Effect of Organic and Chemical Additives on the Mechanical Properties of Local Warm Asphalt Mixtures

Dr. Bassam Soultan *

(Received 18 / 8 / 2019. Accepted 2 / 10 / 2019)

□ ABSTRACT □

The asphalt mixture manufacturing and production process continuously seeks to reduce the mixing and compacting temperatures of the mixture in order to reduce emissions from asphalt mixtures, without significantly affecting the characteristics of these asphalt mixtures. WMA warm asphalt mixture is a modified hot asphalt mixture that is produced, brushed and compacted at a temperature of 20-40 ° C, compared to a conventional hot asphalt mixture, and at a temperature higher than boiling water. This research aims to investigate the possibility of producing warm asphalt mixtures and comparing the characteristics of warm mixtures manufactured with hot asphalt mixtures with the same materials in the design, and a comprehensive understanding of the characteristics and performance of warm mixtures in order to improve the working conditions for the production, extension and flattening of asphalt mixtures in Syria, especially the subject of mixtures Warm asphalt is relatively new in Syria. Two types of warm organic and chemical additives were used, design asphalt mixtures and determine the optimal asphalt ratio for each mixture. The results showed an increase in the ideal asphalt ratio in warm asphalt mixtures compared to hot and low stability of warm mixtures compared to hot mixes. The study found that the warm mixture designed in addition to organic by (0.3%) ideal mix achieved the specifications and stability close to the stability of hot mixtures and meet the required specification.

Keywords: Warm mix - organic additives - chemical additives - stability - indirect tension

* **Associate Professor, Department of Traffic and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Syria .**

تأثير الإضافات العضوية والكيميائية على الخواص الميكانيكية للخلائط الإسفلتية الدافئة المحلية

د. بسام سلطان *

(تاريخ الإيداع 18 / 8 / 2019. قُبِل للنشر في 2/ 10 / 2019)

□ ملخّص □

تسعى عمليات صناعة وانتاج المجبول الاسفلتي وبشكل مستمر لتخفيف درجات حرارة خلط ورص المجبول من أجل تخفيض الانبعاثات الناتجة عن مجابل الاسفلت ، ودون التأثير بشكل كبير على خصائص هذه الخلطات الاسفلتية . إن الخلائط الإسفلتية الدافئة WMA عبارة عن خليط إسفلتي حار معدّل يتم إنتاجه و فرشه و رصه عند درجة حرارة أقل بـ 20 – 40 درجة مئوية ، مقارنة بالمجبول الإسفلتي الساخن التقليدي ، و عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة غليان الماء . يهدف هذا البحث إلى التحقق من إمكانية انتاج خلائط إسفلتية دافئة ومقارنة خصائص الخلائط الدافئة المصنعة مع خلائط إسفلتية حارة بنفس المواد الداخلة في التصميم ، والفهم الشامل لخصائص وأداء الخلائط الدافئة بهدف تحسين ظروف العمل الخاصة بإنتاج ومد ودحي طبقات المجبول الاسفلتي في سوريا ، وخاصة أن موضوع الخلطات الاسفلتية الدافئة يعتبر جديد نسبياً في سوريا . تم استخدام نوعين من إضافات الخلائط الدافئة العضوية والكيميائية وتصميم خلائط إسفلتية وتحديد نسبة الإسفلت المثالية لكل خلطة . بينت النتائج ازدياد نسبة الإسفلت المثالية في الخلائط الإسفلتية الدافئة مقارنة مع الساخنة ، وانخفاض ثبات الخلائط الدافئة مقارنة مع الخلطات الساخنة، كما لم تؤثر إضافات الخلائط الإسفلتية الدافئة العضوية والكيميائية على خواص الخلائط الإسفلتية بشكل كبير وبقيت قيم الانسياب والفراغات الهوائية والمليئة للخلائط المصممة ضمن الحدود المسموحة ، توصلت الدراسة إلى أن الخلطة الدافئة المصممة بالإضافة العضوية بنسبة (0.3%) خلطة مثالية محققة للمواصفات وبثبات مقارب لثبات الخلائط الحارة ومحقق لمواصفة المطلوبة.

الكلمات المفتاحية: الخلائط الدافئة – إضافات عضوية – إضافات كيميائية – الثبات – الشد غير المباشر

* **أستاذ مساعد – قسم هندسة المواصلات والنقل – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

مقدمة:

تسعى عمليات صناعة وانتاج المجبول الاسفلتي وبشكل مستمر لتخفيف درجات حرارة خلط ورص المجبول من أجل تخفيض الانبعاثات الناتجة عن مجابل الاسفلت ، ودون التأثير بشكل كبير على خصائص هذه الخلطات الاسفلتية .

في الماضي اقتصر الخلط على الساخن أو البارد وانتشر بشكل واسع الخلط على الساخن حيث تصل درجة حرارة منتج المجبول الاسفلتي إلى 165 درجة مئوية ، ظهرت في مطلع الألفية الثانية محاولات لتخفيف درجات حرارة الانتاج وأطلق مصطلح الخلطات الإسفلتية الدافئة وهي مزيج من الحصويات والاسفلت المنتجة بدرجة حرارة منخفضة أقل من درجة انتاج المجبول الحار مع الحفاظ على قابلية التشغيل اللازمة لامكانية الفرش والدحي بالشكل الصحيح. تتراوح درجات حرارة خلط المجبول الاسفلتي الدافئ من 100 إلى 140 درجة مئوية مقارنة بدرجات حرارة الخلط من 150 إلى 180 درجة مئوية للمجبول الاسفلتي الساخن [1].

