Using of Lime-Treated Recycled Concrete Aggregates (RCA) in the Design of Hot Mix Asphalt HMA

Samira Wafeek Abbas *
Dr. Bassam Assad Sultan **
Dr. Rami Hanna ***

(Received 30 / 4 / 2025. Accepted 8 / 9 / 2025)

□ ABSTRACT □

The use of recycled concrete aggregates (RCA) in hot asphalt mixtures is one of the modern applications for these aggregates. Researches have shown that treating these aggregates with different techniques can significantly improve the performance of asphalt mixtures because it effects on the attached mortar layer, which is the main reason for decreased quality of the aggregates.

This research aims to study the performance of hot asphalt mixtures designed from recycled concrete aggregates (RCA) treated with 3% quick lime, with replacement ratios 0-25-50-75-100% of the nature coarse aggregate by untreated and treated RCAs .

The results of the research indicated that lime helped to improve the physical and mechanical properties of the recycled aggregates up to 50% , Marshall density of the mixtures was improved by 3% , also stability increased by 6-26% , while the optimum bitumen content required for the mixtures decreased up to 9% , which greatly enhances the possibility of using these aggregates in asphalt paving works.

Keywords : recycled concrete aggregates (RCA) - hot mix asphalt – quick lime – marshall method for hot mix asphalt.

Copyright **:**Latakia University journal (Formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Postgraduate Student (Doctorate), Department of Transport, Faculty of Civil Engineering, Lattakia University (Formerly Tishreen), Lattakia , Syria . E-mail: samiraabbas945@gmail.com.**
** **Professor, Department of Transport, Faculty of Civil Engineering, Lattakia University (Formerly Tishreen), Lattakia, Syria.**
*** **Associate Professor, Department of Transport, Faculty of Civil Engineering, Lattakia University (Formerly Tishreen), Lattakia , Syria.**

استخدام الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA المعالجة بالكلس في تصميم الخلائط الإسفلتية الحارة

سميرة وفيق عباس*

د. بسام أسعد سلطان**

د. رامي ميخائيل حنا***

(تاريخ الإيداع 30 / 4 / 2025. قُبِل للنشر في 8/ 9 / 2025)

□ ملخّص □

إن استخدام الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA في الخلائط الإسفلتية الحارة هو أحد مجالات التطبيق الحديثة لهذه الحصويات، وقد بينت الأبحاث أن معالجة هذه الحصويات بتقنيات مختلفة يمكن أن يحسن من أداء الخلائط الإسفلتية بشكل كبير كونها سوف تستهدف طبقة المونة الملتصقة التي تعتبر السبب الرئيسي في انخفاض جودة الحصويات .

يهدف هذا البحث إلى دراسة وتوصيف أداء الخلائط الإسفلتية الحارة المصممة باستخدام الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA المعالجة بـ 3% كلس حي ، وذلك عند نسب استبدال للحصويات الطبيعية الخشنة 0–25–50–75–100% بأخرى معاد تدويرها قبل المعالجة بالكلس الحي وبعدها .

أشارت نتائج البحث أن الكلس الحي ساعد على تحسن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للحصويات المعاد تدويرها بنسبة تصل لـ 50% كما تحسنت كثافة مارشال للخلائط 3% وتزايد الثبات بنسبة 6–26% ، في حين انخفض محتوى البيتومين الأمثل المطلوب للخلائط بنسبة تصل لـ 9% ، مما يعزز من إمكانية استخدام هذه الحصويات بشكل كبير في أعمال الرصف الإسفلتي .

الكلمات المفتاحية: الحصويات البيتونية المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA – الخلائط الإسفلتية الحارة HMA – الكلس الحي – تصميم الخلائط الإسفلتية الحارة بطريقة مارشال.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* **طالبة دكتوراه – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) – اللاذقية – سورية.**

E-mail: samiraabbas945@gmail.com

** **أستاذ – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– اللاذقية – سورية.**

*** **أستاذ مساعد – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) – اللاذقية – سورية.**

مقدمة:

تعتبر الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون (RCA) Recycled Concrete Aggregates بديلاً جيداً ومتوافقاً عليه للحصويات الطبيعية في إنتاج الخلائط الإسفلتية الحارة على الرغم من النتائج المتفاوتة التي حققها الباحثون في هذا المجال، ولكن كان هناك إجماع على أن استخدامها بنسب لاتزيد عن 50% قد يحقق خلائط إسفلتية بأداء جيد ويوازي تصميم الخلائط الطبيعية، في حين كانت أي زيادة في نسب الاستبدال لهذه الحصويات عن هذه النسبة سوف يؤدي إلى انخفاض مؤشرات الأداء وتزايد محتوى البيتومين الأمثل للخلائط. [1,2,3]

انطلاقاً من متطلبات البحث عن خطط ومواد مستدامة بهدف تحسين التأثير البيئي لقطاع النفل، ومن أجل تحقيق متطلبات الاستخدام لمواد الخلائط الإسفلتية فقد تم تطوير تقنيات معالجة عديدة للحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون بهدف تحسين مواصفاتها وخصائصها الميكانيكية من أجل توسيع وزيادة مجالات ونسب استخدامها في الرصف الإسفلتي، إذ أشارت نتائج الأبحاث في هذا المجال إلى أن المعالجة أدت إلى تحسن واضح في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لهذه الحصويات مما يحسن من جودة الخلائط الإسفلتية المصنعة منها. [3,4,5,6]

تم تقسيم تقنيات المعالجة حسب آلية التأثير إلى قسمين هما تقنيات إزالة المونة الملتصقة بالحصويات البيتونية باستخدام الأحماض أو الطرق الميكانيكية والحرارية وتقنيات تعزيز متانة هذه المونة باستخدام مواد معالجة عديده دون الحاجة لإزالة هذه المونة.

ساعدت المعالجة الحمضية إلى تحسن الكثافة وتخفيض الامتصاصية بنسب تتراوح (8−12%)، إلا أن هذه المعالجة تخلق مشاكل بيئية أخرى ولا تلائم معالجة الكميات الكبيرة بالإضافة إلى تكلفتها العالية،[4,5,6,7] كما ساهمت المعالجة بالبوليميرات في تحسن خصائص الأداء بمعدل (28%)، بينما ساعدت أحدث تقنيات المعالجة وهي تقنية الكربنة (Co_2 curing) والترسيب الحيوي (calcium carbonite biodeposition) بتحسن الكثافة بنسبة تصل لـ 23% وتخفيض نسبة امتصاص الماء بمعدل حوالي 28%، هذا التحسن في الخواص الفيزيائية للحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA مما سوف يؤدي بدوره إلى تحسن خصائص الأداء للخلائط المكونة منها . [4,6,7]

في ظل المشكلات المرتبطة بالمواد المستخدمة من حيث تكاليفها و آثارها البيئية والتقنيات المرتبطة بها، أصبح البحث عن مواد أخرى ذات تكلفة بسيطة ولا تتطلب تقنيات خاصة في التطبيق أمراً أساسياً، لذا تم استخدام المواد البوزولانية كالكلس الحي والاسمنت و الرماد المتطاير في المعالجة السطحية لهذه الحصويات حيث تعمل هذه المواد على تحفيز التفاعلات الداخلية بين المواد المضافة ومكونات المونة الاسمنتية من أجل تكوين مركبات صلبة تملأ النسيج المسامي للحصويات مما يقلل من البنية المسامية السطحية وامتصاص الماء وتعزيز الكثافة الصلبة، ينعكس هذا التحسن بدوره على خصائص وحجوم الخلائط الإسفلتية المكونة منها. [8]

قام Bhupendra Singh a, Deepak Prasad, Raj Ranjan Kant عام 2021 بدراسة تأثير الكلس كمادة مالئة بنسبة 2% في الخلائط الاسفلتية المصنعة باستخدام الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون حيث ساعد الكلس على زيادة ثبات مارشال للخلائط المعالجة بمعدل 5% و تحسن نسبة الشد الغير مباشر TSR للخلائط المعالجة بنسبة 15.5% ،كما تحسن نسبة الفاقد بالثبات IRS بمعدل 9.9% . [9]

