة التصميم، تم أخذ عينة من الخلطة المركزية وفق التدرجات التي تم التصميم بها ونسبة البيتومين المثلى التي تم استخراجها وتم عمل اختبار الاستخلاص وثبات مارشال عليها وكانت النتائج المتحصل عليها متوافقة مع التحليل التصميمي المعمول به في هذه الدراسة. خلصت الدراسة إلى أهمية ملائمة تصميم الخلطات الاسفلتية للظروف المحلية والمواصفات الوطنية من أجل تحقيق أداء عالي الجودة وتقليل الحاجة لأعمال الصيانة مستقبلا، مع تقديم توصيات عملية لدعم المهندسين والفنيين في تنفيذ تصميمات أكثر كفاءة وجودة في مشاريع الرصف.

الكلمات الدالة: خلطات إسفلتية، طريقة مارشال، بيتومين، الاختبارات الفيزيائية، الخواص الحجمية.

Abstract

This study addresses the topic of asphalt mix design, focusing on the Marshall Method as one of the most important and widely used approaches in asphalt pavement design. Asphalt mix design relies on the precise blending of aggregates and bitumen, with careful control of component proportions to achieve the desired balance between stability, deformation resistance, and long-term performance under varying traffic loads and environmental conditions. In this research, laboratory tests were conducted on aggregate, bitumen, and asphalt mix samples. The results showed that the aggregates used possess the necessary characteristics in accordance with applicable specifications, and the bitumen yielded acceptable results based on the relevant standards. Several asphalt mixtures were prepared with varying bitumen contents: 3.5%, 4%, 4.5%, 5%, and 5.5%. Through analysis of the results of mix properties, the optimal bitumen content providing the best asphalt mix performance was determined to be 4.2%. At this percentage, the mix exhibited the following values: 4.0% air voids, 1100Kg stability, 2.54 mm flow, 68.0% voids filled with bitumen (VFB), and 13.25% voids in mineral aggregate (VMA)- all within the limits of the standard specifications. To verify the accuracy of the design, a sample was taken from the central mixing plant using the same gradation and optimal bitumen content as determined in the design. An extraction and Marshall test were conducted to ensure that the obtained results were consistent with the adopted design analysis. The study concluded with an emphasis on the importance of tailoring asphalt mix designs to local conditions and national specifications to achieve high performance and minimize future maintenance needs. Practical recommendations were also provided to support engineers and technicians in implementing more efficient and higher-quality designs in pavement projects.

Keywords: Asphalt mixes, Marshall method, Bitumen, Physical tests, Volumetric properties.

1. المقدمة

يُعتبر الإسفلت من أكثر أنواع مواد الرصف استخدامًا وانتشارًا حول العالم، حيث يُستخدم في مختلف تطبيقات الطرق بدءًا من الشوارع السكنية مرورًا بالطرق السريعة ومواقف السيارات، وحتى المرافق الصناعية والمطارات. يعود ذلك إلى قدرة الإسفلت على تحمل الأحمال الثقيلة والظروف البيئية المختلفة، مما يجعله مادة مثالية للبنية التحتية للطرق (البحقيري، 2014).

إن تصميم الخلطة الإسفلتية يمثل مرحلة حاسمة في تنفيذ مشاريع الطرق، حيث يعتمد بشكل أساسي على اختيار المواد الملائمة (الركام والبيتومين) وتحديد نسب المزج المثلى لتحقيق التوازن المطلوب بين المتانة، الثبات، مقاومة التشوه، والأداء طويل الأمد. ويتطلب هذا التصميم فهماً دقيقاً لسلوك الخلطة تحت تأثير الأحمال والعوامل البيئية، بالإضافة إلى إجراء اختبارات مخبرية دقيقة لتقييم الخصائص الحجمية والميكانيكية للخلطة (Kandhal et al., 1998).

يعتمد تصميم خلطة الإسفلت على فهم شامل لمكونات الخلطة وظروف البيئة التي ستُستخدم فيها، إذ تختلف متطلبات التصميم باختلاف نوع الإسفلت والمناخ والظروف المحيطة. وتشمل هذه الخلطات مجموعة واسعة من المواد مثل الركام بأنواعه المختلفة، والبيتومين (المادة الرابطة)، والمضافات الخاصة التي تُستخدم لتعزيز خصائص الخلطة وملاءمتها للمتطلبات الهندسية. من بين الطرق المختلفة لتصميم الخلطات الإسفلتية، تبرز طريقة مارشال كأحد أكثر الطرق استخدامًا في العديد من دول العالم، خاصة في الدول التي تعتمد المواصفات الأمريكية، لما تمتاز به من سهولة التطبيق، وقابلية تكرار النتائج، واعتمادها على اختبارات مخبرية يمكن التحكم بها بدقة (Asphalt Institute, 2014)، وتعتمد هذه الطريقة على تحديد محتوى البيتومين الأمثل من خلال موازنة عدة مؤشرات، مثل الثبات والانسياب والكثافة، والفراغات في الخلطة. تتطلب عملية تصميم خلطة الأسفلت معرفة دقيقة بسلوك الخلطة تحت تأثير الأحمال المختلفة وخصائص المواد المستخدمة، بالإضافة إلى اختبارات مخبرية دقيقة تساعد في تحديد الأداء المتوقع للخلطة، لذلك فإن فهم هذه الأسس والخصائص يعد أمرًا حيويًا لضمان جودة الطرق وزيادة عمرها الافتراضي وتقليل الحاجة للصيانة المتكررة. وبالنظر إلى أهمية تكييف تصميم الخلطات مع الظروف المحلية، يُعدّ الرجوع إلى المواصفات الوطنية والممارسات المعتمدة في المختبرات المحلية أمرًا أساسيًا لضمان نجاح تطبيق الطريقة على أرض الواقع (البحقيري، 2014).