أدى ارتفاع أسعار الطاقة ، والاحتباس الحراري ، والأنظمة البيئية الصارمة إلى الاهتمام بتكنولوجيا المجبول الاسفلتي الدافئ كوسيلة لتقليل استهلاك الطاقة والانبعاثات المرتبطة بإنتاج المجبول الاسفلتي الساخن.

يمكن تقسيم الخلطات الإسفلتية بحسب درجة حرارة الخلط والطاقة المستهلكة للانتاج إلى [1–2]:

- الخلطة الإسفلتية الباردة (Cold mix asphalt **CMA**)، خليط الإسفلت المنتج في درجة الحرارة المحيطة باستخدام مستحلب إسفلتي أو إسفلت رغوي ؛
- الخلطة الإسفلتية نصف الدافئة (Half Warm mix asphalt **HWMA**)، خليط الإسفلت المنتج عند درجة حرارة أقل من درجة غليان الماء ؛
- الخلطة الإسفلتية الدافئة (Warm mix asphalt **WMA**)، خليط الإسفلت المنتج عند درجة حرارة تتراوح بين 120 درجة مئوية إلى 140 درجة مئوية ؛
- الخلطة الإسفلتية الحارة (Hot mix asphalt **HMA**)، خليط الإسفلت المنتج عند درجة حرارة تتراوح من 150 درجة مئوية إلى 180 درجة مئوية بحسب الرابط الإسفلتي المستخدم ؛

الخلائط الإسفلتية الدافئة WMA عبارة عن خليط إسفلتي ساخن معدّل يتم إنتاجه و فرشه و رصه عند درجة حرارة أقل بـ 20 – 40 درجة مئوية ، مقارنة بالمجبول الإسفلتي الساخن التقليدي ، و عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة غليان الماء [2].

تمتاز الخلائط الإسفلتية الدافئة بمزايا عديدة أهمها تخفيض انبعاثات الأبخرة وتحسين ظروف العمل مما ينعكس بفوائد إيجابية على عمال المجبل وعمال التنفيذ والبيئة المحيطة ، عمر أطول للرابط الإسفلتي نتيجة لتخفيض درجة حرارة الخلط وبالتالي انخفاض تطاير المركبات الطيارة الموجودة في الاسفلت ، كما تتضمن المزايا رص ودحي المجبول الدافئ بدرجة حرارة منخفضة مقارنة مع المجبول الحار وبالتالي زيادة مدة موسم التنفيذ ، واتاحة نقل المجبول لمسافات أطول مع المحافظة على قابلية التشغيل والرص بدرجات حرارة منخفضة وتحسين طاقة الرص الحقلية ، وإمكانية فتح حركة المرور في مرحلة مبكرة من انتهاء التنفيذ [4–5].

أهمية البحث و أهدافه:

يقع هذا البحث في مجال هندسة المواصلات والنقل (مواد طبقات الرصف الطرقي) ويتخصص في انتاج خلائط إسفلتية خاصة بالطبقة العلوية من الرصف المرن . يهدف هذا البحث إلى التحقق من إمكانية انتاج خلائط إسفلتية

دافئة بمواد محلية ومقارنة خصائص الخلائط الدافئة المصنعة مع خلائط إسفلتية ساخنة بنفس المواد الداخلة في التصميم ، و فهم أداء الخلائط الدافئة بهدف تحسين ظروف العمل الخاصة بإنتاج ومد ودحي طبقات المجبول الاسفلتي في سوريا ، وخاصة أن موضوع الخلطات الاسفلتية الدافئة يعتبر جديد نسبياً في سوريا ، ولم يتم عمل دراسات وأبحاث في هذا المجال بشكل كبير.

دراسة مرجعية:

لا تختلف الخلائط الدافئة WMA عن الخلائط الساخنة HMA في المكونات . يتكون المجبول في كلا الحالتين من الحصويات و الرابط الإسفلتي ، بحيث يتم تسخينهما بدرجات حرارة معينة للحصول على تغليف الحصويات بالرابط وسهولة التشغيل. ومع ذلك ، يكمن الاختلاف على وجه التحديد في درجة الحرارة المستخدمة للحصول على خلط مناسب وقابلية للتشغيل .هناك العديد من التقنيات التي يتم بها انتاج الخلائط الدافئة WMA حول العالم والتي تسمح بتخفيض درجة حرارة انتاج المجبول الإسفلتي وتشمل ثلاث فئات أساسية [1-6]:

أولاً: الاضافات العضوية Organic additives : يمكن أن تضاف للإسفلت أو للخليط ، يمكن استخدام اضافات عضوية مختلفة لخفض لزوجة الرابط (الإسفلت) عند درجات حرارة أعلى من 90 درجة مئوية . يجب اختيار نوع الاضافة بعناية بحيث تكون درجة حرارة ذوبانها أعلى من درجة الحرارة المتوقعة أثناء الخدمة (وإلا قد يحدث تشوه دائم) ، وتخفيض هشاشة الاسفلت في درجات الحرارة المنخفضة . بشكل عام يمكن أن تكون الاضافات العضوية إما الشمع (مثل Fischer Tropsch , Montan) أو الأميدات الدهنية . تحتوي هذه الشموع العضوية على سلسلة كيميائية طويلة ، وبالتالي فإن درجة انصهارها تصل إلى حوالي 100 درجة مئوية. وتساعد السلاسل الطويلة على إبقاء الشمع في المحلول وتقلل من لزوجة الرابط الاسفلتي عند درجات حرارة الإنتاج و الفرش و الرص المعتادة. يسمح استخدام المضافات العضوية بتخفيض درجات حرارة إنتاج مزيج والفرش بمقدار 20 إلى 30 درجة مئوية. من المنتجات التي تستخدم هذا النمط Sasobit ، Ashphaltan B ، Licomont BS 100

ثانياً : الاضافات كيميائية Chemical additives : لا تغير الاضافات الكيميائية من لزوجة الإسفلت ، بل تغير من بنية الرابط الاسفلتي عبر تخفيض الشد السطحي بشكل ميكروسكوبي بين الحصويات و الإسفلت ، كما تنظم وتخفض من قوى الاحتكاك بين السطوح البينية ضمن معدل درجة حرارة يتراوح بين 85 إلى 140 درجة مئوية . ولذلك من الممكن خلط الإسفلت مع الحصويات و رصها في درجة حرارة منخفضة . يمكن أن تخفض الاضافات الكيميائية درجة حرارة الخلط والرص ما بين 20 إلى 40 درجة مئوية . من الإضافات الكيميائية Iterlow T، Cecabase

ثالثاً : التقنيات الرغوية Foaming techniques : تستخدم من أجل الحصول على إسفلت رغوي . يتم تطبيق مجموعة من التقنيات الرغوية لتقليل لزوجة الإسفلت . ويتم استخدام وسائل مختلفة لإدخال كميات صغيرة من الماء ضمن الإسفلت الساخن . حيث يتحول الماء إلى بخار ويزداد حجم الإسفلت وتقل لزوجته لفترة قصيرة . زيادة حجم الإسفلت تسمح بتغطية كافة الحصويات في درجات حرارة منخفضة ، وتفيد الرطوبة المتبقية في عمليات الرص والدحي للمجبول الاسفلتي في موقع الانشاء . يمكن تخفيض درجة حرارة الانتاج والرصف بشكل متوازي . تعتمد الزيادة في الحجم على عدد من العوامل تتضمن كمية الماء المضاف و درجة حرارة الرابط . تستخدم عادة تقنيتين بشكل شائع لعمليات الحصول على الإسفلت الرغوي :

- الطريقة المباشرة للحصول على الرغوة (العمليات القائمة على المياه) من خلال حقن كمية صغيرة من الماء يتم التحكم بها ضمن الإسفلت الساخن عن طريق جهاز خاص (foaming nozzles). مما يؤدي إلى زيادة كبيرة في

الحجم الفعال للرابط الاسفلتي ولكن بشكل مؤقت مما يسهل عملية تغطية الحصويات بدرجات حرارة منخفضة وسهولة تشغيل الخليط الاسفلتي . يبقى بعض البخار ضمن الإسفلت خلال عملية الرص لتخفيض اللزوجة الفعالة وتسهيل عمليات الرص . عند تبريد المجبول الاسفلتي يعود الرابط البيتوميني إلى وضعه الطبيعي وكمية الماء المتبقية غير هامة ولا تؤثر على الأداء حيث تتبخر نتيجة الحرارة الطبيعية . يمكن لهذه التقنية تخفيض درجة الحرارة للخليط الاسفلتي بحدود 20 إلى 40 درجة مئوية . من الأجهزة المصممة بهذه الطريقة WAM-Foam, Terex WMA Low Energy Asphalt, Ultrafoam GX–System, Double Barrel Green; LEA

❖ الطريقة غير المباشرة للحصول على الرغوة (الإضافات الحاملة للماء) حيث تستخدم مواد غير عضوية كمصدر للحصول على ماء رغوي . تستخدم عادة في الخلطات الدافئة مواد غير عضوية منيرالية محبة للماء من عائلة الزيوليت وهو مادة غير عضوية مكونة من سيليكات الألمنيوم تحتوي حوالي 20 % ماء بلوري والذي يتحرر بدرجة حرارة أعلى من 100 درجة مئوية ، يعطي تحرر هذا الماء تأثير رغوي يمكن التحكم به والذي يعطي تحسين في قابلية التشغيل بفترة من 6 إلى 7 ساعات ، أو حتى تنخفض درجة الحرارة إلى أقل من 100 درجة مئوية . نتائج عملية الرغوة تحسن قابلية التشغيل للخلطة والذي يسمح بانخفاض درجة الحرارة الخليط بحدود 30 درجة مئوية مع بقاء أداء الرص بشكل فعال ومساوي للحالة الأصلية . كمثال عن هذه الإضافات يستخدم Aspha Min عبارة عن زيوليت صناعي ، و Advera WMA Zeolite مزيج زيوليت اصطناعي وزيوليت طبيعي.