قام الباحثون Bedour J. Abass & Amjad H. Albayati في جامعة بغداد عام 2020 بالبحث في تأثير معالجة الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون بالكلس المطفأ بمعدل 1.5% على أداء الخلائط الاسفلتية الدافئة، حيث قاموا بتحضير خلائط اسفلتية دافئة وفق طريقة مارشال باستخدام حصويات معاد تدويرها RCA بنسب الاستبدال

100%-75-50-25-0، أشارت نتائج البحث إلى أن المعالجة ساعدت على تحسن ثبات مارشال للخلائط المعالجة حوالي12% مقارنة مع الخلائط غير المعالجة، وتقليل محتوى البيتومين الأمثل المطلوب للخلائط المعالجة حوالي5%، بالإضافة إلى تحسن نسبة الشد غير المباشر TSR للخلائط المعالجة حوالي 10%. [10,11]

في اسبانيا أجريت دراسة عام 2014 قام بها Ignacio Pérez Pérez, Ana Mª Rodríguez Pasandín بهدف تحديد تأثير الكلس على خاصية التلاحم بين البيتومين والحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون حيث تم استخدام الكلس بثلاث طرق وهي اضافته كمادة مالئة بنسبة % 1 من الوزن الجاف للحصويات و 1% من الوزن الجاف للحصويات الرطبة، و إضافة ملاط الكلس بنسبة 1% من الوزن الجاف للحصويات، وأشارت النتائج إلى الكلس الحي كمادة مالئة حقق نسبة تلاحم % 75 – 65 وتعتبر هذه الخلائط الإسفلتية خلائط مستدامة بيئياً واقتصادياً وفنيًا .[12,13]

يعتمد هذا البحث على استخدام الكلس الحي في المعالجة السطحية للحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون المشبعة بالماء ثم خلطها مع الكلس الحي، حيث يعتبر الكلس الحي من المواد الجيدة بسبب وفرته وانخفاض تكلفته ولا يتطلب معدات خاصة كما أنه يتفاعل مع مكونات المونة الاسمنتية الملتصقة بالحصويات بشكل فعال، مما ينعكس بشكل مباشر على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخلائط الإسفلتية.[14]

أهمية البحث وأهدافه:

2) مشكلة البحث :

- انخفاض خصائص أداء الخلائط الإسفلتية مع تزايد نسب الحصويات المعاد تدويرها RCA غير المعالجة الحاوية عليها.
- التخوف من استخدام الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA في الخلائط الإسفلتية بنسب تزيد عن 50% بسبب ضعف خصائصها الفيزيائية والميكانيكية مقارنة مع الحصويات الطبيعية.
- تفاوت النتائج المخبرية للدراسات العديدة التي أجريت سابقاً لبيان أداء الخلائط الإسفلتية الحاوية على الحصويات البيتونية المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون، بسبب تفاوت خصائص طبقة المونة الإسمنتية الملتصقة بالحصويات والتي بدورها تتعلق بشكل مباشر بخصائص البيتون المستخلصة منه.
- بالرغم من تعدد تقنيات ومواد المعالجة فإن بعض هذه الطرق يتطلب تقنيات خاصة ومتطورة جداً والذي بدوره يتطلب تكاليف إضافية، والبعض الآخر قد يعتبر حلاً غير مرغوب بسبب آثاره البيئية وعدم ملائمته لمتطلبات استمرارية الإنتاج .

3) أهداف البحث:

- البحث عن طرق لتحسين أداء الخلائط الإسفلتية الحارة الحاوية على الحصويات البيتونية المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA، عبر معالجة هذه الحصويات بشكل مسبق قبل استخدامها في إنتاج الخلائط الإسفلتية .
- يهدف هذا البحث إلى استخدام طرق جديدة لمعالجة الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA وتحسين خصائصها باستخدام مواد ذات تكلفة منخفضة ومتوافرة وهي الكلس الحي وبطريقة بسيطة و ملائمة .
- دراسة إمكانية إنتاج خلائط إسفلتية حارة بنسب استبدال عالية من الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA المعالجة و بأداء محسن وذات ديمومة عالية خلال عمر الطريق .

4) أهمية البحث

تأتي أهمية البحث من مساهمته في تأمين مواد حصوية بديلة جزئياً او كلياً عن الحصويات الطبيعية، وتكون بجودة توازي جودة الحصويات الطبيعية، وذلك عن طريق استخدام الكلس الحي كمادة معالجة وبطرق بسيطة، بما يخدم متطلبات التنمية المستدامة في قطاع النقل الذي يعتبر القطاع الأعلى استهلاكا للحصويات، بسبب الطلب المتزايد على التوسع الطرقي ومتطلبات الصيانة المتكررة مع تزايد وتغير متطلبات الحركة المرورية.

4) مواد البحث

– الحصويات البيتونية المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون (RCA (recycled concrete aggregates : تم تجميع نفايات البيتون وهي من عدة مصادر من ناتج هدم مبان بيتونية في عدة مناطق في محافظة اللاذقية انهارت بسبب زلزال شباط 2023 ، حيث تم استبعاد نفايات الهدم الأخرى كالخفان والسيراميك بسبب سوء خصائصها .

– الحصويات الطبيعية : وهي الحصويات الكلسية المستخدمة في إنتاج الخلائط الإسفلتية في سوريا ومصدرها مقالع حسياء وتم الحصول عليها من مجابل مؤسسة تنفيذ الانشاءات العسكرية باللاذقية .

– الكلس الحي : تم الحصول على الكلس الحي البودرة من معمل حماه .

– البيتومين: إن البيتومين المستخدم لتحضير الخلائط الإسفلتية هو بيتومين (70–60) وتم إحضاره من مصفاه بانياس .

5) منهجية العمل المخبري :

استند البحث على الدراسة المخبرية التي أجريت على عينات من الخلائط الإسفلتية الحارة المصممة وفق طريقة مارشال، باستخدام كلاً من الحصويات الطبيعية والحصويات المعاد تدويرها RCA قبل المعالجة بالكلس وبعدها، من أجل تحديد خصائصها الفيزيائية والميكانيكية ودراسة تأثير المعالجة على هذه الخصائص، أما تسلسل الأعمال فقد كان وفق مايلي:

1) تم تجهيز الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA عبر طحن نفايات البيتون باستخدام الكسارة الأوتوماتيكية الموجودة في مخابر كلية الهندسة المدنية بجامعة اللاذقية وضبط فكي الكسارة من أجل إنتاج حصويات بقطر أعظمي للحصويات 19mm الموافق للتراكيب الحبية المعتمدة للخلائط الإسفلتية كثيفة التدرج من أجل طبقة الإهتراء. يوضح الشكل رقم (1) الكسارة المستخدمة لتحقيق التدرج المطلوب ونفايات البيتون التي تم جمعها .

الشكل رقم(1) يبين نفايات البيتون التي تم جمعها والكسارة الأتوماتيكية المستخدمة لإنتاج التدرج الحبي

2) بعد الحصول على الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون قمنا بفصل التدرجات الحبية الخشنة عن التدرجات الحبية الناعمة، حيث أن المعالجة سوف تكون للتدرجات الحصوية الخشنة ذات القطر الأكبر من 4.75mm

3) توصيف الحصويات المستخدمة في البحث :

تم إجراء سلسلة من التجارب المخبرية على عينة الحصويات الطبيعية NA و الحصويات المعاد تدويرها RCA قبل المعالجة وهي : الوزن النوعي وامتصاص الماء ولوس أنجلوس وعامل الشكل والتحقق من تلبيتها لمتطلبات الأداء وفق مواصفات ASTM .

4) توصيف البيتومين المستخدم في الدراسة ، حيث تم إجراء تجارب الغرز – الاستطالة – الكرة والحلقة –الفاقد بالتسخين – نقطة الوميض والإشتعال – اللزوجة ، وذلك للتأكد من مطابقته للمواصفات الفنية المطلوبة.