يهدف هذا البحث إلى دراسة وتحليل طرق تصميم خلطات الأسفلت المختلفة، مع التركيز على كيفية اختيار المواد المناسبة، وطريقة تحضير الخلطات، بالإضافة إلى الاختبارات المعملية اللازمة لتقييم خصائصها. كما سيتم دراسة تأثير العوامل المختلفة مثل محتوى البيتومين والخصائص الحجمية للخلطة على الأداء النهائي.

2. الدراسات السابقة

قام (Lambebo, 2020) من جامعة (Wolaita Sodo University) بدولة أثيوبيا بعمل تصميم لخلطة إسفلتية حيث أُجريت اختبارات معملية على الركام والبيتومين وعينات الخلطة الإسفلتية. وكانت جميع نتائج الاختبارات ضمن المواصفات الأمريكية ASTM. تم في هذه الدراسة استخدام خمس نسب بيتومين مختلفة تمت إضافتها لخليط الركام وهي كالتالي 4% و 4.5% و 5% و 5.5% و 6%. أظهرت النتائج أن النسبة المثلى للبيتومين والتي حققت أفضل أداء للخلطة الإسفلتية كانت 5.0%. حيث كانت النتائج لخواص الخلطة الإسفلتية عند النسبة المثلى كالتالي: نسبة الفراغات الهوائية في الخلطة (Va)

4.0%، ونسبة الفراغات المعدنية في كتلة الركام (VMA) 13.35%، ونسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين (VFB) 71%، وثبات مارشال 18.6 kN (Marshall Stability)، والتدفق 3.12 mm (Flow). وفي دراسة أخرى قام أبوراوي (2023) من كلية الهندسة جامعة المرقب بمدينة الخمس بدراسة تأثير مستويات الدمك على الخواص الحجمية والميكانيكية للخلطات الإسفلتية، حيث قام بتجهيز عينات مارشال للدمك من خلطة مرجعية وقام بمقارنة دمك هذه العينات بمستويات دمك مختلفة 25، 50، 75، 100 ضربة من الجهتين بواسطة مطرقة مارشال، وأخذ القياسات والأوزان لجميع العينات وتحديد الخواص الحجمية والميكانيكية، وأظهرت النتائج أن زيادة عدد الضربات يزيد من ثبات الخلطة وكثافتها في حين يقلل من قيمة التدفق.

وفي دراسة أخرى قام نايل (2021) بجامعة سبها بدراسة تأثير أنواع مختلفة من البودرة على خواص مارشال للخلطات الإسفلتية الساخنة، حيث استخدم أربعة أنواع من البودرة كمادة مألئة وهي الجير المطفأ ومسحوق الأحجار (ناتج الكسارات) والرمال الناعمة والإسمنت واستخدم بيتومين (70/60) بنسب خلط (4، 4.5، 5، 5.5، 6، 6.5) وقد بينت النتائج أن استخدام بودرة مسحوق الأحجار كمادة مألئة أعطت أفضل النتائج للخلطة الإسفلتية حيث كانت قيم الثبات 2396 كجم والانسياب 3.8 مم ونسبة الفراغات الهوائية 3.976% والكثافة 2.425 جم/سم³ عند نسبة الأسفلت المثلى 4.6%.

وفي دراسة أخرى قام Le وآخرون (2024) من جامعة (Ho Chi Minh) في دولة فيتنام بعمل تصميم لخلطة اسفلتية، استخدم فيها ركام بمقاس اعتباري 16 مم وبيتومين 70/60، استخدم المهندسون في هذه الدراسة 6 نسب بيتومين هي (3.5، 4، 4.5، 5، 5.5، 6) وذلك لتحديد النسبة المثلى للبيتومين التي تحقق أفضل خصائص للخلطة الإسفلتية وذلك بناء على النتائج المتحصل عليها مثل الفراغات الهوائية والفراغات المليئة بالبيتومين وغيرها من الخصائص. تم عمل الاختبارات اللازمة للركام والبيتومين وكانت النتائج ضمن حدود مواصفات AASHTO. كانت النسبة المثلى للبيتومين المتحصل عليها من هذه الدراسة هي 4.7%.

وفي دراسة أخرى قام Arshad وآخرون (2017) من معهد IIESM في دولة ماليزيا بعمل تصميم لخلطة اسفلتية مرجعية مع خلطات أخرى باستخدام أسفلت معاد تدويره، وفي هذه الدراسة كانت نسب البيتومين المستخدمة لجميع الخلطات كالتالي (4%، 4.5%، 5%، 5.5%، 6%). تم في هذه الدراسة إجراء كل الاختبارات اللازمة لاختبار صلاحية الركام والبيتومين للخلطة المرجعية وذلك ضمن المواصفات الأمريكية ASTM، كانت النسبة المثلى للبيتومين المتحصل عليها من هذه الدراسة للخلطة

المرجعية 5.34%. وكانت النتائج للخلطة الإسفلتية عند النسبة المثلى للبيتومين ((4.0% Air Void، (VFB (75%), Stability (22kN) , Flow (3.0mm).

3. البرنامج العملي

تناول هذا الجانب التجارب التي تم إجراؤها على المواد الداخلة في تصميم الخلطة الإسفلتية (الركام بأنواعه والبيتومين) لتحديد صلاحية تلك المواد، كذلك كيفية تصميم الخلطة الإسفلتية وضبط التدرجات اللازمة للركام طبقاً للمواصفة القياسية ASTM D3515 لسنة (2001)، وكذلك الطريقة القياسية لتحضير العينات الإسفلتية (عينات مارشال) طبقاً للمواصفة القياسية ASTM D1559 لسنة (1998) والاختبارات اللازم إجراؤها لتحديد الوزن النوعي للخلطات الاسفلتية المدموكة حسب المواصفة القياسية ASTM D2726 لسنة (2011)، وكذلك اختبارات الثبات والانفعال لكل عينة حسب المواصفة القياسية ASTM D1559، كما تم ذكر كل معادلات مارشال اللازمة لحساب الخصائص الحجمية والميكانيكية للخلطة الإسفلتية مثل نسبة الفراغات الهوائية و نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين وغيرها من الحسابات لتحديد خواص الخلطة الاسفلتية ومعايير القبول حسب المواصفات الفنية المعمول بها في هذا المجال.