قام **Vaitkus (2016)** وأخرون [1] ، بانتاج خلائط إسفلتية دافئة مخبرياً باستخدام نوعين من الإضافات ، الأولى إضافة كيميائية باستخدام (Iterlene T , Cecabase) بنسبة إضافة (0.1 – 0.4 % من وزن الإسفلت) أما الإضافة الثانية فكانت إضافة رغوية (Aspha Min , natural zeolite) بنسبة إضافة (1 – 2.5 % من وزن الخلطة الإسفلتية) ، لم تبدي نتائج الخلطات الدافئة المصممة بالطريقة الرغوية النتائج المطلوبة مقارنة مع الخلطة المنتجة بإضافات كيميائية . كانت نتائج كثافة الخلطات الدافئة أقل من كثافة الخلطة الساخنة المرجعية ، بينما ازدادت قيمة الشد غير المباشر للخطلطات الدافئة مقارنة مع الساخنة . بحث **Omari (2016)** وأخرون [4] ، نوعين من الإضافات الخاصة بالخلائط الدافئة ، الأولى إضافة عضوية هي شمع البولي ايثيلين، والثانية إضافة مخفضة للشد السطحي من نوع Siloxane . بينت النتائج انخفاض ديمومة الخلائط باستخدام النوعين ، وكان الرابط الاسفلتي أكثر ليونة عند استخدام Siloxane ، واكثر قساوة عند استخدام الشمع ، كما ان لنسبة الإضافة تأثير واضح على خواص الرابط والخلطة الاسفلتية المعدلة . هدفت دراسة **Heever (2014)** [7] ، لمقارنة خواص التعب والصلابة للخلائط الدافئة والساخنة ، تم انتاج الخلائط الدافئة باستخدام (Rediset,Sasobit) و بينت النتائج تشابه بالخواص بين الخلطات الدافئة والحارة نسبياً كما ان بعض الخصائص أظهرت نتائج أفضل بالنسبة للخلائط الدافئة مقارنة مع الساخنة على الرغم من انخفاض عمر التعب وصلابة الانعطاف والتي يمكن أن تعود الى فرق درجات حرارة الخلط .

طرائق البحث و مواده:

تم إنجاز البحث اعتماداً على دراسة مخبرية تجريبية من خلال تصميم خلائط إسفلتية دافئة وساخنة ومقارنة خواص كل منهما عبر مجموعة من الاختبارات ، والمواد المستخدمة في تصميم الخلائط الاسفلتية هي :

1- الإسفلت: تم استخدام نوع واحد من الإسفلت في تصميم عينات البحث ، الإسفلت المستخدم في الدراسة هو إسفلت ذو صنف (60–70) وتم الحصول عليه من مصفاة بانياس و اختباره وفق المواصفات السورية. ويبين الجدول (1) النتائج التوصيفية للإسفلت المستخدم .

نجد من نتائج الجدول (1) أن الاسفلت المستخدم في الدراسة هو من الصنف (60–70) وهو محقق للمتطلبات الفنية المنصوص عنها في الشروط والمواصفات الفنية للطرق والجسور الصادر عن وزارة النقل العام 2002 .

2- الحصويات: استخدم في البحث حصويات كلسية قاسية مكسرة وقطر أكبر حبة لا يزيد عن 19 mm ، تم الحصول عليها من أحد الكسارات الخاصة . نتائج اختبارات الحصوية مبينة في الجدول (2)

3- إضافات الخلائط الدافئة : استخدم في الدراسة نوعين من إضافات الخلطات الدافئة :

- إضافة عضوية A1 (منتج Sasobit) بشكل حبيبات لونها أبيض إلى بني فاتح ، الوزن النوعي (0.9)
- إضافة كيميائية A2 (منتج Evotherm) بشكل سائل لونه عنبري غامق ، الوزن النوعي (1.05)

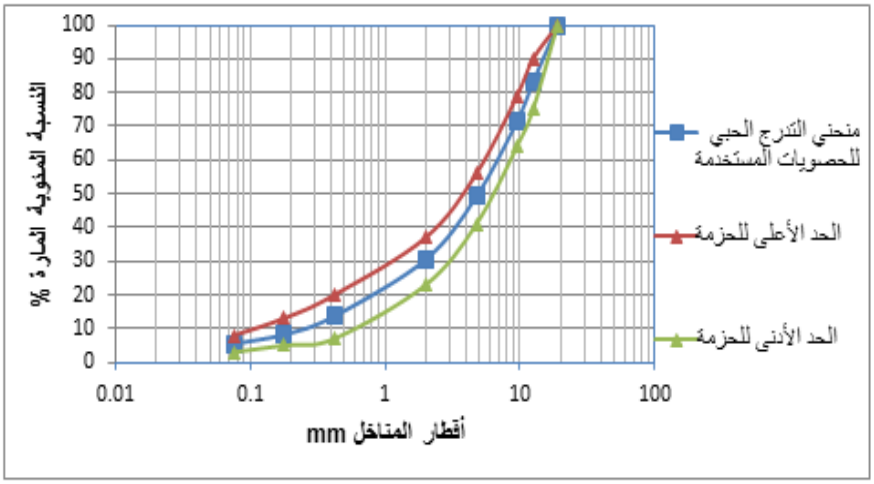
الجدول (1) نتائج اختبار الاسفلت

نوع الاختبار	نتائج الاختبار	المتطلبات الفنية وفق ASTM D946
الغرز (25 °C)100g,5sec , (0.1mm)	61.0	60-70
نقطة الوميض والاشتعال (°c)	درجة الوميض 271 °C	min (232 C°)
	درجة الاشتعال 295 °C	
استطالة الاسفلت (cm) (25 °C) 5cm/min ,	109	min 100.0
نقطة التميع (Softening Point Test) (°c)	50.2	52-48
النقص في الوزن (LOSS On Heating) (%)	0.80	Max 1 %