5) تم تصميم الخلائط الإسفلتية الحارة وفق طريقة مارشال لتصميم واختبار الخلائط الإسفلتية وفق المواصفة ASTM D1559، حيث كانت نسب الاستبدال بالحصويات المعاد تدويرها الخشنة قبل المعالجة هي %(100-75-50-25-0) ونسب البيتومين المضاف تتراوح بين (4.5-7%) وتحديد خصائص الكثافة وتحليل الحجوم – VMA – VA VFBبالإضافة لخصائص الثبات والانسياب وتحديد محتوى البيتومين الأمثل عند كل نسبة استبدال للحصويات الطبيعية الخشنة بأخرى معاد تدويرها.

6) تم معالجة الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA الخشنة وفق الآليه التالية: تم نقع الحصويات بالماء لمدة ساعتين من أجل إشباع الفراغات السطحية للحصويات المعاد تدويرها RCA بهدف تسريع التفاعلات الداخلية بين مكونات المونة والكلس الحي البودرة الذي تمت إضافته للحصويات المشبعة بنسبة 3% من الوزن الجاف لها، علماً أن مدة المعالجة كانت أسبوع حيث تعتبر هذه المدة كافية للحصول على حصويات معاد تدويرها RCA بخصائص فيزيائية وميكانيكية جيدة.[14] ويبين الشكل رقم (2) الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA قبل المعالجة بالكلس الحي و بعدها.

الشكل رقم (2) الحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA قبل المعالجة بالكلس الحي و بعدها

7) تم تحديد خواص الوزن النوعي وامتصاص الماء والاهتراء بعد المعالجة ، ثم دراسة تغير هذه الخصائص عند نسب استبدال الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها بمقدار %(100-75-50-25-0) .

8) تم إعادة تصميم الخلائط الإسفلتية الحارة وفق طريقة مارشال باستخدام الحصويات الطبيعية والمعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون RCA المعالجة، حيث كانت نسب الاستبدال للحصويات المعاد تدويرها الخشنة المعالجة بالكلس الحي %(0-25-50-75-100) ونسب البيتومين المضاف تتراوح بين (4.5-7%)

9) بعد تحضير خلائط مارشال تم تحديد خصائص الكثافة وتحليل الحجوم و الثبات والانسياب ، ثم تحديد محتوى البيتومين الأمثل المطلوب عند كل نسبة استبدال للحصويات المعالجة .

10) تم تقييم النتائج وفقا لمواصفات الـ ASTM .

أولا" : نتائج الدراسة المخبرية لتوصيف المواد المستخدمة في الدراسة :

1) توصيف الحصويات المعاد تدويرها RCA والطبيعية NA :

يبين الجدول رقم (1) نتائج التجارب التوصيفية التي قمنا بإجراءها على الحصويات بنوعيها الطبيعية والمعاد تدويرها لتحيد خصائصها الفيزيائية والميكانيكية وهي : الوزن النوعي – الامتصاصية – الاهتراء – المكافئ الرملي – عامل الشكل .

جدول رقم (1) يبين نتائج التجارب التوصيفية للحصويات الطبيعية NA والمعاد تدويرها RCA قبل وبعد المعالجة

المواصفة		Treated RCA	RCA	حصويات طبيعية NA		
		19 - 4.75	19 - 4.75	≤ 0.075	0.425–4.75	19 - 4.75	قياس الحبيبات mm
ASTM C128	min 1.95	2.684	2.547	2.704	2.646	2.745	Gsa
ASTM C127		2.503	2.320	2.657	2.603	2.695	Gsb
	max 1	2.696	6.7	0.654	0.6	0.66	الامتصاصية
ASTM D4791	Max 10%	11.7	11.4	-	-	9.3	عامل الشكل %
ASTM D2419	Min 50	-	-	-	-	97.78	المكافئ الرملي %
ASTM C131	Max 30	19.7	41.59	-	-	24.1	الاهتراء %

نستنتج من الجدول رقم (1) انخفاض جودة الحصويات المعاد تدويرها مقارنة مع الحصويات الطبيعية بنسبة (7%) وتزايد امتصاص الماء حوالي 9 مرات مقارنة مع الحصويات الطبيعية، كما ارتفع عامل الإهتراء بنسبة 40% وهذا الارتفاع كما ذكرنا سابقا يعود بشكل رئيسي الى وجود طبقة المونة الاسمنتية الضعيفة ذات المسامية والاهتراء الكبيرين، إلا أن معالجة الحصويات باستخدام 3% كلس حي أدى إلى تحسن واضح في الخصائص الفيزيائية لهذه الحصويات بنسبة تصل لـ 6% أما عامل الإهتراء فقد تحسن بنسبة وصلت لـ 50% .

كما يبين الجدول رقم (2) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخليط الحصوي عند كل نسبة استبدال للحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها RCA قبل المعالجة وبعدها .

جدول رقم (2) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخليط الحصوي قبل وبعد المعالجة

Mixture	قبل المعالجة			بعد المعالجة بـ 3% كلس		
	عامل الاهتراء %	امتصاص الماء %	الوزن النوعي	عامل الاهتراء %	امتصاص الماء %	الوزن النوعي
0%CRCA+100%NA	24.1	0.6	2.745	24.1	0.6	2.745
25%CRCA+75%NA	28.5	2.1	2.695	23	1.124	2.730
50%CRCA+50%NA	32.8	3.65	2.646	21.9	1.65	2.715
75%CRCA+25%NA	37.2	5.1	2.596	20.3	2.1	2.7
100%CRCA+0%NA	41.59	6.7	2.547	19.7	2.696	2.684

2) توصيف البيتومين المستخدم في الدراسة :

تم إجراء التجارب التوصيفية على البيتومين المستخدم في الدراسة ومقارنتها مع مواصفات الـ ASTM وكانت نتائج هذه التجارب (التي تعبر عن وسطي ثلاث عينات لكل تجربة) موضحة في الجدول رقم (3) :

جدول رقم (3) يبين نتائج التجارب التوصيفية للبيتومين المستخدم في الدراسة

	الغرز mm	الاستطالة cm	نقطة التميع C	الفاقد بالتسخين %	اللزوجة عند درجة 60C Stc	نقطة الوميض C	نقطة الاشتعال C
بيتومين 60-70	62	>125	50	0.53	3000	245	252
حدود مواصفة الـ ASTM	60 – 70	min 100	49-56	max 1%	-	min 230	
	ASTM-D5	ASTM-D113	ASTM-D2398	ASTM-D6	ASTM D 2170	ASTM D92	ASTM D92

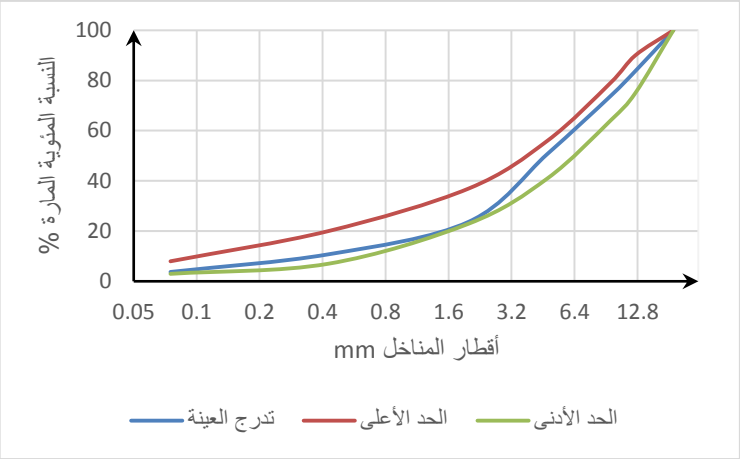
تظهر نتائج التجارب أن البيتومين المستخدم في الدراسة تحقق المتطلبات الفنية والمواصفات المطلوبة لأعمال الطرق الإسفلتية في سوريا لطبقتي الأساس والإهتراء.