كانت الاختبارات التي تم إجراؤها على عينات الركام هي اختبار الوزن النوعي والامتصاص للركام الخشن حسب المواصفة القياسية AASHTO T85 لسنة (2022) وللركام الناعم حسب المواصفة T84 AASHTO لسنة (2013)، واختبار تعيين معامل الصدم للركام حسب المواصفة AASHTO T 96 BS 812 part 3 لسنة (1975)، واختبار لوس أنجلوس لتآكل الركام حسب المواصفة AASHTO T 96 لسنة (2002)، واختبار المكافئ الرملي للركام الناعم حسب المواصفة AASHTO T176 لسنة (2008)، واختبار تحديد كتل الطين والحبيبات سهلة التفتت في الركام حسب المواصفة AASHTO T112 لسنة (2023)، واختبار الاستطالة والتفلطح حسب المواصفة ASTM D4791 لسنة (2011).

أما الاختبارات التي تم إجراؤها على عينات البيتومين شملت اختبار الوزن النوعي حسب المواصفة ASTM D70 لسنة (2018)، واختبار الاختراق للبيتومين حسب المواصفة ASTM D5 لسنة (2013)، واختبار تعيين المطولية للبيتومين حسب المواصفة القياسية ASTM D113 لسنة (2023)، واختبار تعيين نقطة الليونة للبيتومين حسب المواصفة القياسية AASHTO T53-96 لسنة (2022).



4. مناقشة وتحليل النتائج

1.4. اختبارات الركام

1.1.4. الوزن النوعي والامتصاص للركام الخشن:

كانت نتيجة اختبار الوزن النوعي للركام الخشن ضمن حدود المواصفة AASHTO T85 وهي تتراوح ما بين 2.5-2.75 وكذلك نسبة الامتصاص كانت ضمن حدود نفس المواصفة التي تنص أن نسبة الامتصاص لا تزيد للركام الخشن عن 2%. والجدول (1) يوضح القيم النهائية لاختبار الوزن النوعي ونسبة الامتصاص للركام الخشن.

جدول 1. القيم النهائية لاختبار الوزن النوعي للركام الخشن

مقاس الركام (مم)	25 – 18	18 – 12	12 – 5
الوزن النوعي الكلي	2.605	2.595	2.61
الوزن النوعي الكلي المشبع جاف السطح	2.633	2.625	2.625
الوزن النوعي الظاهري	2.674	2.665	2.655
نسبة الامتصاص (%)	0.93	0.99	0.66

1.1.4. الوزن النوعي والامتصاص للركام الناعم:

تم إجراء اختبار الوزن النوعي والامتصاص للركام الناعم وكانت النتائج المتحصل عليها ضمن حدود المواصفة AASHTO T84 التي تنص أن أقصى نسبة امتصاص للركام الناعم هي 2% وأن الوزن النوعي يجب أن يتراوح ما بين 2.5-2.7. والجدول (2) يوضح نتائج اختبار الوزن النوعي للركام الناعم.

جدول 2. نتائج اختبار الوزن النوعي للركام الناعم

البند	العينة 1	العينة 2	المتوسط
وزن العينة جافة في الفرن (A) (جم)	433.6	433.7	--
وزن الدورق مملوء بالماء (B) (جم)	677.1	682.3	--
وزن الدورق + العينة مغمورة في الماء (C) (جم)	945	950.8	--
وزن العينة مشبعة جافة السطح (SSD) (جم)	440.1	440	--
الوزن النوعي الكلي	2.52	2.53	2.52
الوزن النوعي الكلي المشبع الجاف السطح	2.56	2.57	2.56
الوزن النوعي الظاهري	2.62	2.63	2.62
نسبة الامتصاص (%)	1.50	1.45	1.48

3.1.4. اختبار مقاومة الصدم للركام:

تم أخذ ثلاث عينات وتم حساب معامل الصدم للعينات الثلاث وتم أخذ المتوسط لمعامل الصدم وكانت النتيجة 13.32% ضمن حدود المواصفة البريطانية BS 812 part 3 التي تنص أن معامل الصدم يجب ألا يتجاوز 30%.

4.1.4. اختبار لوس أنجلوس لتآكل الركام:

كانت نتائج اختبار لوس أنجلوس 29% وهي ضمن حدود المواصفة AASHTO T96 التي تنص أن أقصى قيمة للمار من منخل 1.7 مم يجب ألا تتجاوز 30% من الوزن الكلي للعينة.

5.1.4. اختبار المكافئ الرملي للركام الناعم:

تم حساب طول عمود الرمل وعمود الطين وكانت نتيجة المكافئ الرملي 73.2% وهي ضمن المواصفات AASHTO T177 التي تنص أن قيمة مكافئ الرمل يجب ألا تقل عن 50%.

6.1.4. اختبار تحديد كتل الطين والحبيبات سهلة التفتت في الركام:

كانت النتائج المتحصل عليها من اختبار تحديد كتل الطين كما في الجدول (3) وهي نتائج ضمن المواصفة AASHTO T112 التي تنص أن أقصى قيمة للكتل الطينية لا تزيد عن 1%.