الجدول(2) نتائج اختبارات الحصويات

نوع الاختبار	نتيجة الاختبار
فاقد الاهتراء وفق لوس انجلوس %	26
حدود اتربرغ	NP
المكافئ الرملي %	75
التركيب الحبي	موضح بالشكل (1)
الوزن النوعي للخليط G_{se}	2.564

نلاحظ من الجدول (2) أن الحصويات المستخدمة في تصميم الخلطة الاسفلتية هي حصويات كلسية ومحققة للمواصفات الفنية المنصوص عنها في الشروط والمواصفات الفنية للطرق والجسور الصادر عن وزارة النقل العام 2002 .كما نبين في الشكل (1) منحني التركيب الحبي المعتمد والخاص بخلطة طبقة اهتراء مجبول اسفلتي و الحزمة النظامية المعتمدة .



الشكل (1) التحليل الحبي والحزمة النظامية المستخدمة في تصميم الخلطة الحصوية

تم تحضير الحصويات المحققة للتدرج الحبي المعتمد في الشكل (1) والموافقة للحزمة النظامية المعتمدة ، ومن ثم تجفيفها في فرن بدرجة حرارة (125–200 درجة مئوية) والمحافظة على درجة حرارتها حتى البدء بعملية الخلط ، ومن ثم يتم تسخين الرابط الإسفلتي وإضافة مواد انتاج الخلطة الدافئة بنسب مختلفة والخلط مع الحصويات باستخدام خلاط ميكانيكي ، تم إعداد جميع عينات الخلطات الاسفلتية المدروسة وفق طريقة مارشال للتصميم بحسب المواصفة (D–1559–ASTM) مع استخدام (75) طرقة قياسية لتصميم الخلطات الخرسانية الإسفلتية الساخنة .

لا توجد مواصفات قياسية متاحة للخلائط الدافئة WMA في سوريا ، وتم الحصول على القيم من صنع خلطات تجريبية للحصول على الخواص المطلوبة مثل درجة حرارة الخلط 125–135 درجة مئوية ودرجة حرارة الرص 120–125 درجة مئوية. وتعطي الشركات التجارية المصنعة لإضافات الخلطات الدافئة توصيات خاصة بدرجات الحرارة للخلط والرص وتختلف من مادة إلى أخرى . تم اعتماد الترميز التالي للخلائط المصممة مخبرياً :

HMA : خلطة إسفلتية حارة

WMA : خلطة إسفلتية دافئة

WMA 0.2%A1 : خلطة إسفلتية دافئة بنسبة 0.2 % من الإضافة الاولى العضوية

WMA 0.3%A1 : خلطة إسفلتية دافئة بنسبة 0.3 % من الإضافة الاولى العضوية

WMA 0.2%A2 : خلطة إسفلتية دافئة بنسبة 0.2 % من الإضافة الثانية الكيميائية

WMA 0.3%A2 : خلطة إسفلتية دافئة بنسبة 0.3 % من الإضافة الثانية الكيميائية

النتائج والمناقشة:

بعد القيام بالعمل المخبري التجريبي وفق ما هو محدد سابقاً ، نبين في الجدول (3) نتائج اختبار مارشال للخلطة الاسفلتية الساخنة المرجعية ، حيث بلغت نسبة الإسفلت المثالية (OBC=4.3%) وهي قيمة مقبولة ومحققة لمتطلبات تصميم الخلطة الاسفلتية بما يتوافق مع باقي البارمترات التصميمة الأخرى والتي تعتبر ضمن المجال المسموح لها وفق الشروط العامة المعتمدة في سوريا .

الجدول (3) نتائج بارمترات الخلطة الإسفلتية الحارة التصميمة

الخلطة	نسبة الإسفلت المثالية %	الثبات Kg	الانسياب mm	الكثافة gr/cm^3	الفراغات الهوائية %	الفراغات المليئة %
HMA	4.3	1165	3.1	2.350	4.9	74.1

يبين الجدول (4) نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية الدافئة باستخدام الإضافة العضوية ، حيث تشير نتائج التصميم إلى انخفاض ثبات الخلطة الدافئة مقارنة مع الحارة ، مع ازدياد نسبة الاسفلت المثالية عن الخلطة الساخنة ولكن بقيمة ضمن الحدود المسموحة ، كما ازدادت قيم الانسياب مع زيادة نسبة الإضافة من المادة العضوية A1 .

الجدول (4) نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية الدافئة باستخدام الإضافة العضوية

الخلطة	نسبة الإضافة %	نسبة الإسفلت المثالية %	الثبات Kg	الانسياب mm	الكثافة gr/cm^3	الفراغات الهوائية %	الفراغات المليئة %
WMA الإضافة الأولى A1	0.2	4.7	1077	3.2	2.342	4.6	74.3
	0.3		1003	3.5	2.327	4.4	75.0

نلاحظ من نتائج تصميم الخلطة الدافئة باستخدام الإضافة العضوية المبينة في الجدول (4) انخفاض كثافة الخلطات الدافئة مقارنة مع الساخنة ، كما انخفضت نسبة الفراغات الهوائية وبالمقابل ازدادت قيم الفرغات المليئة .