ثانياً : تحضير الخلائط الإسفلتية قبل معالجة الحصويات المعاد تدويرها :

إن التدرج الحبي للخليط الحصوي المعتمد لتحضير الخلائط الإسفلتية هو التدرج (ب) لطبقة الاهتراء للطرق ذات الكثافة المرورية العالية بقطر أعظمي للحبيبات 19mm كما هو موضح في الجدول رقم 4 و الشكل رقم (1) .

جدول رقم (4) التدرج الحبي للحصويات

فتحة المنخل mm	المحجوز على المنخل	مئوية متبقية	مئوية تراكمية	المارة	الحزمة حسب المواصفة
	gr	%	%	%	%
19	0	0	0	100	100
12.5	650	16.25	16	84	75-90
9.5	400	10	26	74	64-79
4.75	920	23	49	51	41-56
2	1080	27	76	24	23-37
0.425	520	13	89	11	7-20
0.075	280	7	96	4	3-8
القعر	150	3.75	100		



الشكل رقم (2) التدرج الحبي للخليط الحصوي .

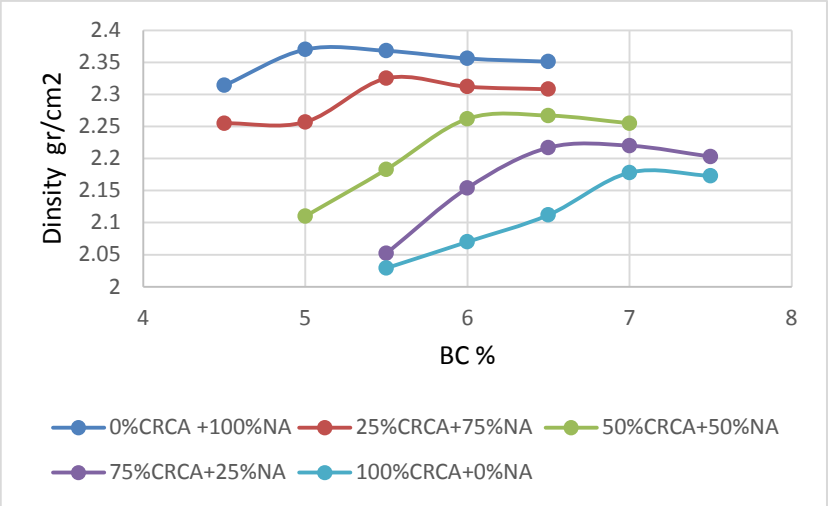
تم تصميم الخلائط الإسفلتية الحارة وفق طريقة مارشال وفق المواصفة ASTM D1559 عند نسب استبدال متغيرة للخليط الحصوي الخشن على مجموعتين :

المجموعة الأولى : قبل معالجة الحصويات المعاد تدويرها RCA الخشنة، حيث تم تصميم الخلائط الإسفلتية عبر استبدال للتدرج الحصوي الخشن الطبيعي بأخر معاد تدويره بنسب 100% 75- 50- 25- 0 وكانت نسب البيتومين المضافة تتراوح بين 4.5-7.5% . تم ترميز هذه المجموعة حسب نسبة الاستبدال الحصوي بـ %CRCA+%NA .

المجموعة الثانية : بعد معالجة الحصويات المعاد تدويرها RCA الخشنة بنسبة 3% من الكلس الحي، حيث تم تصميم الخلائط الإسفلتية عبر استبدال للتدرج الحصوي الخشن الطبيعي بأخر معاد تدويره معالج بالكلس الحي بنسب 100% 75- 50- 25- 0 وكانت نسب البيتومين المضافة تتراوح بين 4.5-7.5% . تم ترميز هذه المجموعة حسب نسبة الاستبدال الحصوي بـ %TreatedCRCA+%NA .

تم تحليل نسب الفراغات الهوائية Va والفراغات في المواد الحصوية VMA والفراغات المملوءة بالبيتومين VFB بالإضافة لقيم كثافة مارشال والثبات والانسياب للخلائط الإسفلتية كافة من أجل تحديد محتوى البيتومين الأمثل المطلوب OBC عند كل نسبة استبدال للخليط الحصوي قبل المعالجة وبعدها، ثم تم رسم المخططات البيانية التي تعبر عن تغير هذه النسب تبعاً لتغير محتوى البيتومين المضاف للخلطة .

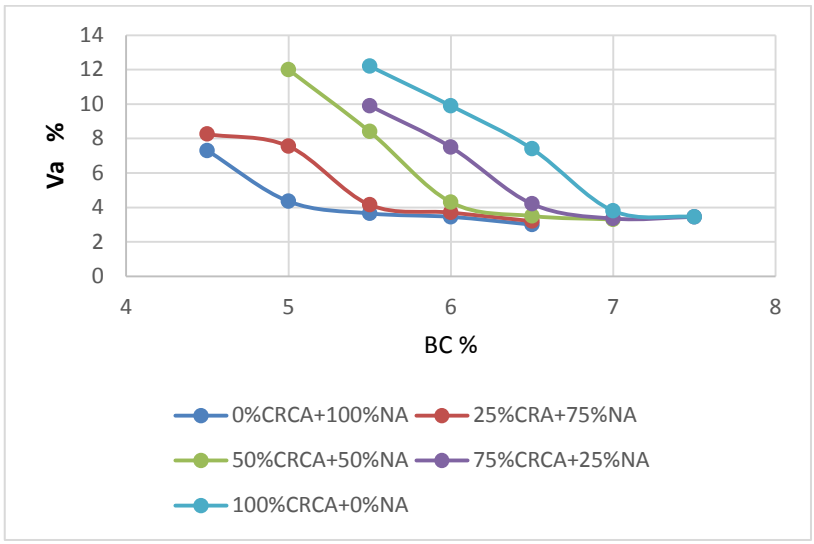
يبين الشكل رقم (3) تغير كثافة مارشال للخلائط الإسفلتية للمجموعة الأولى قبل المعالجة



الشكل رقم (3) تغير كثافة مارشال للخلائط الإسفلتية عند نسب الاستبدال

يلاحظ من الشكل رقم (3) انخفاض كثافة مارشال مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها الخشنة CRCA في الخلطة وهذا يتعلق بانخفاض كثافة الحصويات المعاد تدويرها بالمقارنة مع كثافة الحصويات الطبيعية .

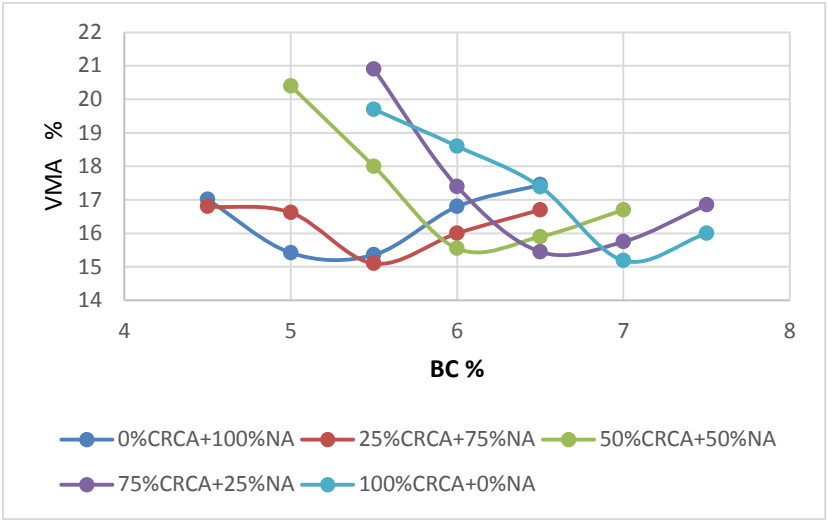
يوضح الشكل رقم (4) تغير نسبة الفراغات الهوائية تبعاً لمحتوى البيتومين المضاف عند كل نسبة استبدال للحصويات الخشنة الطبيعية بأخرى معاد تدويرها غير معالجة .