جدول 3. نتائج اختبار تحديد كتل الطين في الركام

قطر المنخل (مم) المحجوز على المار من	وزن عينة الاختبار (جم)	وزن العينة بعد الغسل والجفيف في الفرن (جم)	وزن كتل الطين (جم)	نسبة كتل الطين في العينة (%)
37.5	3000	2993	7	0.23
19	2000	1994	6	0.30
9.5	1000	990	9.04	0.90
4.75	100	299	0.8	0.8

7.1.4. اختبار الاستطالة والتفلطح للركام:

تم إجراء الاختبار حسب المواصفات القياسية ASTM D479 وكانت نتيجة النسبة المئوية للتفلطح 12.7%، والنسبة المئوية للاستطالة 13.2% وجميعها كانت ضمن حدود المواصفات والتي تنص ألا تزيد نسبتهما عن 20%.

2.4. اختبارات البيتومين

1.2.4. اختبار الوزن النوعي للبيتومين:

تم إجراء الاختبار لعينة من البيتومين وكانت النتائج ضمن حدود المواصفة ASTM D70 التي تنص أن قيمة الوزن النوعي تتراوح بين (1.01 – 1.04).



جدول 4. نتائج اختبار الوزن النوعي للبيتومين

79.1	A	وزن البكنوميتر (جم)
186.07	B	وزن البكنوميتر + الماء (جم)
115	C	وزن البكنوميتر + العينة (جم)
35.9	D	وزن العينة (جم)
187	E	وزن البكنوميتر + العينة + الماء (جم)
1.03		الوزن النوعي

2.2.4. اختبار الاختراق للبيتومين:

تم إجراء الاختبار لعينتين من البيتومين وتم أخذ المتوسط لهما وكانت 63.13 وهي ضمن المواصفة القياسية ASTM D5 والتي تنص أن الاختراق يجب أن يكون بين 60 و70 والجدول (5) يوضح نتائج القراءات.

جدول 5. القراءات المتحصل عليها من اختبار الاختراق للبيتومين

العينة	القراءة الأولى	القراءة الثانية	القراءة الثالثة	المتوسط
1	67.4	70.3	60.6	66.1
2	64.5	61	55	60.17

3.2.4. اختبار تعيين المطولية للبيتومين:

تم إجراء الاختبار حسب المواصفة القياسية ASTM D113 وكانت الاستطالة المتحصل عليها من الاختبار 119 سم، وهي ضمن حدود المواصفات القياسية.

4.2.4. اختبار تحديد نقطة الليونة للبيتومين:

تم إجراء الاختبار حسب المواصفة القياسية AASHTO T53-96 وكانت النتائج 47°C و 47.6°C على التوالي ومتوسط القراءتين 47.3°C وهي نتيجة مقبولة كي يتحمل البيتومين درجات الحرارة العالية.

3.4. اختبارات الخلطة الإسفلتية

1.3.4. نتائج الوزن النوعي للخلطة:

جدول (6) يوضح نتائج الوزن النوعي الفعال للركام في الخلطة. وكذلك الجدول (7) يوضح نتائج الأوزان النوعية الداخلة في تصميم الخلطة.



جدول 6. نتائج الوزن النوعي الفعال للركام في الخلطة.

Description	Symbol	Values				
Asphalt Content by Mix weight.	Pb	3.37	3.84	4.29	4.75	5.19
Maximum Theoretical Specific Gravity	(Gmm)	2.535	2.517	2.500	2.483	2.467
Percent Aggregate by Total Mix (%)-(Factor C1)	$C1=(100-Pb)$	96.62	96.16	95.70	95.25	94.80
Factor C2	$C2=(100/Gmm)$	39.44	39.72	39.99	40.26	40.53
Factor C3	$C3=(Pb/Gb)$	3.27	3.72	4.17	4.61	5.04
Factor C4	$C4=C2-C3$	36.16	35.99	35.82	35.65	35.48
Effective Specific Gravity of Combined aggregate (gse)	$C5=C1/C4$	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67
Average (gse)		2.671				

جدول 7. نتائج الأوزان النوعية الداخلة في تصميم الخلطة

Description		Filler	Fraction Size (mm)			
			0 - 5 mm	5 - 12 mm	12 - 18 mm	18-25 mm
			Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4
Bulk Specific gravity (dry)	Gsb	2.718	2.598	2.667	2.670	2.685
Bulk Specific gravity of (SSD)	Gs(ssd)	2.718	2.631	2.692	2.690	2.703
Apparent Specific Gravity	Gsa	2.718	2.687	2.734	2.724	2.736
% Aggregate Fraction	Ps	5	47	19	19	10
Factor K1	Ps/Gsb	1.840	18.088	7.123	7.117	3.725
Gsb (combined aggregate)	100/K1		2.639			
Factor K2	Ps/Gs(ssd)	1.840	17.863	7.059	7.064	3.699
Gs (ssd) (combined aggregate)	100/K2		2.665			
Factor K3	Ps/Gsa	1.840	17.494	6.949	6.975	3.655
Gsa (combined aggregate)	100/K3		2.709			
Water Absorption			1.263	0.915	0.750	0.694
Combined Water Absorption			0.958			

2.3.4. اختبارات الخلطة التصميمية:

من خلال الاختبارات التي تم إجراؤها على المواد واختبار مارشال على مجموعة العينات التي تم تجهيزها في المعمل بناءً على نسب الخلط لأنواع الركام مع نسب مختلفة من البيتومين، وبعد تحديد النسبة



المثلّى للبيتومين وأفضل تدرج للركام توصلنا إلى النتائج الآتية:
(1) اختيار التدرج المناسب لمقاسات الركام في الخلطة:

جدول 8. نتائج التحليل التصميمي لتدرجات الركام في الخلطة

مقاس المنخل (مم)							مقاس الركام (مم)
0.075	0.3	2.36	4.75	9.5	19	25	
0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	67.1	100	25 - 18
0.1	0.1	0.1	0.2	4.8	99.7	100	18 - 12
0.1	0.1	0.6	6.1	63.5	100	100	12 - 5
1.2	7	59	94	100	100	100	5 - 0
76	98.1	100	100	100	100	100	Filler

جدول 9. نتائج التحليل التجميعي لتدرجات الركام في الخلطة

مقاس المنخل (مم)							نسبة المقاس من الخليط (%)	مقاس الركام (مم)
0.075	0.3	2.36	4.75	9.5	19	25		
0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	6.7	10	10	25 - 18
0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	18.9	19	19	18 - 12
0.0	0.0	0.1	1.2	12.1	19	19	19	12 - 5
0.6	3.3	27.7	44.3	47	47	47	47	5 - 0
3.8	4.9	5	5	5	5	5	5	Filler
4.4	8.2	32.9	50.5	65	96.7	100	100	المجموع
8	19	49	65	80	100	100	العليا	حدود المواصفات
2	5	23	35	56	90	100	الدنيا	
5.4	11.2	36.9	55.5	70	100	100	+	حدود السماحية (Tolerance)
3.4	5.2	28.9	45.5	60	91.7	100	-	

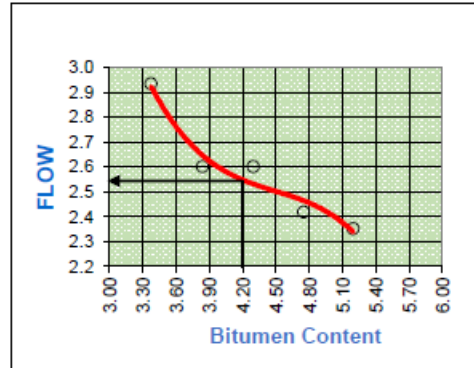
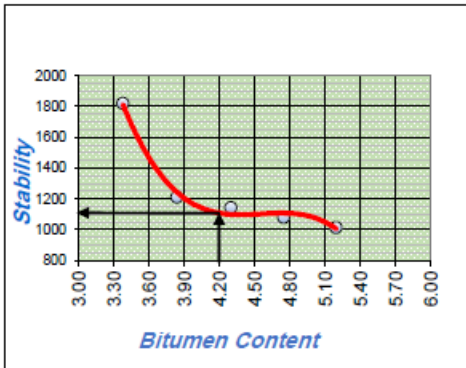
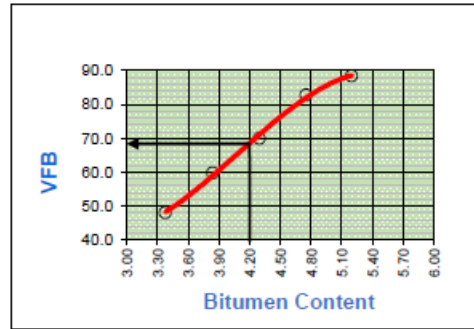
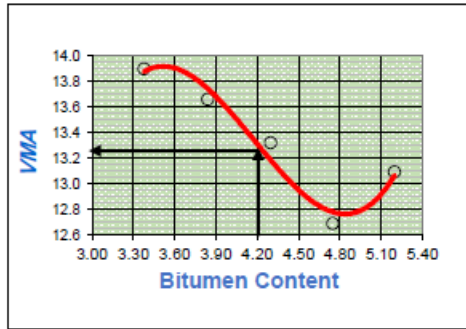
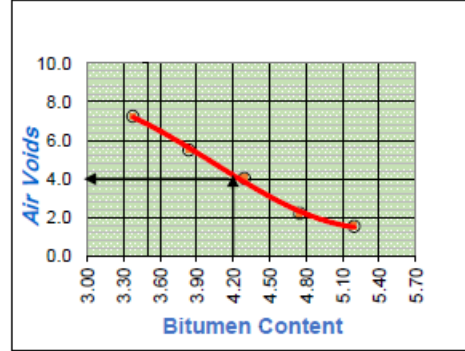
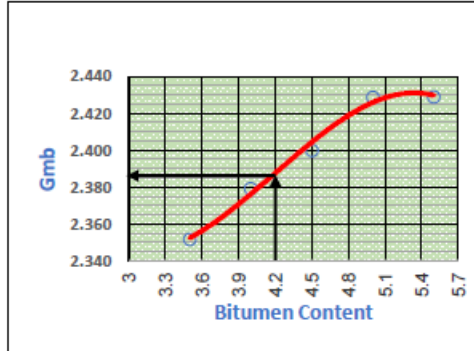
(2) نتائج اختبار مارشال للخلطة التصميمية:

يوضح الجدول (10) نتائج اختبار مارشال على عينات الخلطة التصميمية، والشكل (1) يوضح العلاقات بين نسب البيتومين وخواص الخلطات التجريبية، حيث تم اختيار أفضل نسبة بيتومين من المنحنيات والتي تحقق خواص الخلطة التصميمية وكانت نتائجها ضمن حدود المواصفات.



