دراسة تأثير إضافة الغرافيت في تقادم الخلائط الإسفلتية الساخنة

* م. نغم طالب ** أ. د.م فايز سليمان

*** د.م بسام سلطان ****د.م باسم علي

الملخص

يتطلب الانتشار الواسع لاستخدام المجبول الإسفلتي دراسات مستمرة للتعرف على سلوكية المواد المكونة له، والعيوب والمشاكل التي يمكن أن يتعرض لها، وبالتالي البحث الدائم في تحسين مواصفاته بالشكل الذي يضمن مقاومته للعيوب والحمولات التي يمكن أن يتعرض لها، وذلك بهدف إطالة عمر خدمة طبقات الرصف وزيادة ديمومتها.

وانسجاماً مع هذا الطلب تمّ في هذا البحث دراسة تأثير الغرافيت في التقادم قصير وطويل الأمد للخلائط الإسفلتية الساخنة، وذلك بإجراء اختبارات على خواص الرابط الإسفلتي المعدل بالغرافيت بنسب مختلفة وتحديد النسب المثلى منه، وجرى بناءً على ذلك تشكيل عينات مجبول إسفلتي ساخن مرجعية وأخرى معدلة بالنسبة المثالية من الغرافيت، وتعريضها لفترتي تقادم قصير وطويل الأجل، ودراسة بعض الخواص الميكانيكية قبل وبعد التقادم مثل: ثبات مارشال – الشد غير المباشر – الحساسية بفعل الرطوبة، وحساب دلائل التقادم لتحديد تأثير الإضافة فيه.

بينت نتائج الدراسة أن إضافة نسبة (10) % وزناً من الرابط الإسفلتي، تحسن من خواص مقاومة الخلائط الإسفلتية للتقادم قصير وطويل الأمد بشكل فعال مقارنة مع نتائج الخلائط غير المعدلة.

الكلمات المفتاحية : غرافيت – تقادم قصير الأمد – تقادم طويل الأمد – ثبات مارشال – الشد غير المباشر

* طالبة دكتوراه – قسم هندسة المواصلات والنقل – كلية الهندسة المدنية – جامعة البعث – حمص – سورية

** أستاذ – قسم هندسة المواصلات والنقل – كلية الهندسة المدنية – جامعة البعث – حمص – سورية

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

**** مدرس – كلية الهندسة المدنية – الجامعة العربية الدولية – سورية

Effect of graphite on the aging behavior of asphalt binder

Abstract

The widespread use of asphalt paver requires continuous development and permanent research to identify the behavior of its constituent materials and the defects and problems that it may be exposed to, and thus research to improve its specifications in a way that ensures its resistance to defects and loads that it may be exposed to, thus extending the service life of the paving layers and increasing its durability.

In this research, the effect of graphite on the short and long-term aging of hot asphalt mixtures was studied, by determining the ideal proportions for the addition of graphite by conducting tests on the properties of the modified asphalt binder, and then producing reference samples of hot asphalt modified with the ideal proportion of graphite and subjecting them to two short aging periods. and long-term, and then study some mechanical properties before and after aging, such as Marshall stability, indirect tension, water damage test, and calculating aging indices to determine the effect of the addition on the asphalt aggregate.

The results of the study showed that adding (10) % by weight of asphalt binder is considered an optemum percentage to improve the resistance properties of asphalt mixtures to short and long term aging effectively compared to the results of unmodified mixtures.

Keywords: Graphite - short-term aging - long-term aging – Stability - ITS

* Ph.D student , Department of Traffic and Transportation ,Faculty of Civil Engineering , ALbaath University , Syria

** Professor , Department of Traffic and Transportation , Faculty of Civil Engineering , ALbaath University , Syria

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

**** lecturer, Faculty of Civil Engineering , Arab International University, Syria

1- مقدمة :

يقسم الرصف الطرقي، وفقا لصلابته، إلى ثلاثة أنواع أساسية: - الرصف المرن- الرصف الصلب والرصف نصف الصلب. وفي سورية يستخدم الرصف المرن بشكل أساسي، حيث يستخدم المجبول الإسفلتي الساخن في رصف الطرق والمطارات وغيرها من التطبيقات [1]. يعود ذلك إلى سرعة إنشائه وسهولة صيانته وقلة تكاليف إنتاجه نسبياً مقارنة مع الرصف الصلب. هذا الانتشار الواسع لاستخدام المجبول الإسفلتي يتطلب التطوير المستمر والبحث الدائم للتعرف على سلوكية المواد المكونة له والعيوب والمشاكل التي يمكن أن يتعرض لها، والبحث، بناء على ذلك، في آليات تحسين مواصفاته بالشكل الذي يضمن مقاومته للتشوهات والحمولات التي يمكن أن يتعرض لها، وبالتالي إطالة عمر خدمة طبقات الرصف وزيادة ديمومتها.

تتضمن عملية إنشاء وتنفيذ طبقة من المجبول الإسفلتي الساخن، إنتاج المجبول الإسفلتي في درجات الحرارة التي تحددها لزوجة الرابط الإسفلتي المستخدم. وتعتبر درجة الحرارة ضرورية لتمكين عملية تليين الإسفلت إلى لزوجة كافية لتغطية حبيبات الحصويات. وبعد إنتاج الخليط الإسفلتي، يتم نقله إلى موقع التنفيذ ليتم فرشه ورصه بالسماكة المطلوبة. يتطلب فرش ورص المجبول الإسفلتي درجات حرارة محددة لبناء رصف ذو جودة وأداء مثالي. وعملياً يتعرض المجبول الإسفلتي لعمليتي تقادم مختلفتين إلى حد كبير طوال فترة الخدمة [5-2] وهي:

- **مرحلة التقادم قصير الأمد (Short Term Aging STA)**: و تتم أثناء عملية الخلط والانتاج ونقل وفرش المجبول الإسفلتي الساخن نتيجة للحرارة المرتفعة الناتجة عن الخلط والتعرض للهواء، تحدث الأكسدة وتطاير المواد النفطية الخفيفة الموجودة في الإسفلت.