الشكل رقم (4) تغير نسبة الفراغات الهوائية va للخلائط الإسفلتية عند نسب الاستبدال قبل المعالجة

يبين الشكل رقم (4) تزايد نسبة الفراغات الهوائية Va مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها RCA في الخلطة وهذا يتعلق بارتفاع مسامية الحصويات المعاد تدويرها بالمقارنة مع الحصويات الطبيعية وذلك بسبب طبقة المونة الإسمنتية المحيطة والتي تتميز بمسامية عالية .

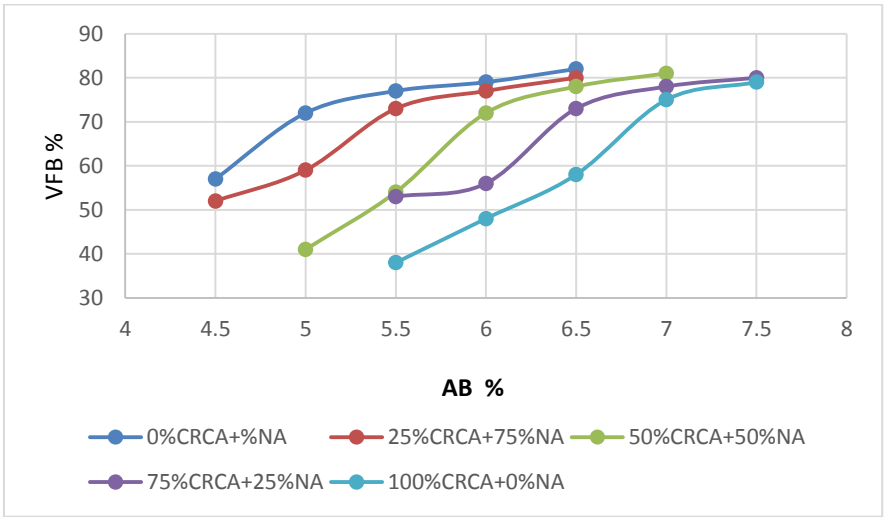
أما الشكل رقم (5) فيبين تغير نسبة الفراغات في المواد الحصوية VMA في الخلائط الإسفلتية مع تغير نسب استبدال الحصويات الطبيعية بأخرى معاد تدويرها غير معالجة .



الشكل رقم (5) تغير نسبة الفراغات في المواد الحصوية VMA في الخلائط الإسفلتية مع تغير نسب استبدال الحصويات قبل المعالجة

إن تزايد نسب الحصويات المعاد تدويرها CRCA في الخلائط الإسفلتية يؤدي إلى تزايد نسبة الفراغات في المواد الحصوية وذلك بسبب البنية المسامية العاليه لهذه الحصويات مقارنة مع الحصويات الطبيعية .

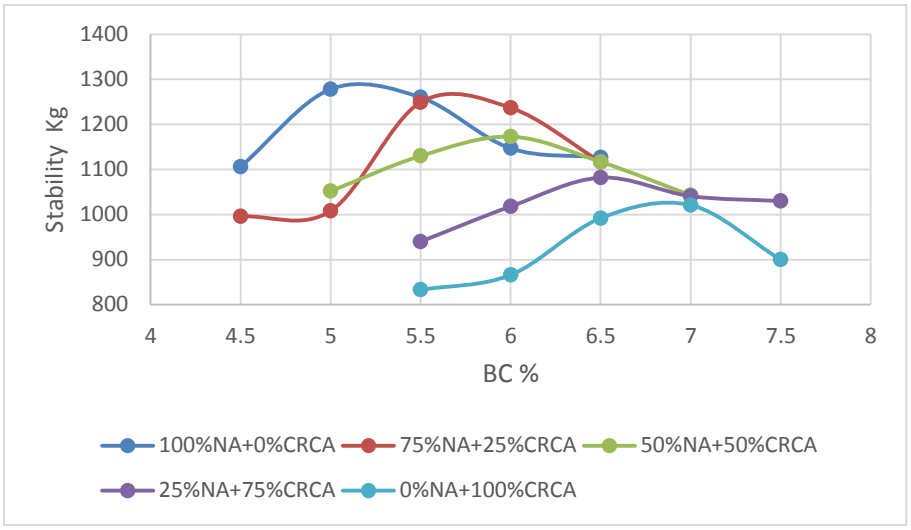
تم تمثيل تغير نسب الفراغات المملوءة بالبيتومين VFB تبعا لمحتوى البيتومين المضاف عند كل نسبة استبدال للحصويات الطبيعية بأخرى معاد تدويرها غير معالجة في الشكل رقم (6) .



الشكل رقم (6) تغير نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين VFB في الخلائط الإسفلتية مع تغير نسب استبدال الحصويات قبل المعالجة

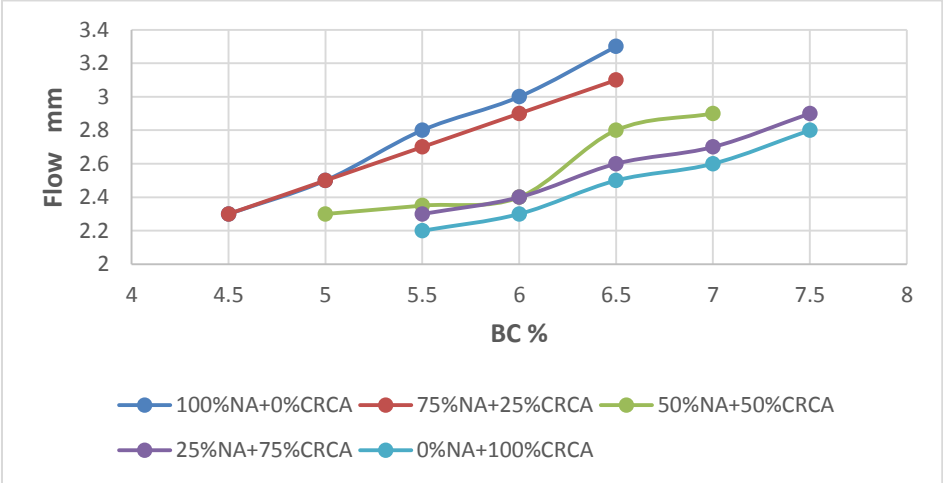
تلاحظ من الشكل رقم (6) تناقص نسب الفراغات المملوءة بالبيتومين مع تزايد نسب الحصويات المعاد تدويرها CRCA في الخلطة، حيث يرتبط ذلك بخواص الامتصاصية العالية لهذه الحصويات بالمقارنة مع الحصويات الطبيعية

يبين الشكل رقم (7) تغير ثبات الخلائط الإسفلتية تبعا لمحتوى البيتومين المضاف للخلطة عند كافة نسب استبدال الحصويات الطبيعية بأخرى معاد تدويرها غير معالجة ، ويظهر من الشكل تناقص ثبات الخلائط مع تزايد نسب الاستبدال الحصوي ، إلا أنها حققت ثباتاً أكبر من 900 KG وهو الثبات المطلوب في المواصفات السورية .



الشكل رقم (7) تغير ثبات الخلائط الإسفلتية مع تغير نسب استبدال الحصويات قبل المعالجة .

أما تغير انسياب الخلائط الإسفلتية عند كافة نسب استبدال الحصويات الطبيعية بأخرى معاد تدويرها RCA قبل المعالجة فهو مبين في الشكل رقم (8) .