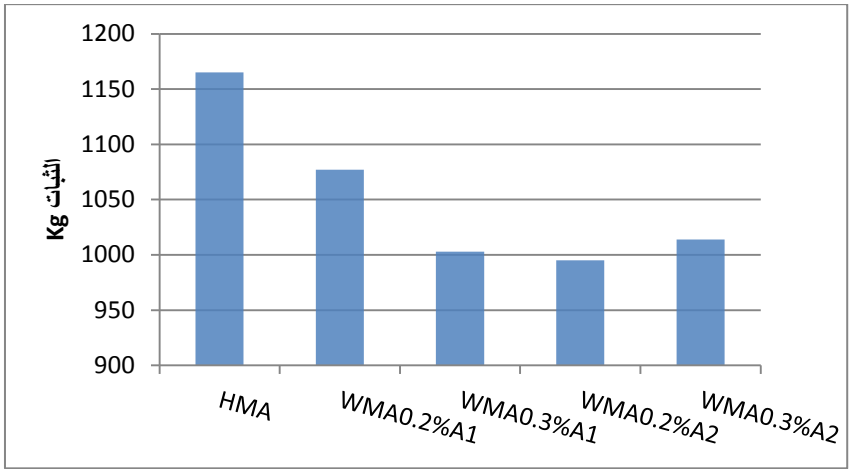
إن نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية الدافئة باستخدام الإضافة الكيميائية A2 مبينة في الجدول (5) ، ويلاحظ ارتفاع نسبة الإسفلت المثالية التصميمة في هذا النوع من الخلطات المصممة بالإضافة الكيميائية مقارنة مع الخلطة الساخنة ، حيث ازدادت بنسبة (14%) عن الخلطة الساخنة ، وبنسبة (4.3%) عن الخلطة الدافئة باستخدام الإضافة العضوية ، وبقيت جميعها ضمن الحدود المقبولة.

الجدول (5) نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية الدافئة باستخدام الإضافة الكيميائية

الخلطة	نسبة الإضافة %	نسبة الإسفلت المثالية %	الثبات Kg	الانسياب mm	الكثافة gr/cm^3	الفراغات الهوائية %	الفراغات المليئة %
WMA الإضافة الثانية A2	0.2	4.9	995	3.3	2.331	4.3	76.6
	0.3		1014	3.9	2.309	3.0	79.2

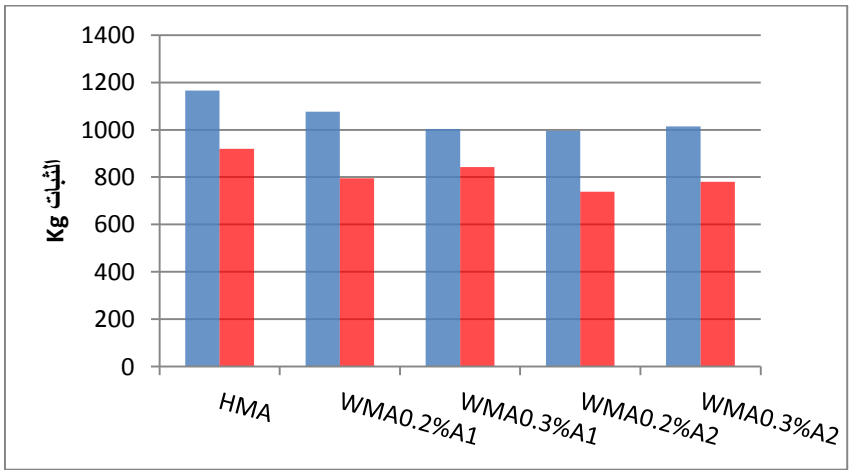
يلاحظ من نتائج تصميم الخلائط الإسفلتية أن نسبة الإسفلت المثالية لا تتغير بتغيير نسب الإضافة سواء العضوية أو الكيميائية .

يبين الشكل (2) قيم الثبات للخلائط الإسفلتية المصممة ، حيث سجلت الخلطة الساخنة أعلى قيمة للثبات ، وانخفض الثبات في الخلائط الدافئة عن الساخنة وبلغت أقصى نسبة للانخفاض (15%) للخلطة الدافئة المصممة بالإضافة الكيميائية بنسبة (0.2%) ، بقيت جميع الخلائط ضمن المجال المسموح للثبات باستثناء الخلطة الدافئة (WMA 0.2%A2) .



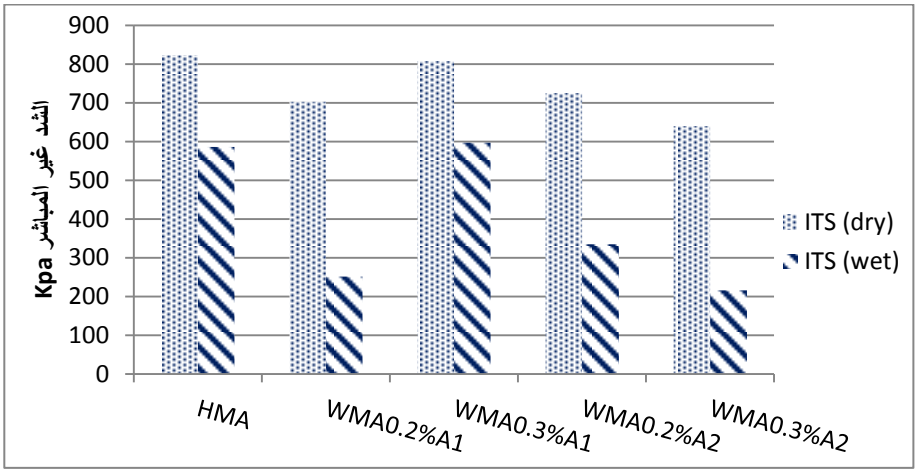
الشكل (2) قيم الثبات للخلائط الإسفلتية المصممة