- **مرحلة التقادم طويل الأمد (Long Term Aging STA)**: تحدث بعد عملية الفرش، بنتيجة استمرار أكسدة الرابط الإسفلتي في درجات الحرارة المتوسطة ولفترة طويلة تصل من (5–10) سنوات.

2- إشكالية البحث :

يعتبر التقادم قصير وطويل الأمد من الظواهر المعقدة بسبب العديد من العوامل التي تؤثر في معدله. ويشكل الإسفلت جزءاً مهماً من الخلطة الإسفلتية، ويؤثر في أداء الرصف في درجات حرارة التشغيل المنخفضة والمرتفعة حقلياً. وينتج عن التغيير الكيميائي الناتج عن الأكسدة خليط إسفلتي أكثر صلابة وهشاشة، ممّا يؤدي إلى حصول شقوق في درجات الحرارة المنخفضة أو بفعل التعب، أو أي شكل آخر من أشكال التشوهات [3]. ونظراً للزيادة المستمرة في حجم حركة المرور، والحمولات المحورية وتأثير درجة الحرارة، تتعرض طبقة الرصف الإسفلتي للتشقق والتخدد، لذلك، ولزيادة ديمومة الطبقة السطحية والتخفيف من التأثير السلبي لتقادم المجبول الإسفلتي سواء قصير أو طويل الأمد، تستخدم إضافات مختلفة مثل البوليميرات أو الألياف أو المواد المالئة لتعديل الخلائط الإسفلتية [4].

ويصنف الغرافيت من أشكال الكربون المستقرة، ويمتاز بموصلية كهربائية جيدة ومقاومة حرارية مرتفعة، وبخصائص كيميائية مستقرة وديمومة عالية، ويعتبر خاملاً عند اختلاطه بأي مادة أخرى تقريباً، وبسبب هذه الخصائص تتنوع استخدامات الغرافيت على نحو كبير، ويمكن أن يتواجد الغرافيت على شكل مسحوق وألياف، وعلى الرغم من وجود بعض الدراسات حول خواص الخلائط الإسفلتية المحتوية على الغرافيت، إلا أن هناك دراسات محدودة حول تأثير الغرافيت على تقادم الخلائط الإسفلتية، وبناءً عليه فإنّ البحث

في مجال تحسين مقاومة الخلائط الإسفلتية للتقادم بإضافة الغرافيت ينطوي على قيمة علمية اقتصادية هامة.

3- أهمية البحث و أهدافه :

يقع هذا البحث في مجال هندسة المواصلات والنقل (مواد طبقات الرصف الطرقي المرن)، ويختص بمحور دراسة سلوك المجبول الإسفلتي تحت تأثير التقادم، يهدف هذا البحث إلى تسليط الضوء على استخدام الغرافيت كمادة مضادة لتقادم الرابط الإسفلتي خصوصاً والخلائط الإسفلتية عموماً، وذلك لغاية إطالة عمرها من خلال تحسين مقاومتها للتشوهات والتشققات التي تحصل بفعل ظاهرة الشيخوخة .

و تبرز أهمية البحث من خلال التوصل لتحديد تأثير إضافة الغرافيت في الخواص الميكانيكية للخلطة الإسفلتية وتأثير المياه فيها، وذلك قبل وبعد التقادم قصير وطويل الأمد. و يهدف ذلك إلى الحد من تأثير عملية التقادم وظهور التشوهات والشقوق، وبالتالي المساهمة في حل بعض المشاكل المتعلقة بالخصائص الفنية والاقتصادية للخلطات الإسفلتية الساخنة، وتحقيق، بناء على ذلك، وفورات في المواد والمال والطاقة في مجال بناء الطرق وصيانتها.

4- دراسات مرجعية :

تتم محاكاة التقادم قصير الأجل الحقلي في المختبر باستخدام إجراء تقادم الفرن قصير المدى Short Time Oven Aging (STOA) ، والذي يتضمن تسخين خليط إسفلتي مفكك في فرن لمدة 4 ساعات عند درجة حرارة 135 درجة مئوية، تمّ التحقق من صحتها في دراسات سابقة مختلفة مثل Bell، CA، Weider، .AJ، Fellin، M.J. ذكرت في SHRP-A-390 (1994)[3-4-14].

بينت نتائج الأبحاث والدراسات المرجعية [4] أن التقادم قصير المدى لمدة 4 ساعات يمثل بشكل كافٍ تأثير الشيخوخة خلال مراحل إنتاج المجبول الإسفلتي وعمليات نقله وفرشه ورصه (عندما يكون المزيج في حالة سائبة (HRP–A–417، 1994)). كما تتم محاكاة التقادم طويل الأمد على عينات مرصوصة، تم إخضاعها إلى ظروف تقادم قصير الأمد، وتعريضها إلى الحرارة في الفرن لفترات محددة تحاكي العمر المطلوب تمثيله.