جدول 10. نتائج اختبار مارشال لعينات الخلطة التصميمية

Computation of properties of Asphalt mixtures :																										
(5) - Marshal Method Test												Date: 07.MAY.2025														
SG of aag & asphalt												No. of compaction Blows = 75														
no	% AC by Wt of		Wet of spec.				V. of sp.	specific gravity		FAC.	1.03	VMA	VFB	Stability				Flow								
	Agg	Mix	thickness	in air	in water	SSD		cm3	Bulk					Gmb	GMM	pa%	%		%	kn	kg	mess.	correl.	corrected	kg	mm
1	3.5	3.38	6.6	1188.4	694.2	1198	503.8	2.359	2.535	6.9	13.6	49.1	550	2310.0	1.04	2402	2.6									
2			6	1188.8	692	1197	505	2.354		7.1	13.8	48.4	320	1344.0	1.04	1398	3.2									
3			6	1188.2	691.2	1198.5	507.3	2.342		7.6	14.2	46.7	380	1596.0	1.04	1660	3.0									
AV								2.352		7.2	13.9	48.1		1750.0		1820	2.9									
4	4.0	3.84		1193.4	698.2	1200.1	501.9	2.378	2.517	5.5	13.4	58.6	332	1394.4	1.04	1450	2.9									
5				1193.2	697.5	1199.5	502	2.377		5.6	14.4	61.4	250	1050.0	1.04	1092	2.6									
6				1192.8	698.1	1198.7	500.6	2.383		5.3	13.2	59.5	250	1050.0	1.04	1092	2.4									
AV								2.379		5.5	13.7	59.8		1164.8		1211	2.6									
7	4.5	4.30		1197.2	704	1204.2	500.2	2.393	2.500	4.3	13.2	67.8	245	1029.0	1.04	1070	2.7									
8				1198.1	706.4	1203.4	497	2.411		3.6	13.6	73.8	300	1260.0	1.04	1310	2.6									
9				1197.4	703.6	1203.4	499.8	2.396		4.2	13.1	68.3	240	1008.0	1.04	1048	2.5									
AV								2.400		4.0	13.3	69.9		1099.0		1143	2.6									
10	5.0	4.75		1209.8	713.2	1211.2	498	2.429	2.483	2.2	12.3	82.4	250	1050.0	1.04	1092	2.6									
11				1211.3	716.2	1216.8	500.6	2.420		2.6	13.7	81.4	235	987.0	1.04	1026	2.4									
12				1210.4	715	1211.6	496.6	2.437		1.8	12.0	84.7	255	1071.0	1.04	1114	2.3									
AV								2.429		2.2	12.7	82.8		1036.0		1077	2.4									
13	5.5	5.20		1216.9	718.5	1217.6	499.1	2.438	2.467	1.2	12.4	90.7	235	987.0	1.04	1026	2.3									
14				1218.2	715.6	1219	503.4	2.420		1.9	14.1	86.5	230	966.0	1.04	1005	2.3									
15				1217.6	717.6	1218.9	501.3	2.429		1.5	12.7	88.0	230	966.0	1.04	1005	2.5									
AV								2.429		1.5	13.1	88.4		973.0		1012	2.4									



شكل 1. العلاقات بين نسب البيتومين وخواص الخلطات



3) ملخص معادلة الخلطة التصميمية:

جدول 11. ملخص الخواص الحجمية للخلطة ونسبة البيتومين المثلى

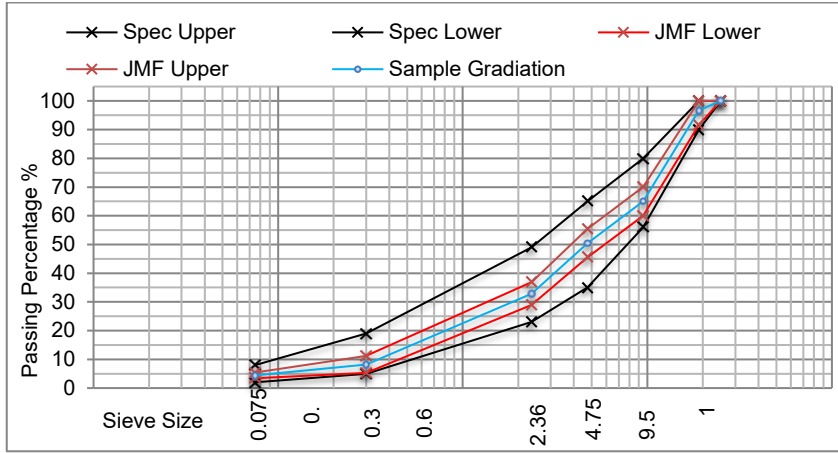
الخاصية	الوحدة	القيمة	حدود المواصفات
الكثافة الكلية (Gmb)	g/cm ³	2.385	-
نسبة الفراغات الهوائية (Pa)	%	4.0	3 - 5
الفراغات في الركام (VMA)	%	13.25	>13
الفراغات المملوءة بالبيتومين (VFB)	%	68.0	65 - 75
الاستقرار	kg	1100	> 1000
التدفق	mm	2.54	2 - 4
محتوى البيتومين كنسبة من الركام		4.20	0.3± (3.9 - 4.5)
محتوى البيتومين كنسبة من الخليط		4.02	0.3± (3.72 - 4.32)
نسبة الغبار	%	1.26	0.8 - 1.6

جدول 12. نتائج التحليل المنخلي للخلطة التصميمية (JMF)

Specification Limit %		JOB MIX FORMULA		JMF Tolerance	Combined Grading	Sieve No.
100	100	100	100	± 5	100	25
90	100	91.7	100	± 5	96.7	19
56	80	60	70	± 5	65	9.5
35	65	55.5	45.5	± 5	50.5	4.75
23	49	36.9	28.9	± 4	32.9	2.36
5	19	5.2	11.2	± 3	8.2	0.3
2	8	3.4	5.4	1±	4.4	0.075

جدول 13. يوضح نسب الركام المستخدم في الخليط

مقاس الركام	25 - 18	18 - 12	12 - 5	5 - 0	Filler
النسبة في الخليط (%)	10	19	19	47	5



شكل 2. يوضح تدرج الخلطة التصميمية (JMF) داخل حدود السماحية والمواصفات

(4) اختبارات الخلطة التجريبية:

بعد الانتهاء من تحديد نسبة البيتومين المثلى ونسب الركام في الخليط، تم أخذ عينة من الخلطة المركزية وإجراء اختبارات استخلاص البيتومين والتدرج الحبيبي للمواد المستخلصة وكذلك اختبار مارشال للثبات والانسياب للتحقق من مطابقتها للمعايير التصميمية للخلطة المرجعية وكانت نتائج الاختبارات كالتالي:

(أ) اختبار استخلاص البيتومين والتدرج الحبيبي للمواد المستخلصة:

الجدول (14) يوضح نتائج اختبار استخلاص البيتومين للخلطة التجريبية، حيث تم إجراء الاختبار وفقاً للمواصفة القياسية AASHTO T164-01 حيث كانت نسبة البيتومين داخل حدود السماحية للخلطة المرجعية.