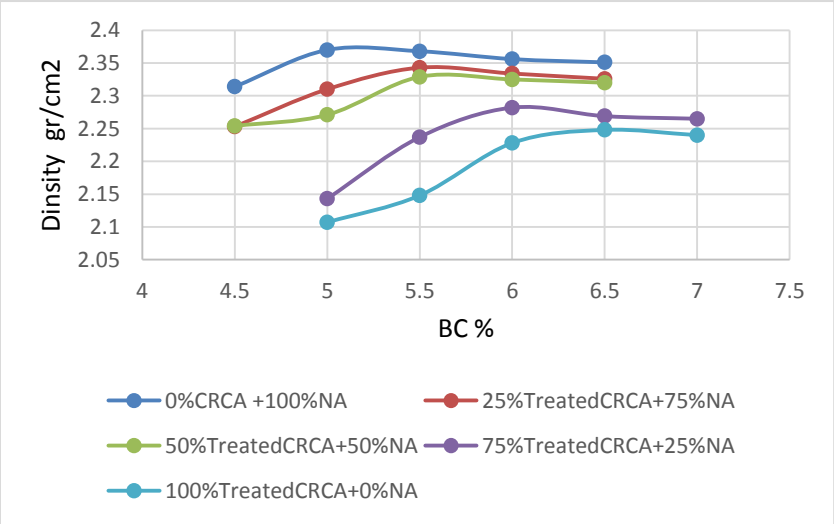
الشكل رقم (8) انسياب الخلائط الإسفلتية عند كل نسبة استبدال حصوي قبل المعالجة

تناقص انسياب الخلائط الإسفلتية مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها RCA في الخلطة وهذا يتعلق بتناقص نسب الفراغات المملوءة بالبيتومين وتناقص محتوى البينومين الفعال مع تزايد نسب الاستبدال .

ثالثاً : تحضير الخلائط الإسفلتية بعد معالجة الحصويات المعاد تدويرها :

تم تصميم خلائط مارشال بعد معالجة الحصويات المعاد تدويرها RCA بالكلس الحي ، وذلك عند نفس نسب الاستبدال الحصوي قبل المعالجة وبنسب بيتومين متغيرة 4.5–7% ، أما نتائج تحليل الفراغات و نتائج الثبات الكثافة للخلائط فهي موضحة بالأشكال التالية .

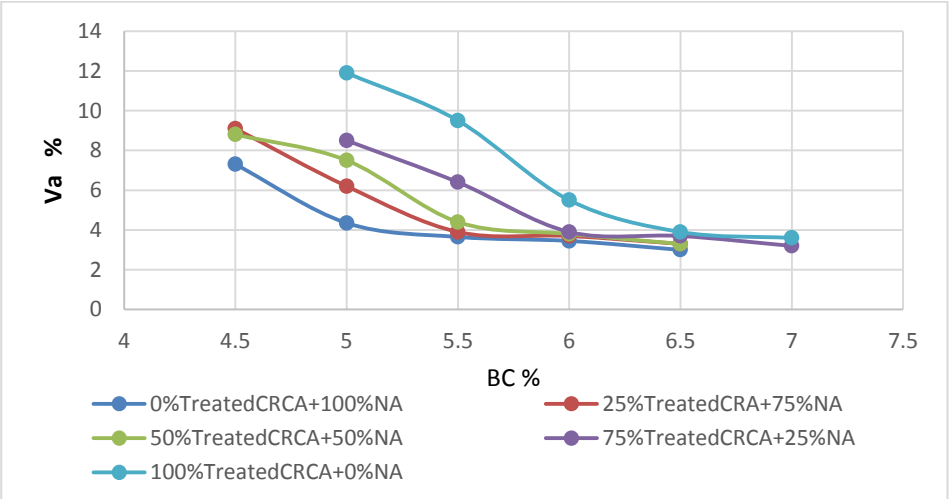
يبين الشكل رقم (9) تغير الكثافة للخلائط الإسفلتية المصممة باستخدام الحصويات المعاد تدويرها المعالجة TreatedRCA.



الشكل رقم (9) تغير الكثافة للخلائط الإسفلتية وفق نسب الحصويات المعاد تدويرها المعالجة

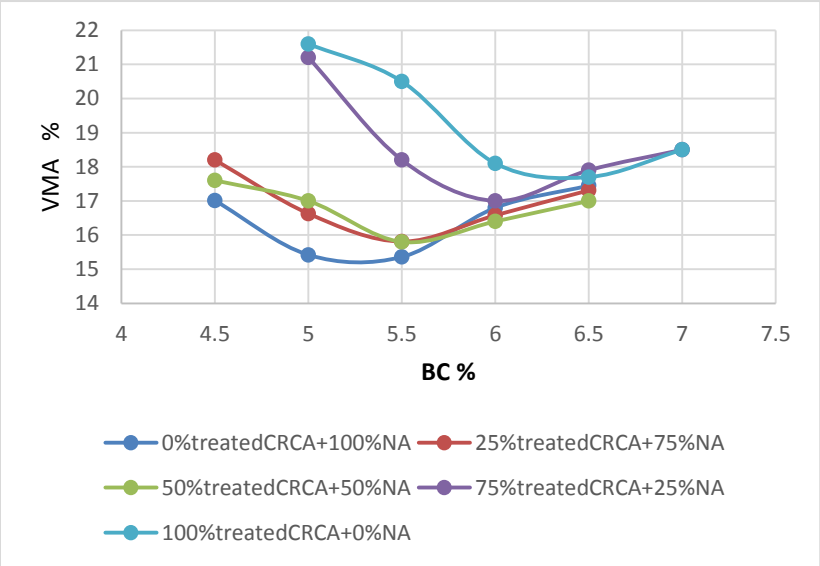
تناقصت كثافة الخلائط الإسفلتية مع تزايد نسب الاستبدال الحصويات الطبيعية بالحصويات المعاد تدويرها المعالجة إلا أن كثافات الخلائط الإسفلتية تحسنت بعد المعالجة بنسبة تصل لـ 3% وهذا التحسن يرتبط بتحسن الكثافة للحصويات المعاد تدويرها بعد المعالجة بالكلس الحي .

أما الشكل رقم (10) فيبين تغير نسبة الفراغات الهوائية Va في الخلائط الإسفلتية عند كل نسب استبدال بعد المعالجة، ويوضح الشكل تزايد نسب الفراغات الهوائية مع تزايد نسب الاستبدال، إلا أن معدل تزايد الفراغات بعد المعالجة كان أقل من معدل تزايدها قبل المعالجة، هذا يعود للتحسن الواضح في الكثافة الصلبة والتوزع المسامي لبنية للحصويات المعاد تدويرها بعد المعالجة .



الشكل رقم (10) تغير نسبة الفراغات الهوائية Va في الخلائط الإسفلتية عند كل نسب استبدال بعد المعالجة

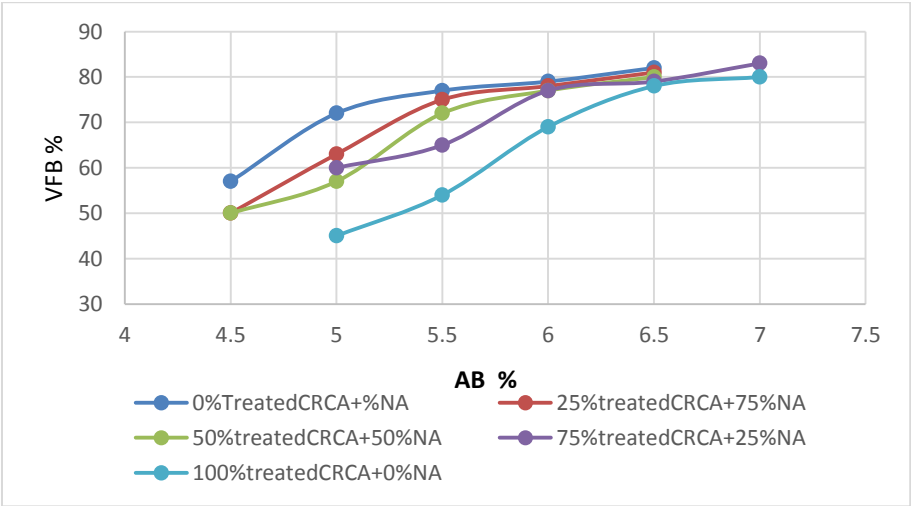
إن نسبة الفراغات في المواد الحصوية VMA في الخلائط الإسفلتية بعد معالجة الحصويات المعاد تدويرها بالكلس الحي موضح بالشكل رقم (11) .



الشكل رقم (11) نسبة الفراغات في المواد الحصوية VMA للخلائط الإسفلتية عند كل نسبة استبدال للحصويات المعاد تدويرها المعالجة

يظهر من الشكل رقم (11) تزايد نسبة الفراغات في المواد الحصوية VMA للخلائط الإسفلتية مع تزايد نسبة الحصويات المعاد تدويرها المعالجة وهذا يرتبط بشكل مباشر بالتحسن بالبنية المسامية الداخلية المكونة والخشونة السطحية للحصويات المعاد تدويرها المعالجة مقارنة مع هذه الحصويات قبل المعالجة.