أجرت Haleh Azari (2011) [6] بحثًا لتحليل تأثير المحاكاة المخبرية للتقادم على المدى القصير في الخواص الميكانيكية للخلائط الإسفلتية. حيث قامت الباحثة بمحاكاة التقادم قصير الأمد على عينات من الخلائط الإسفلتية عند درجة حرارة $145^{\circ}C$ وضمن مقياس زمني على فترات نصف ساعة إلى ست ساعات في الفرن ، ومن ثم قامت بقياس المعامل الديناميكي للخلائط الإسفلتية ويعتبر المعامل الديناميكي للخلائط الإسفلتية (E*) خاصية هندسية أساسية تتعلق بأداء طبقات الرصف الاسفلتي. يتم قياس هذه الخاصية عادةً باستخدام عينة أسطوانية يبلغ ارتفاعها 150 مم وقطرها 100 مم (عينات نظامية). وهو خاصية تعتمد على درجة الحرارة والمرونة (استجابة ديناميكية) تحت الحمل المطبق. تعتبر الاستجابة الديناميكية للخلائط الإسفلتية تحت الحمل المروري خاصية مهمة في تصميم طبقات الرصف المرنة وتقييم أداء الرصف المرن باستخدام الطرق الميكانيكية.

وخلصت الدراسة إلى وجود علاقة ارتباط موجبة بين زمن المحاكاة والمعامل الديناميكي للعينات.

قام Pan وآخرون (2014) [9] بفحص الخصائص الحرارية للرابط الإسفلتي المعدل بالغرافيت ،حيث وجد أنّ الغرافيت يحسن الخصائص المضادة للتقادم. كما درس Yao وآخرون (2016) [10] تأثيرات الغرافيت بجسيمات نانوية (graphite

nanoplatelets) بنسبة 1-2٪ في خصائص الرابط الإسفلتي، بينت النتائج أن الإسفلت المعدل بالغرافيت يؤدي إلى زيادة المقاومة للتخدد وللضرر الناتج عن الرطوبة. تعمل صفائح الغرافيت النانوية أيضا على تحسين مقاومة الشقوق، و على الرغم من وجود بعض الدراسات حول الخصائص الحرارية للخلائط الإسفلتية المحتوية على الغرافيت بهدف تحسين التوصيل الحراري، إلا أن هناك دراسات محدودة حول تأثير التقادم في الخواص الفيزيائية والريولوجية للرابط الإسفلتي المعدل بالغرافيت، وأيضاً في الخواص الميكانيكية للخلائط الإسفلتية.

5- منهجية البحث ومواده:

5-1- مواد البحث:

تمّ إنجاز البحث اعتماداً على دراسة مخبرية تجريبية على عينات من الخلائط الإسفلتية (مرجعية ومعدلة)، استخدم فيها المواد التالية :

1- **الإسفلت:** استخدم في تصميم عينات البحث، إسفلت صنف (60-70)، الناتج من تكرير النفط في مصفاة بانياس، واختباره وفق المواصفات السورية والعالمية.
2- **الحصويات** : الحصويات المستخدمة في تصميم الخلطة الإسفلتية هي حصويات قاسية مكسرة مصدرها مقالع حسياء، لا يزيد قطر الحبة فيها عن 19 mm . وأجريت، من أجل تشكيل عينات الدراسة، الاختبارات الخاصة بتوصيف الحصويات وفقاً للمواصفات السورية للطرق والجسور الصادرة في العام 2002 .
3- **الغرافيت (Graphite)** : استخدم في الدراسة عينات غرافيت مبينة في الشكل (1)، وتتمتع بالمواصفات التالية:
   - مارة من المنخل No. 200 .
   - محتوى الكربون لا يقل عن (85 %).

- الرطوبة (0.6%).
- الكثافة (2.1 gr/cm^3).
- اللون أسود رمادي داكن ومظهر دهني، ويترك لطخات سوداء على الأصابع عند اللمس.

الشكل (1) نموذج من عينات الغرافيت المستخدمة في الدراسة

5-2- منهجية العمل المخبري:

تمت الدراسة المخبرية وفق المراحل الأساسية التالية:

1- التحقق من الخواص الفنية للمواد المستخدمة في البحث، ومطابقتها للمواصفات المتبعة في تصميم الخلائط الإسفلتية الساخنة في سوريا .
2- تحضير عينات لإسفلت معدل بنسب مختلفة من الغرافيت (5 ، 10 ، 15 ، 20 %) وزناً من الرابط الإسفلتي، و إجراء اختبارات الغرز ونقطة التمييع ، وحساب دلائل التقادم للرابط الإسفلتي المعدل لتحديد النسبة المثالية .
3- تصميم خلطة إسفلتية مرجعية بدون إضافات وتحديد نسبة الاسفلت المثالية والتركيب الحبي الحصوي المعتمد .
4- عملية تعديل الخلطة الإسفلتية باستخدام رابط إسفلتي معدل بنسبة الغرافيت المثالية.

5- إجراء عملية تقادم قصير وطويل الأمد على عينات الخلطة المرجعية، والأخرى المعدلة بالغرافيت، بالإضافة الى اختبار الثبات و الشد غير المباشر وحساسية الرطوبة، وحساب دلائل تقادمها لبيان مدى تأثير الإضافة في خواص التقادم .

5-3- محاكاة تقادم الخلائط الإسفلتية مخبرياً:

أنجز الاختبار القياسي لتقادم الخلائط الإسفلتية الساخنة مخبرياً وفق المواصفة AASHTO R30 [14]، ويهدف هذا الإجراء إلى تمثيل الشيخوخة التي تحدث في خليط الإسفلت بسبب عملية إنتاج وتنفيذ المجبول الإسفلتي ومرحلة الخدمة. ويتم، في حالة التقادم قصير الأمد، تطبيق عملية المحاكاة فقط على الخليط المفكك السائب (Lose Mixes). حيث يتم فرش الخليط في صينية نظيفة، بسماكة متساوية تتراوح بين 1 إلى 2 بوصة (25 – 50 مم)، يلي ذلك وضع الخليط والوعاء في فرن لمدة 4 ساعات ± 5 دقائق عند درجة حرارة 275 ± 5 درجة فهرنهايت (135 ± 3 درجة مئوية)، وخلال هذه المدة يتم تقليب الخليط على فترات 60 ± 5 دقائق، وذلك للحفاظ على درجة حرارة منتظمة في جميع أنحاء العينة، وعند اكتمال عملية التقادم، توضع الخلطة في فرن عند 185 درجة فهرنهايت لمدة 15 دقيقة في وعاء التقادم، يتم بعدها تشكيل عينات وفق طريقة مارشال.