جدول 14. نتائج اختبار الاستخلاص

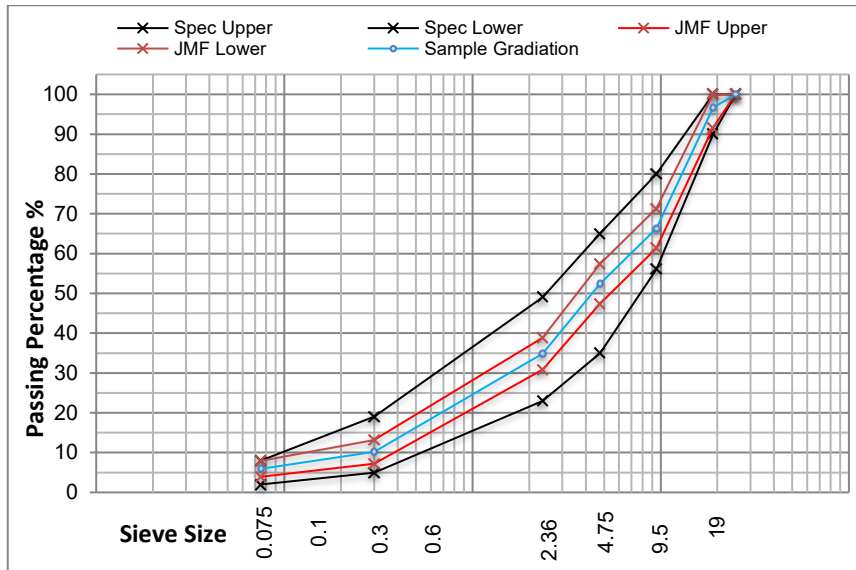
1732.3	وزن العينة قبل الاختبار (جم)
25.91	وزن الفلتر قبل الاختبار (جم)
27.6	وزن الفلتر بعد الاختبار (جم)
1660.9	وزن العينة بعد الاختبار (جم)
1.69	وزن المواد المحجوزة على الفلتر (جم)
69.71	وزن البيتومين (جم)
1662.59	وزن العينة والمواد المتبقية على الفلتر بعد الاختبار (جم)
4.1	محتوى البيتومين كنسبة من الركام (%)
4.02	محتوى البيتومين كنسبة من الخليط (%)



جدول 15. نتائج التدرج الحبيبي لعينة الاختبار

Specification		JOB MIX		JMF		Combined Grading	Sieve No.
Passing %		FORMULA		Tolerance			
100	100	100	100	± 5		100	25
90	100	91.7	100	± 5		96.7	19
56	80	61.3	71.3	± 5		66.3	9.5
35	65	47.4	57.4	± 5		52.4	4.75
23	49	30.9	38.9	± 4		34.9	2.36
5	19	7.2	13.2	± 3		10.2	0.3
2	8	4.9	6.9	± 1		5.9	0.075

الشكل (3) يوضح منحني التدرج الحبيبي لعينة الاختبار وكان المنحنى داخل حدود المواصفات وداخل حدود السماحية للخلطة التصميمية (JMF).



شكل 3. منحني التدرج الحبيبي لعينة الاختبار

(ب) اختبار مارشال:

يوضح الجدول (16) نتائج اختبار مارشال على العينة التجريبية وكانت النتائج ضمن حدود المواصفات.



جدول 16. يوضح نتائج اختبار مارشال للخلطة التجريبية

Computation of properties of Asphalt Mixtures:

Marshall Method Test								Gsb	2.640	FAC.			DaTE: 01.July.2025					
SG of aag & asphalt								Gse	2.671	4.2	1.03	No. of Compaction Blows = 75						
No	% B.C by Wt of		Thickness	Wt of spec. (gm)			V. of sp.	specific gravity		Air Voi.	VMA	VFB	Stability				Flow mm	
								Bulk	Max.				Dailing kn	mass. kg	corret. ratio	corected kg		
	Agg	Mix	thickness	in air	in water	SSD	cm3	Gmb	Gmm	pa%	%	%						
1	4.20	4.02	6.3	1201.2	707.1	1206.3	499.2	2.406	2.503	3.9	12.7	69.4	460	1932.0	1.04	2009	2.6	
2			6	1202.6	704.6	1208.41	503.81	2.387		4.6	13.4	65.2	370	1554.0	1.04	1616	3.2	
3			6	1206.5	706.6	1212.3	505.7	2.386		4.7	13.4	65.0	324	1360.8	1.04	1415	3.0	
Ave								2.393		4.4	13.1	66.5		1615.6		1680	2.9	

5. الخلاصة والتوصيات

1.5. الخلاصة

تُسلط نتائج هذا البحث الضوء على أهمية تصميم الخلطات الإسفلتية الساخنة وفق منهجية علمية مدروسة، وذلك لضمان تحقيق الأداء الأمثل للخلطة الاسفلتية الساخنة تحت ظروف الخدمة المختلفة، مع التركيز على دراسة تأثير النسب المختلفة للبيتومين على خواص الخلطة الاسفلتية الساخنة، ومن خلال التجارب المعملية التي أجريت ومن خلال تحليل النتائج يمكن تلخيص النقاط التالية:

- أظهرت نتائج الاختبارات التي أجريت على الركام والبيتومين المستخدمين أنهما يتمتعان بخواص جيدة تتوافق مع المواصفات المعمول بها في هذا المجال.
- أظهرت نتائج التجارب التي أجريت على عينات الخلطة الاسفلتية أن نسبة البيتومين لها تأثير مباشر على خصائص الخلطة الإسفلتية، حيث أن تغيير النسبة يؤدي إلى تغيير الخصائص للخلطة.
- من خلال تحليل نتائج اختبارات مارشال (الثبات، التدفق، الفراغات الهوائية VA، الفراغات في الركام المعدني VMA، ونسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين VFB، تم تحديد نسبة البيتومين المثلى التي تحقق الخصائص المطلوبة.