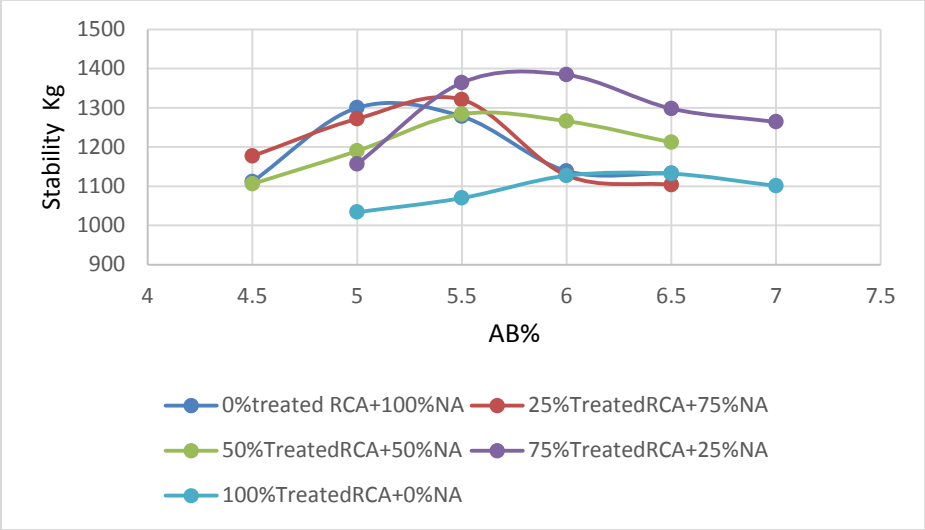
يبين الشكل رقم (12) نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين VFB في الخلائط الإسفلتية بعد معالجة الحصويات المعاد تدويرها بالكلس الحي، ويلاحظ تناقص نسبة هذه الفراغات مع تزايد نسب الحصويات المعاد تدويرها المعالجة إلا أن نسب هذه الفراغات قد تناقص بشكل طفيف بعد المعالجة عند نسبة الاستبدال الواحدة بالمقارنة مع غير المعالجة. يمكن تفسير هذا التناقص بانخفاض خصائص امتصاص الماء الملحوظ للحصويات المعاد تدويرها بعد المعالجة وانخفاض محتوى البيتومين الأمثل المطلوب للخلائط بعد المعالجة.



الشكل رقم (12) نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين VFB في الخلائط الإسفلتية عند كل نسبة للحصويات المعاد تدويرها المعالجة

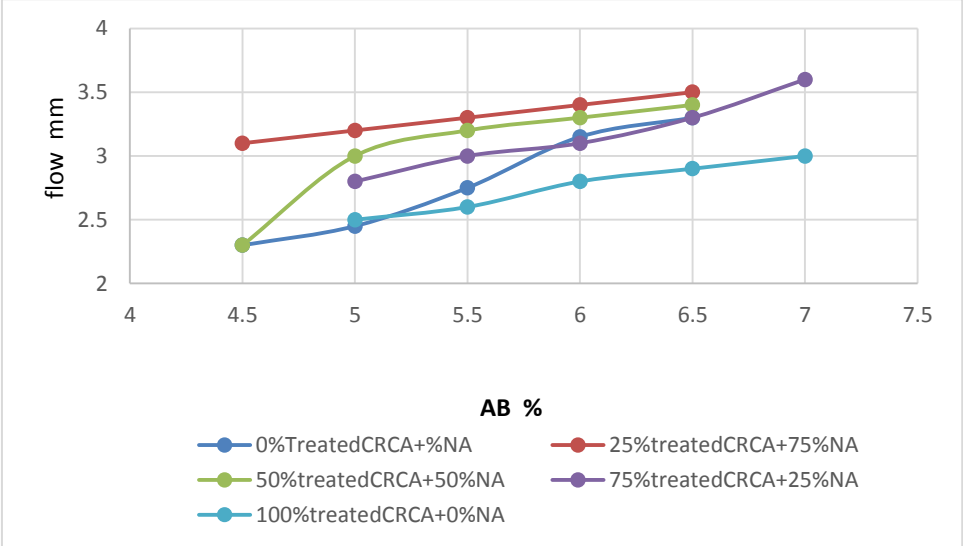
أما تغير الثبات للخلائط الإسفلتية المصممة باستخدام الحصويات المعاد تدويرها المعالجة فإن الشكل رقم (12) يبين تغير الثبات لتلك الخلائط، ويلاحظ تزايد الثبات بشكل ملحوظ حتى حقق قيمة أعلى من ثبات الخلطة الطبيعية عند نسبة استبدال 75%، حيث أن المعالجة بالكلس الحي أدت إى تحسن ملحوظ في متانة الحصويات ومقاومتها للإهتراء.

وعلى الرغم من تناقص الثبات بعد نسبة الإستبدال 75% إلا أن جميع الخلائط حققت ثباتا أعلى من 1000kg بعد المعالجة، بزيادة تتراوح بين 6–26% مما يفتح المجال لإنتاج خلائط إسفلتية من الحصويات البيتونية المعاد تدويرها الخشنة للطرق ذات الأحمال المرورية العالية بنسبة استبدال تصل لـ100%.



الشكل رقم (12) ثبات مارشال للخلائط الإسفلتية عند كل نسبة استبدال بالحصويات المعاد تدويرها المعالجة

وأخيرا فإن تغير الانسياب لهذه الخلائط مبين في الشكل رقم(13)، ويلاحظ من الشكل أن الخلطة 25%treatedRCA+75%NA حققت انسيابا أعلى من انسياب الخلطة الطبيعية ثم تناقص الانسياب مع تزايد نسب الحصويات المعاد تدويرها المعالجة إلا أن قيم الانسياب حتى نسب الاستبدال حتى 75% كانت أعلى من انسياب الخلطة الطبيعية وهذا يتعلق بالزيادة في نسبة البيتومين الفعال في الخلطة بعد المعالجة مما يسمح بتشوه أكبر تحت تأثير الأحمال.

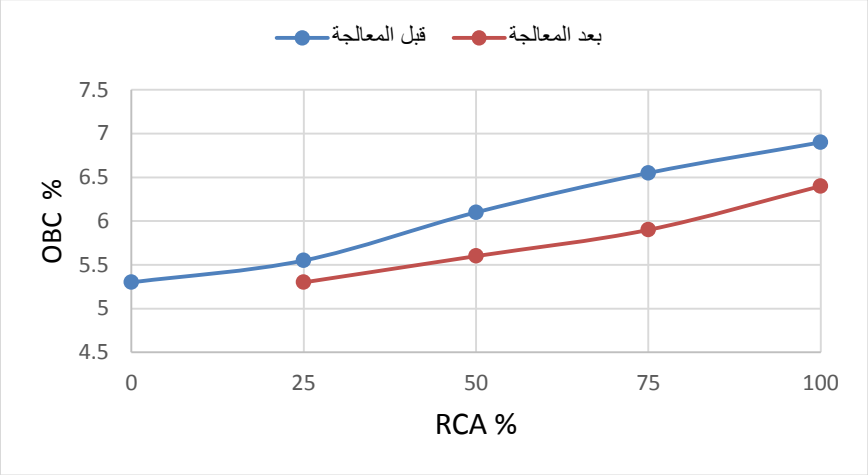


الشكل رقم (13) انسياب الخلائط الإسفلتية عند كل نسبة استبدال بالحصويات المعاد تدويرها المعالجة

أما محتوى البيتومين الأمثل المطلوب للخلائط قبل المعالجة وبعدها فهو موضح بالجدول رقم (5) والشكل رقم (14)