يتم إجراء التقادم طويل الأمد عن طريق إخضاع العينات المرصوصة المشكلة من المجبول الإسفلتي المعرض لتقادم قصير الأمد لدرجة حرارة 85 درجة مئوية في الفرن لمدة 120 ساعة (5 أيام)، وإنّ طريقة التقادم على المدى الطويل تعادل تقريباً (5-15 سنة) كعمر خدمة اعتماداً على المناخ.

ويبيّن الشكل (2) نماذج العينات من الخلائط الإسفلتية المعرضة لتقادم طويل الأمد مخبرياً.

الشكل (2) نماذج العينات من الخلائط الإسفلتية معرضة لتقادم طويل الأمد مخبرياً.

6- النتائج والمناقشة :

6-1- مواصفات الإسفلت المستخدم في الدراسة:

لدى إجراء تجارب تحديد خواص الإسفلت المستخدم في الدراسة حصلنا على النتائج المبينة في الجدول (1) التالي :

الجدول (1) نتائج اختبار الإسفلت المدروس.

نوع الاختبار	نتائج الاختبار	حدود المواصفات	المواصفة * [16-17-18]
الغرز (Penetration Test) (25 °C)100g,5sec , (0.1mm)	**66.5**	60-70	ASTM D5
نقطة التميع (Softening Point Test) (°c)	**49.2**	56-48	ASTM D36
الاستطالة (Ductility) (25 °C) 5cm/min ,**cm**	**137**	min 100	ASTM D113
نقطة الوميض والاشتعال (Flash and Fire Point rest) (Cleveland cup open) (C°)	**درجة الوميض 252** **درجة الاشتعال 276**	min (230)	ASTM D92
الوزن النوعي g/cm3	**1.03**	1.01-1.03	ASTM D70
دليل الغرز (PI)	**-0.725**	-	-
النقص في الوزن (LOSS On Heating) (%)	**0.47**	Max 0.8	ASTM D1754

*بالإضافة إلى المواصفات العامة للطرق والجسور – سوريا (2002).

يمثل دليل الغرز(Penetration Index) PI مقياسا كميا لاستجابة الاسفلت للتغير في درجة الحرارة. ومن خلال معرفة دليل الغرز لإسفلت معين، من الممكن التنبؤ بسلوكه عند الاستخدام. لذلك، يتم استخدام الروابط الإسفلتية ذات الغرز المرتفع (تسمى "لينة أو

طرية") في المناخات الباردة بينما تستخدم المواد الرابطة الإسفلتية ذات الغرز المنخفض (تسمى "صلبة أو قاسية") في المناخات الدافئة.

توجد عدة معادلات تحدد الطريقة التي تتغير بها اللزوجة مع درجة الحرارة. من أشهرها تلك التي طورها فايفر وفان دورمال والتي تنص :

$$\log P = AT + K$$

where

A = The temperature susceptibility

P = Penetration at temperature T

K = Constant

A : الحساسية الحرارية

P : الغرز في درجة الحرارة T

K: ثابت

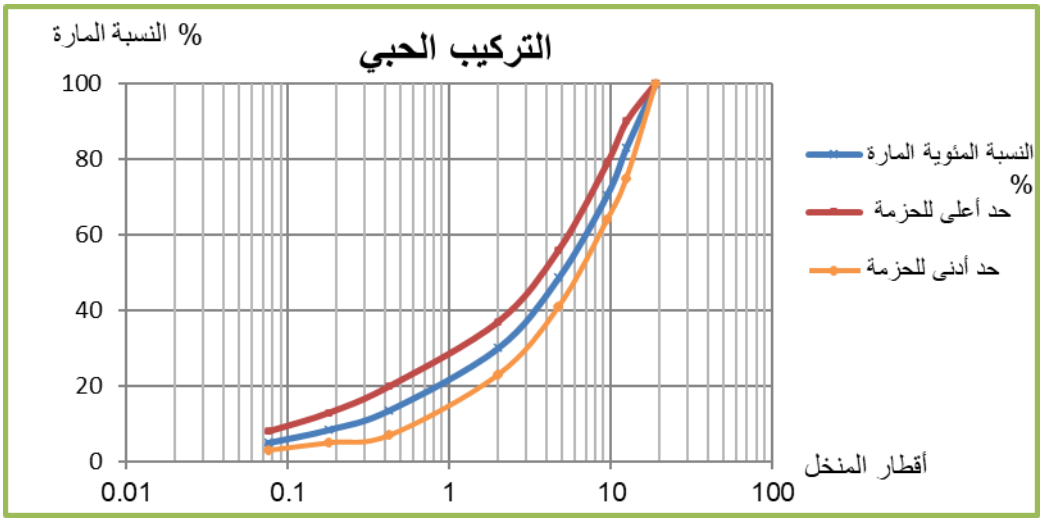
تمّ تطوير مجموعة من العلاقات اعتماداً على العلاقة العامة للحساسية الحرارية واشهر معادلة لايجاد دليل الغرز هي :

$$PI = \frac{1952 - 500 \log pen - 20 \text{ softening point}}{50 \log pen - \text{softening point} - 120}$$

تبيّن نتائج الجدول (1) أنّ الإسفلت المستخدم في الدراسة هو من الصنف (60-70) ، و يحقق المتطلبات الفنية المنصوص عنها في الشروط والمواصفات الفنية للطرق والجسور الصادر عن وزارة النقل العام 2002 ، بالإضافة إلى اشتراطات ASTM.