يبين الشكل (3) نتائج اختبار النقص في الثبات ، بعد نقع العينات لمدة (24 ساعة) بحمام مائي وبدرجة حرارة (60 درجة مئوية) تمثل أسوأ الظروف المناخية التي يمكن أن يتعرض لها المجبول الإسفلتي ، يلاحظ أن نسبة الفاقد بالثبات للخلائط الإسفلتية الساخنة كانت (21%) ، و بالنسبة للخلطة الدافئة المصممة بالإضافة العضوية (WMA 0.2%A1) فقد بلغت نسبة الفاقد بالثبات (26.2%) وبنسبة (16.1%) للخلطة (WMA 0.3%A1) ، اما بالنسبة للخلائط الدافئة المصممة بالإضافة الكيميائية (WMA 0.2%A2) فقد كانت نسبة الفاقد بالثبات (25.7%) للخلطة (WMA 0.2%A2) وبنسبة (23%) للخلطة (WMA 0.3%A2) .



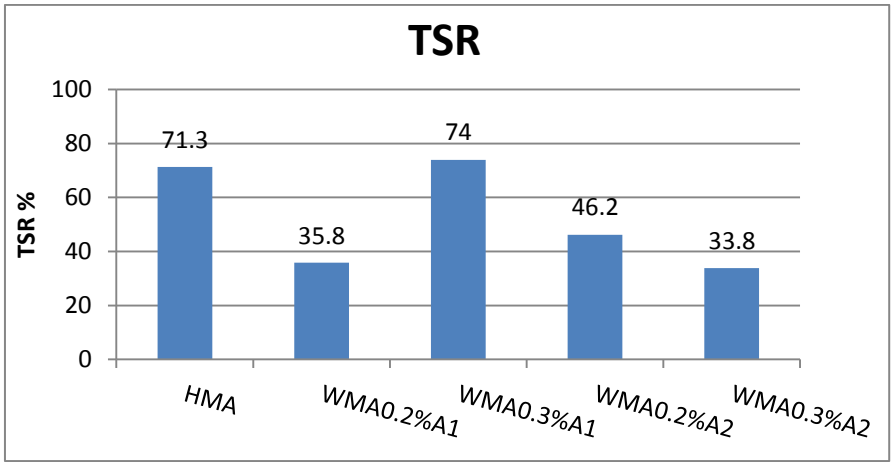
الشكل (3) قيم الثبات والفاقد بالثبات للخلائط الإسفلتية

لتقييم حساسية الخلائط الإسفلتية المصممة لفعل الرطوبة تم إجراء اختبار الشد غير المباشر ITS (Indirect tensile strength) وفقاً للمواصفة (AASHTO T283) من خلال تحضير عينات من الخلائط الاسفلتية وبنفس نسبة الإسفلت المثالية الخاصة بكل خلطة والتي تم استنتاجها بحسب الجداول (3-4-5) وفق المواصفة المحددة ، وإجراء الاختبار في الحالتين الجافة والرطبة وحساب نسبة الشد غير المباشر . نتائج اختبار الشد غير المباشر للعينات مبينة في الشكل (4) ، بشكل عام تشير النتائج إلى أن متوسط قيمة الشد غير المباشر للخلائط الإسفلتية الساخنة هي الأعلى مقارنة مع الخلائط الدافئة ، وبلغت أدنى قيمة للشد غير المباشر للخلطة الدافئة المصممة بالإضافة الكيميائية (WMA 0.3%A2) ، كما يلاحظ انسجام نتائج الشد غير المباشر للعينات في الحالة الرطبة مقارنة مع الحالة الجافة ، ولا يلاحظ تفاوت في النتائج بالحالتين الرطبة والجافة .



الشكل (4) نتائج اختبار الشد غير المباشر لعينات الخلائط الإسفلتية جافة ورطبة

يلاحظ من الشكل (4) أن الخلطة الدافئة المصممة بالإضافة العضوية (WMA 0.3%A1) تحقق أفضل نتائج لاختبار الشد غير المباشر مقارنة مع الخلائط الدافئة الأخرى ، وكانت قيمة الشد غير المباشر قريبة من الخلطة الساخنة في الحالتين الرطبة والجافة وحققت اعلى قيمة لنسبة الشد (74%) كما هو مبين في الشكل (5) نتائج نسبة قوة الشد TSR (tensile strength ratio) لعينات الخلائط الإسفلتية والذي يعطي تصور عن حساسية الرطوبة في الخلطات الإسفلتية ، حيث يلاحظ أن الخلطة الساخنة والدافئة المصممة بالإضافة العضوية بنسبة (0.3%) تبدي مقاومة عالية للرطوبة ، بينما كانت باقي الخلائط بمستوى متوسط لمقاومة تأثير الرطوبة ، وبلغت أدنى قيمة لTSR (33.8%) للخلطة الدافئة المصممة بالإضافة الكيميائية (WMA 0.3%A2) ويعزى انخفاض نسبة قوة الشد في الخلائط الدافئة إلى انخفاض درجات حرارة هذا النوع من الخلطات مقارنة مع الساخنة مما يؤدي إلى إمكانية عدم تجفيف كامل للحصويات مما يبقي وجوداً لرطوبة الحصويات تسبب تأثيراً على انخفاض مقاومة الشد غير المباشر .