- بلغت نسبة البيتومين المثلى 4.2% من المجموع الكلي للركام (By Aggregates)، وكانت الخواص التي تحققها هذه النسبة مقبولة حيث كانت نسبة الفراغات الهوائية بين 3% و5%، وقيمة الاستقرار أعلى من 1000 كجم أما التدفق فكان بين 2 و4 مم كما أعطت نسبة البيتومين المثلى نسبة أعلى من 65% للفراغات المملوءة بالبيتومين في حين كانت نسبة الفراغات في الركام أعلى من 13%.
- تم التأكد من صحة التصميم واختيار نسب الخلط للبيتومين والركام بجميع تدرجاته من خلال عمل خلطة تجريبية في الخلطة المركزية وأخذ عينة منها وإجراء اختبار استخلاص البيتومين والتحليل المنخلي للركام المستخدم، كما تم إجراء اختبار مارشال للثبات وكانت النتائج جميعها متوافقة مع حدود المواصفات المستخدمة للخلطة التصميمية، مما يعزز دقة الطريقة المستخدمة وكفاءة التصميم.

2.5. التوصيات

مما سبق ذكره ومن خلال التجارب العملية والنتائج المتحصل عليها من هذه الدراسة توصلنا إلى بعض التوصيات التالية:

- اختبار أنواع مختلفة من الركام: يُوصى مستقبلاً بدراسة تأثير استخدام أنواع مختلفة من الركام (من مصادر أو خصائص فيزيائية مختلفة) على أداء الخلطات الإسفلتية، من أجل التوصل إلى خلطات ذات كفاءة أعلى أو تكاليف أقل في ظل ظروف خدمة متنوعة.
- استخدام طرق تصميم بديلة: يُنصح بتجربة طرق تصميم بديلة للخلطات الإسفلتية مثل طريقة سوبر بيف (Superpave) بهدف مقارنة الأداء وتحديد الأنسب للبيئة المحلية وظروف المرور.
- إدخال مواد مضافة أو بديلة: يُستحسن دراسة تأثير إضافة مواد محسنة مثل البوليمرات أو استخدام مواد معاد تدويرها في الخلطة الإسفلتية، لما لها من أثر محتمل في تحسين الأداء البيئي والاقتصادي.

المراجع

أولاً: المراجع باللغة العربية

- أبو راوي، بشير معمر (2023). دراسة تأثير مستويات الدمك على الخواص الحجمية والميكانيكية للخلطات الإسفلتية. *المجلة الأكاديمية للعلوم الأساسية والتطبيقية*، 2، 168-174.
- البحقيري، محمد (2014). *مقدمة في الرصف الإسفلتي*. مكتبة نور



نايل، إسماعيل قودان علي (2021). دراسة تأثير أنواع مختلفة من البودرة على خواص مارشال للخلطات الإسفلتية الساخنة. المؤتمر الوطني الثامن لمواد البناء، بني وليد، ليبيا.

ثانياً: المراجع باللغة الإنجليزية

- AASHTO T 84 (2013). *Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC.
- AASHTO T 85 (2022). *Standard method of test for specific gravity and absorption of coarse aggregate*. AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC.
- AASHTO T112 (2023). *Standard Method of Test for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregate*. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC.
- AASHTO T176 (2008). *Standard Method of Test for Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test*. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC.
- AASHTO T53 (2022). *Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC.
- AASHTO T96 (2002). *Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC.
- Arshad, A. K., Abd Karim, Z., Shaffie, E., Hashim, W., & Abd Rahman, Z. (2017, November). Marshall properties and rutting resistance of hot mix asphalt with variable reclaimed asphalt pavement (RAP) content. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271(1), 012078. IOP Publishing.
- Asphalt Institute (2014). *MS-2: Asphalt Mix Design*, 7th ed. Lexington, Kentucky.
- ASTM D113 (2023). *Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials*. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, Philadelphia, PA.
- ASTM D1559 (1998). *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- ASTM D2726 (2011). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures*. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- ASTM D3515 (2001). *Standard specification for hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures*. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.



- ASTM D4791 (2011). *Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in Coarse Aggregate*. The American Society of the International Association for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- ASTM D5 (2013). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA.
- ASTM D70 (2018). *Standard test method for density of semi-solid asphalt binder (pycnometer method)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- BS 812 (1975). *Part 3 Methods for Sampling and Testing of mineral Aggregates, sands and Fillers*. British Standards Institution.
- Kandhal, P. S., Lynn, C. Y., & Parker, F. (1988). *Tests for plastic fines in aggregates related to stripping in asphalt paving mixtures*. NCAT Report No. 98-3, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Alabama.
- Lambebo, B. A. (2020). Mix Design for Wearing Course of Flexible Road Pavement by Marshall Method. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(2), 793-798.
- Le, V. P., Bui, M. P., Nguyen, Q. P., Vo, H. L., & Du Nguyen, V. (2024). Marshall and Balanced mix design in determining the asphalt content for hot mix asphalt mixture: A comparative study. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03753.