6-2- خواص الحصويات المستخدمة في الدراسة :

أجري على الحصويات المستخدمة وفق المواصفات السورية لاعمال الطرق والجسور – 2002 التدرج (1) المقاس الأعظمي 19 مم الخاص بطبقة الاهتراء التجارب المطلوبة عند تصميم الخلطات الإسفلتية الساخنة ، وأعطت النتائج المبينة في الشكل (3) والجدول (2) التاليين:



الشكل (3) منحني التركيب الحبي للحصويات المكسرة المستخدمة في الدراسة.

الجدول (2) نتائج اختبارات الحصويات المكسرة المستخدمة في الدراسة

الاختبار		نتائج الاختبار	المواصفة *
فاقد الاهتراء وفق لوس انجلوس (%) Los Angeles abrasion		**23**	ASTM C 131
المكافئ الرملي (%) Sand Equivalent		**76**	ASTM D 2419
الامتصاص (%)	الحصويات الخشنة	**0.84**	ASTM C127
الوزن النوعي الحجمي G_{sb} g/cm3		**2.596**	
الوزن النوعي المشبع جاف السطح G_{ssd} g/cm3		**2.618**	
الوزن النوعي الظاهري G_{sa} g/cm3		**2. 654**	
الامتصاص (%)	الحصويات الناعمة	**1.25**	ASTM C128
الوزن النوعي الحجمي G_{sb} g/cm3		**2.581**	
الوزن النوعي المشبع جاف السطح G_{ssd} g/cm3		**2.613**	
الوزن النوعي الظاهري G_{sa} g/cm3		**2. 667**	

نلاحظ من معطيات الجدول (2) والشكل (3) أنّ الحصويات المستخدمة في تصميم الخلطة الإسفلتية محققة للمواصفات الفنية المنصوص عنها في الشروط والمواصفات الفنية للطرق والجسور الصادرة عن وزارة النقل عام 2002، ومواصفات ASTM .

6-3- تأثير إضافة الغرافيت في الرابط الإسفلتي :

لقد تمت دراسة تأثير الغرافيت في خواص الإسفلت الأساسية من جهة، وفي دلائل التقادم من جهة ثانية وفق الآتي :

أ- تأثير إضافة الغرافيت في خواص الإسفلت:

بعد التحقق من صنف الإسفلت المستخدم (60-70) وتحديد خواصه، تمّ تعديله بأربع نسب مختلفة من الغرافيت، وتشكيل عينات منه و إجراء اختبارات الغرز ونقطة التمييع عليه، و إيجاد دليل الغرز له.

و نبيّن في الجدول (3) والشكل (4) نتائج الاختبارات التوصيفية للإسفلت المعدل بنسب مختلفة من الغرافيت.

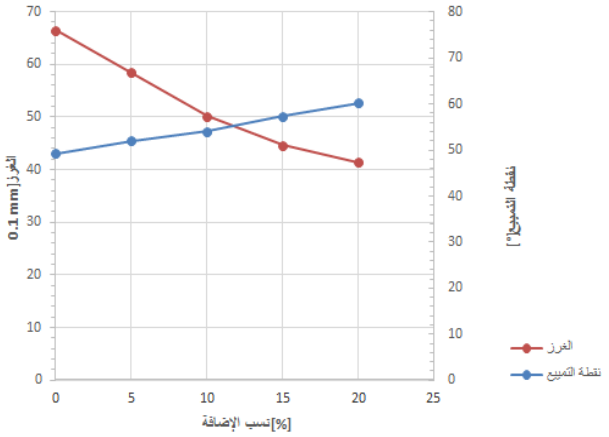
الجدول (3) نتائج توصيف الإسفلت المعدل بالغرافيت.

	نسب الإضافة من الغرافيت			
الاختبار	5%	10%	15%	20%
الغرز (25°C)	58.5	50.2	44.7	41.4
نقطة التمييع (°C)	52	54.1	57.3	60.2
دليل الغرز PI	-0.340	-0.221	0.202	0.609
الاستطالة (cm)	76	42	35	29

تظهر نتائج الجدولين (1) و (3) والشكل (4)، التالي:

- انخفاض الغرز مع زيادة نسبة الغرافيت المضافة ، حيث بلغت نسبة الانخفاض في الغرز (37.7 %) عند تعديل الإسفلت بنسبة (20 %) من الغرافيت.
- ارتفاع قيمة نقطة التمييع مقارنة مع نقطة التمييع للإسفلت غير المعدل (22.4 %) مقارنة مع نقطة التمييع للرابط الإسفلتي غير المعدل،

- ارتفاع قيمة دليل الغرز مع زيادة نسبة الاضافة وانتقالها من القيمة السالبة إلى الموجبة، مما يشير إلى تحسن في الحساسية الحرارية.



الشكل (4) نتائج الغرز ونقطة التمييع للإسفلت المعدل بالغرافيت.

ب- تأثير إضافة الغرافيت في تقادم الرابط الإسفلتي:

ولتحديد تأثير التقادم في خواص الرابط الإسفلتي تستخدم منهجية تقييم درجة تقادم المواد الرابطة الإسفلتية من خلال قياس خصائص (فيزيائية أو كيميائية أو ريولوجية) مثل الغرز ودرجة حرارة الكرة والحلقة (نقطة التمييع) واللزوجة ونقصان الوزن قبل وبعد التقادم الموضحة في الجدولين (4) و(5) .