جدول رقم(5) محتوى البيتومين الأمثل المطلوب قبل المعالجة وبعدها

قبل معالجة الحصويات المعاد تدويرها RCA				
100%CRCA+0%NA	75%CRCA+25%NA	50%CRCA+50%NA	25%CRCA+75%NA	0%CRCA+100%NA
6.9%	6.55%	6.1%	5.55%	5.3%
بعد معالجة الحصويات المعاد تدويرها RCA				
6.4%	5.9%	5.6%	5.3%	-



الشكل رقم (14) تغير محتوى البيتومين الأمثل OBC للخلائط الإسفلتية قبل المعالجة وبعدها

ونلاحظ من الجدول رقم (5) والشكل رقم (14) بأن محتوى البيتومين الأمثل المطلوب للخلائط يزداد مع زيادة نسبة الحصويات المعاد تدويرها في الخلطة وهذا بسبب الامتصاصية العالية لهذه الحصويات مقارنة مع امتصاص الحصويات الطبيعية، وبما أن المعالجة بالكلس الحي استهدفت بشكل مباشر التأثير على البنية الفراغية عبر تعزيز الكثافة الصلبة للحصويات المعاد تدويرها، فإن محتوى البيتومين الأمثل للخلائط انخفض بشكل كبير بعد المعالجة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1) أثبتت النتائج كفاءة الكلس الحي في تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للحصويات المعاد تدويرها RCA، إذ تحسن الوزن النوعي للحصويات المعاد تدويرها من ناتج هدم البيتون بنسبة 6%، كما انخفض امتصاص الماء لهذه الحصويات بنسبة تصل لـ 58% في حين تحسن عامل الاهتراء بنسبة 50%، هذا التحسن انعكس إيجاباً على خصائص الخلائط الإسفلتية الحارة المصممة باستخدام هذه الحصويات .

2) ساعدت المعالجة بالكلس الحي على تحسن كثافة مارشال للخلائط الإسفلتية بنسبة وصلت إلى 3% عند محتوى البيتومين الأمثل.

3) أدت المعالجة إلى زيادة نسبة الـ VMA مقارنة بما كان قبل المعالجة بنسبة تصل لـ 2%، وذلك بسبب تأثيرها المباشر على خصائص الكثافة وخشونة السطح للحصويات المعاد تدويرها RCA، وذلك بسبب التفاعل القوي للكلس مع مكونات المونة السطحية، إلا إن جميع الخلائط المدروسة محققة لمتطلبات التصميم في المواصفات .

4) تناقصت نسبة الفراغات المملوءة بالبيتومين VFB للخلائط الإسفلتية بعد المعالجة بنسبة تصل لـ 3% عند محتوى البيتومين الأمثل لكل نسبة استبدال للحصويات، وذلك بسبب انخفاض محتوى البيتومين الأمثل المطلوب للخلائط بعد المعالجة، وبقيت جميع الخلائط محققة لمتطلبات التصميم .

5) إن معالجة الحصويات المعاد تدويرها RCA بالكلس الحي أدت إلى تحسن الثبات بشكل كبير، حيث سجلت نسبة الاستبدال 75%CRCA أعلى قيمة للثبات ، تراوحت نسبة الزيادة في الثبات بين 6–26% عند كل نسب الاستبدال عند محتوى البيتومين الأمثل لكل منها، محققاً بذلك قيم الثبات المطلوبة في المواصفات السورية للطرق ذات الأحمال المرورية العالية والتي تتطلب ثباتاً لايقل عن 900 Kg .

6) كانت الخلائط الحاوية على الحصويات البيتونية المعاد تدويرها المعالجة ذات قيم انسياب أعلى من الخلائط غير المعالجة حتى نسب الاستبدال 75%، وهذا يعود الى ارتفاع نسبة البيتومين الفعال ضمن الخلطة والذي يسمح بتشوه أكبر تحت تأثير الأحمال.

7) أما بالنسبة لمحتوى البيتومين الأمثل OBC فقد ساعدت المعالجة على تخفيض محتوى البيتومين الأمثل للخلائط الإسفلتية بشكل كبير حيث تتراوح نسبة التخفيض بين 3.5–10% تبعاً لنسبة الحصويات المعاد تدويرها المعالجة، وسمحت المعالجة بتصميم خلائط إسفلتية حارة من الحصويات المعاد تدويرها RCA بنسبة 100% محققة للمواصفات وبثبات جيد وملائمة للطرق ذات الغزارات العالية والمتوسطة والمنخفضة.

التوصيات:

- تم في هذا البحث دراسة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للحصويات المعالجة والخلائط الإسفلتية المصنعة من الحصويات المعاد تدويرها من نفايات هدم البيتون، لذا نوصي بإجراء تجارب الأداء على المدى الطويل لهذه الخلائط من أجل تقدير العمر الزمني لها، والبحث في تأثير الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبيتون الأصلي (العمر ودرجة الاكتناز ووجود الإضافات ...) على خصائص و أداء الخلائط الإسفلتية الحارة .
- استخدام الكلس في معالجة الحصويات البيتونية المعاد تدويرها من نواتج هدم البيتون RCA بآليات معالجة مختلفة، وذلك للتحقق من تأثير هذه المعالجة على خصائص الخلائط الإسفلتية.

References:

[1] S . Abbas, R .Hanna , R . Darwish , *Study of using recycled concrete aggregates RCA in hot mixed asphalt HMA *, Lattakia university , Syria , 2017 .

[2] S . Abbas, B . Sultan , R .Hanna, "The effect of using recycled concrete aggregates RCA as coarse aggregates on Hot mixed asphalt HMA properties ". *Lattakia university journal *, Syria , 46 , 6 ,2024.

[3] A.Kavussi , A.Hassani, F.Kazemian , M.Taghipoor , *Laboratory evaluation of treated recycled concrete aggregate in asphalt mixtures *, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran 2018 .

[4] H. Al-Bayati ,* Evaluation of Various Treatment Methods for Enhancing the Properties of Recycled Concrete Aggregate for Hot Mix Asphalt* , University of Waterloo, Canada, 2019 .

[5] S.Nirantar , P.Naktode ,* Effects of Pre-treatments on Microstructure and Mechanical Properties of Recycled Concrete Aggregates * . Sandip University , India , 2023 .
[6] W. M Shaban , J. Yang , H.Su , H. M .Kim , L. Lijuan ,"Quality Improvement Techniques for Recycled Concrete Aggregate: A review " , *Journal of Advanced Concrete Technology* , China , 2019 .
[7] C.Liang , B. Pan , Z.Ma , Z.He ," Utilization of CO2 curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review ", *Cement and Concrete Composites* , china , 2019 .
[8] M. Oreskovic . G. Mladenovic ,*Use of hydrated lime and cement bypass dust as alternative fillers in hot mix asphalt*. University of Belgrade , serbia , 2019 .
[9] B.Singh , D.Prasad , R.R.Kant , *Effect of lime fller on RCA incorporated bituminous mixture* Civil and Infrastructure Engineering, IIT Jodhpur, India , 2021 .
[10] A.Albayati , Y.Wang , J.Haynes . *A Sustainable Pavement Concrete using Warm Mix Asphalt and Hydrated Lime Treated Recycled Concrete Aggregates *, University of Baghdad, Iraq , 2018 .
[11] J.B . Abass , A.Albayati ,* Influence of recycled concrete aggregate treatment methods on performance of sustainable warm mix asphalt *,university of Bagdad , Iraq, 2020 . https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1718822
[12] A.Pasandín, I. Pérez , *Adhesion of Recycled Concrete Aggregates, Demolition Debris, and Asphalt *, University of Coruña ,Spian, 2014. https://www.researchgate.net/publication/266399600 .
[13] A.Pasandín, I. Pérez,* The Effect of Hydrated Lime on the Bond Between Asphalt and Recycled Concrete Aggregates,* University of A Coruña ,Spain . 2014 . https://www.researchgate.net/publication/268502997
[14] S.Abbas , B.Sultan ,R.Hanna , "Improving the physical and mechanical properties of recycled concrete aggregates (RCA) by treatment with lime and cement " *Lattakia university journal* , Syria , 47 , 2 ,2025.