الشكل (5) نسب الشد غير المباشر لعينات الخلائط الإسفلتية

الاستنتاجات والتوصيات:

1- لم تؤثر إضافات الخلائط الإسفلتية الدافئة العضوية والكيميائية على خواص الخلائط الإسفلتية بشكل كبير وبقيت قيم الانسياب والفراغات الهوائية والمليئة للخلائط المصممة ضمن الحدود المسموحة .

2- ازدادت نسبة الإسفلت المثالية في الخلائط الإسفلتية الدافئة مقارنة مع الحارة ، حيث بلغت النسبة المثالية للإسفلت في الخلطة الحارة (4.3%) ، وازدادت في الخلطة الدافئة باستخدام الإضافة العضوية إلى (4.7%) ، أما بالنسبة للخلطة المصممة بإضافة كيميائية فقد سجلت أعلى قيمة لنسبة الإسفلت المثالية (4.9%)

3- انخفض ثبات الخلائط الإسفلتية الدافئة مقارنة مع الحارة ومع زيادة نسبة الإضافة تنخفض قيمة الثبات، وبلغت أقصى نسبة للانخفاض (15%) في الخلطة المصممة بإضافة كيميائية .

4- حققت الخلطة الدافئة المصممة بالإضافة العضوية بنسبة (0.3%) أدنى قيمة للفاقد بالثبات وبنسبة (16.1%) مقارنة مع الخلطة الساخنة (21%) ، أما باقي الخلائط الدافئة فكانت أعلى قيمة للفاقد بالثبات (26.2%).

5- تعتبر الخلائط الدافئة حساسة لتأثير الرطوبة مقارنة مع الخلطات الساخنة ، وانخفضت نسبة مقاومة الشد للخلائط الدافئة مقارنة مع الخلطة الحارة .

6- تعتبر الخلطة الدافئة المصممة بالإضافة العضوية بنسبة (0.3%) خلطة مثالية محققة للمواصفات وبثبات مقارب لثبات الخلائط الدافئة ومحقق لمواصفة المطلوبة ، كما ان نتائج اختبار الشد غير المباشر لهذه الخلطة أعطت أفضل نتيجة وبنسبة قوة شد (74%).

7- نوصي بإجراء المزيد من الاختبارات على الخلائط الدافئة المصنعة بمواد محلية وتحديد تأثير تغير نسبة الإسفلت على الخواص الهندسية للخلائط الإسفلتية .

8- نوصي بالبحث عن تأثير استخدام أنواع أخرى من الإضافات على خواص الخلائط الإسفلتية مثل الإضافات الرغوية الحاملة للمياه و الخلائط الدافئة المصنعة باستخدام الاسفلت الرغوي.

المراجع:

1- Audrius Vaitkus, Donatas Cygas, Alfredas Laurinavicius, Viktoras Vorobjovas. Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties. Construction and Building Materials 112 (2016) 800–806. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.212

2- H. Zelelew, C. Paugh, M. Corrigan, S. Belagutti, J. Ramakrishnareddy . Laboratory evaluation of the mechanical properties of plant-produced warm mix asphalt mixtures. Road Mater. Pave. Design 14 (1) (2013) 49–70 , http://dx.doi.org/ 10.1080/14680629.2012.735799

3- Jun Liu, Kezhen Yan, Jenny Liu . Rheological properties of warm mix asphalt binders and warm mix asphalt binders containing polyphosphoric acid . International Journal of Pavement Research and Technology 11 (2018) 481–487. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.03.005

4- Isaac Omari, Vivek Aggarwal, Simon Hesp . Investigation of two Warm Mix Asphalt additives . International Journal of Pavement Research and Technology 9 (2016) 83–88 http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.02.001

5- N. Guo, Z. You, Y. Zhao, Y. Tan, A. Diab . Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures . Constr. Build. Mater. 64 (30) (2014) 141–149.

6- M.C. Rubio, G. Martı´nez, L. Baena, F. Moreno . Warm mix asphalt: an overview, J. Cleaner Prod. 24 (3) (2012) 76–84.

7- Johann Van Den Heever . WARM MIX ASPHALT vs. HOT MIX ASPHALT: FLEXURAL STIFFNESS AND FATIGUE LIFE EVALUATION . Master of Engineering (Civil Engineering) at Stellenbosch University .2014.

9- Gandhi, T. Effects of Warm Asphalt Additives on Asphalt Binder and Mixtures Properties . Ph.D. Dissertation, Clemson University, Clemson, South Carolina. 2008

10- Abbas, A. R. & A. Ali . Mechanical Properties of Warm Mix Asphalt Prepared Using Foamed Asphalt Binders, Ohio Department of Transportation .2011

11- Hurley, G. C. & B. D. Prowell. Evaluation of Aspha-min® zeolite for Use in Warm Mix Asphalt. National Center for Aspahlt Technology: 05-04.2005.