الدلائل المستخدمة في هذه الدارسة هي دليل تقادم الغرز (PAI) ودليل نقطة التمييع (SAI):

$$PAI = \frac{Aged\ Pen}{Un\ Aged\ Pen} * 100$$

$$SAI = SP_{after} - SP_{befor}$$

$$DAI = \frac{DAI_{after}}{DAI_{befor}}$$

حيث أنّ:

PAI:دليل التقادم للغرز (Penetration Aging Index).

Aged Pen : الغرز بعد التقادم.

Un Aged Pen : الغرز قبل التقادم.

SAI : دليل نقطة التميع (Softening Point Aging Index).

SP_{after} : نقطة التميع بعد التقادم.

SP_{befor} : نقطة التميع بعد التقادم.

DAI : دليل الاستطالة

DAI_{befor} : الاستطالة قبل التقادم

DAI_{after} : الاستطالة بعد التقادم

وتبين النتائج الواردة في الجدولين(4) و(5) التقادم قصير وطويل الأمد للإسفلت المعدل بالغرافيت.

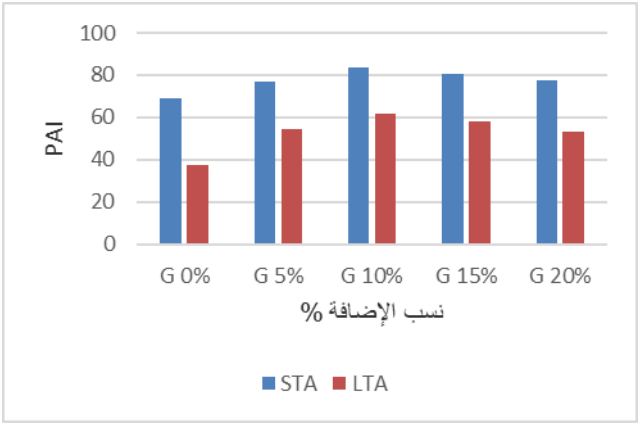
الجدول (4) نتائج التقادم قصير الأمد للإسفلت المعدل بالغرافيت.

	نسب الإضافة من الغرافيت			
الاختبار	5%	10%	15%	20%
النقص في الوزن (%)	0.4	0.36	0.3	0.24
الغرز (25°C)	45	42	36	32
نقطة التمييع (°C)	55.3	57.2	60.6	63.5
الاستطالة (cm)	57	34	23	18
PAI	76.9	83.7	80.5	77.3
SAI	3.3	3.1	3.3	3.3
DAI	75.00	80.95	65.71	62.07

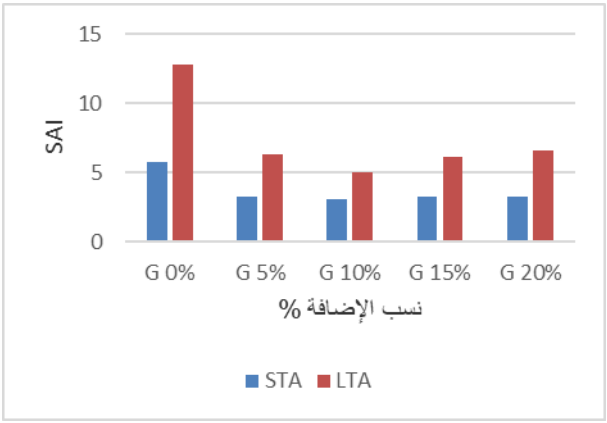
الجدول (5) نتائج التقادم طويل الأمد للإسفلت المعدل بالغرافيت.

	نسب الإضافة من الغرافيت			
الاختبار	5%	10%	15%	20%
الغرز (25°C)	32.0	31.0	26.0	22.0
نقطة التمييع (°C)	58.3	59.1	63.4	66.8
PAI	54.7	61.8	58.2	53.1
SAI	6.3	5.0	6.1	6.6

ويظهر الشكلين (5) و (6) علاقات تغير دليلي التقادم PAI و SAI بدلالة نسبة الغرافيت المضافة.



بالغرافيت الشكل (5) نتائج دليل تقادم الغرز للإسفلت المعدل.



الشكل (6) نتائج دليل تقادم نقطة التمييع للإسفلت المعدل بالغرافيت.

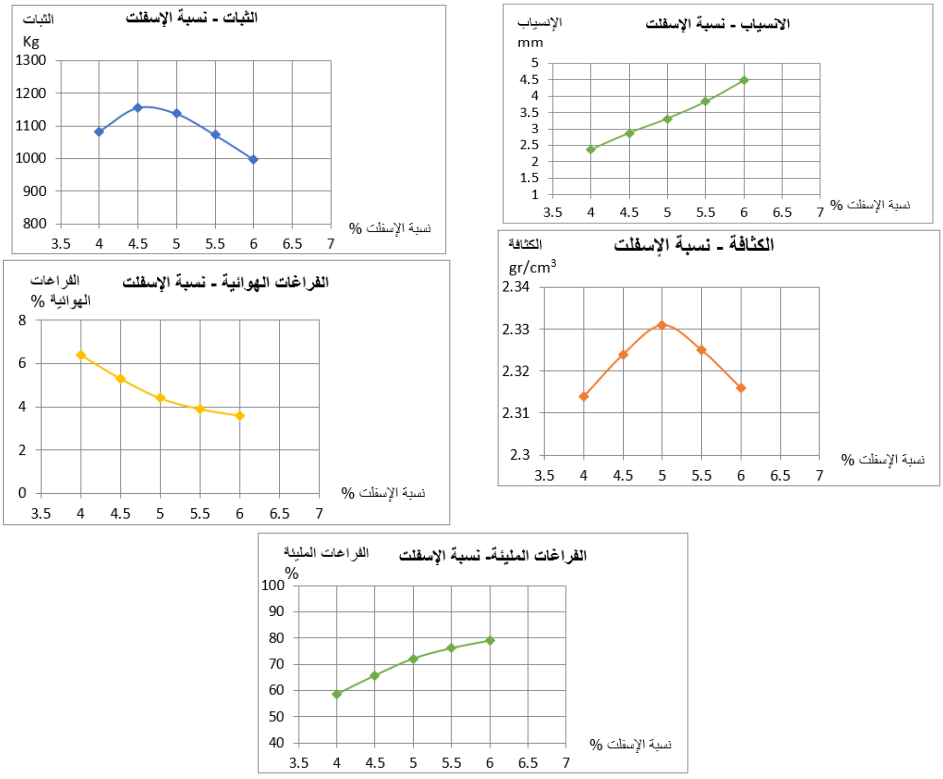
نلاحظ من معطيات الشكلين (5) و (6) ارتفاع قيمة دليل الغرز PAI تبعا لنسبة الإضافة من الغرافيت، ويقابله انخفاض في دليل نقطة التمييع، وبالتالي نقصان الفرق في درجة حرارتها خلال فترة التقادم، وهو مؤشر إيجابي. تمّ التوصل من النتائج المعروضة سابقاً، إلى أن النسبة المثالية للإضافة، والتي عندها يكون الرابط الإسفلتي مقاوماً لظروف التقادم قصير وطويل الأمد، هي (10 %)، حيث يبلغ دليل تقادم الغرز (PAI) عندها أعلى قيمة، مقارنة مع نتائج باقي النسب (كلما اقتربت النسبة من (100) تكون الإضافة فعالة بشكل أكبر في مقاومة التقادم) ، كما تظهر نتائج دليل تقادم نقطة التمييع التحسن ذاته عند النسبة (10 %).

6-4- نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية المرجعية:

بعد القيام بتوصيف الإسفلت والحصويات والتحقق من مواصفاتها الفنية، نبين في الجدول (6) و الشكل (7)، نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية المرجعية، وذلك باستخدام طريقة مارشال المعتمدة في سورية.

الجدول (6) نتائج تصميم الخلطة الإسفلتية المرجعية.

نسبة الإسفلت	كثافة مارشال gr/cm^3	كثافة أعظمية gr/cm^3	الفراغات الهوائية %	الفراغات الحصوية %	الفراغات المليئة %	الثبات Kg	الانسياب mm
4.0	2.314	2.472	6.4	15.37	58.45	1082	2.36
4.5	2.324	2.454	5.3	15.45	65.71	1156	2.87
5.0	2.33	2.436	4.4	15.68	72.15	1138	3.31
5.5	2.325	2.419	3.9	16.30	76.17	1072	3.83
6.0	2.316	2.402	3.6	17.07	79.06	996	4.48



الشكل (7) منحنيات مارشال للخلطة الإسفلتية المرجعية.

من النتائج السابقة، وبالاعتماد على منحنيات مارشال، تم تحديد نسبة الاسفلت المثالية (5.0 %)، كمتوسط لنسبة الاسفلت التي تحقق أكبر قيمة للثبات وأعظم كثافة ، بالإضافة الى نسبة فراغات هوائية قدرها (4%) .

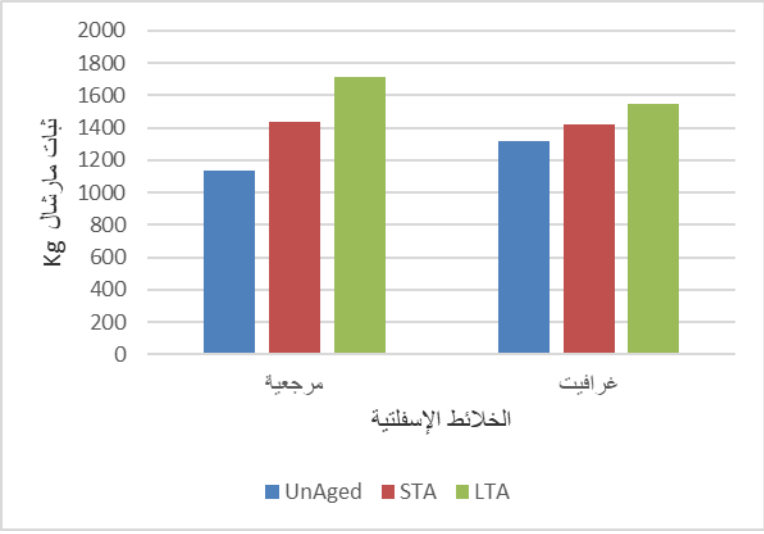
6-5- تأثير إضافة الغرافيت في تقادم الخلطة الإسفلتية:

6-5-1- تأثير إضافة الغرافيت في خصائص ثبات مارشال :

تم اجراء اختبار مارشال على عينات من خلائط معرضة لتقادم قصير وطويل الأمد وفق منهجية التقادم المبينة سابقاً، وإدراج النتائج في الجدول (7) وتمثيلها في الشكل (8). تشير النتائج إلى أن عملية التقادم تؤثر بشكل كبير في ثبات مارشال، حيث تعطي الخلائط المعرضة لفترات التقادم قصير وطويل الأمد قيم ثبات أكبر، مقارنة مع الخلطة المرجعية. ويعود السبب في ذلك إلى تحول المالتين إلى إسفلتين، وفقدان بعض مركبات الزيوت الطيارة، وبالتالي زيادة لزوجة الإسفلت، مما يؤدي إلى زيادة في القوة الرابطة بين مكونات الخرسانة الإسفلتية وجعلها أقل عرضة للتشوه اللدن وأكثر ثباتاً. تبين النتائج أن ثبات مارشال يزداد بنسبة (25.9 %) عند التقادم قصير الأمد، و بنسبة (51 %) عند التقادم طويل الأمد، وذلك للخلطة المرجعية. أما بالنسبة للخلطة المعدلة فيلاحظ أن لإضافة الغرافيت بالنسبة المثالية تأثير في الحد من عملية التقادم، حيث يزداد بنسبة (8.0 %) عند التقادم قصير الأمد، و بنسبة (17.2 %) عند التقادم طويل الأمد .

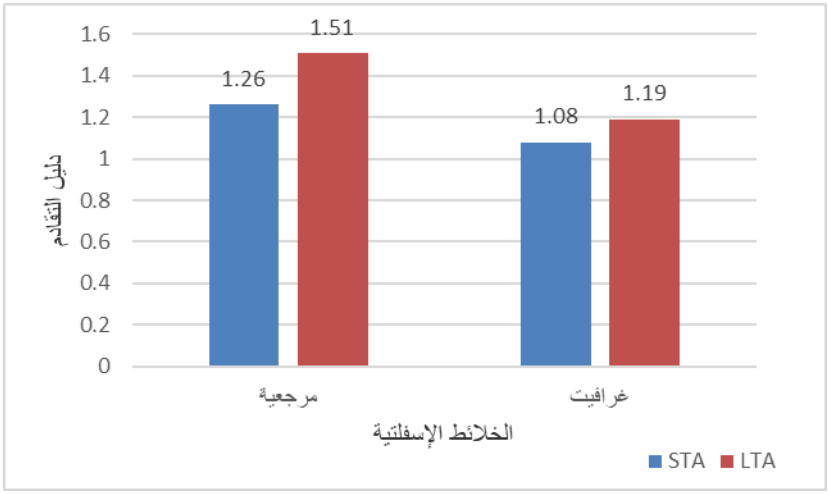
الجدول (7) نتائج ثبات مارشال ودلائل التقادم للخلائط الإسفلتية

الخلطة	الخلطة المرجعية (غير معدلة)	الخلطة المعدلة بالغرافيت
عينات غير متقادمة UnAged	1138	1318
عينات معرضة للتقادم قصير الأمد STA	1433	1423
عينات معرضة للتقادم طويل الأمد LTA	1718	1545
دليل التقادم قصير الأمد	1.26	1.08
دليل التقادم طويل الأمد	1.51	1.19



الشكل (8) نتائج ثبات مارشال للخلائط الإسفلتية.

استنادا إلى نتائج الثبات، تمّ حساب دليل التقادم قصير وطويل الأمد (الثبات بعد التقادم بالنسبة للثبات المرجعي قبل التقادم)، وذلك للخلطات غير المعدلة بالغرافيت والأخرى المعدلة منه بالنسبة المثالية وأدرجت النتائج في الجدول(7) ومثلت في الشكل (9). يلاحظ من النتائج انخفاض دليل التقادم بشكل واضح للخلائط المعدلة بالغرافيت مقارنة مع الخلطة المرجعية، حيث بلغ (1.08) في حالة التقادم قصير الأمد في حين وصل إلى (1.19) في حالة التقادم طويل الأمد. ويشير اقتراب دليل التقادم من الواحد إلى فعالية الغرافيت في الحد من تأثير التقادم على خواص الخلطة الإسفلتية.



الشكل (9) دليل تقادم الخلائط الإسفلتية (الثبات).

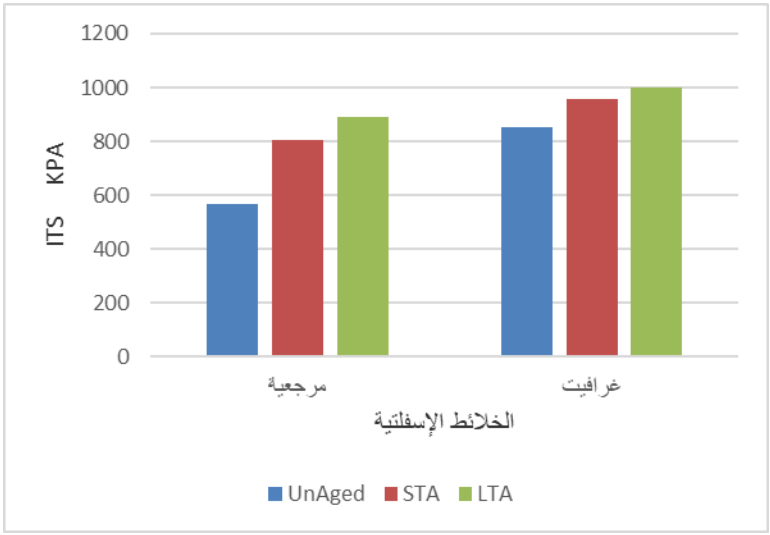
6-5-2- تأثير الإضافة الغرافيت في الشد غير المباشر:

تم تنفيذ اختبار الشد غير المباشر ITS في ظروف درجة حرارة 25 درجة مئوية [15] على عينات من الخلائط الإسفلتية المرجعية والمعدلة بالغرافيت وفي ظروف طبيعية وظروف تقادم قصير و طويل الأمد، ودونت النتائج في الجدول (8) ومثلت في الشكلين

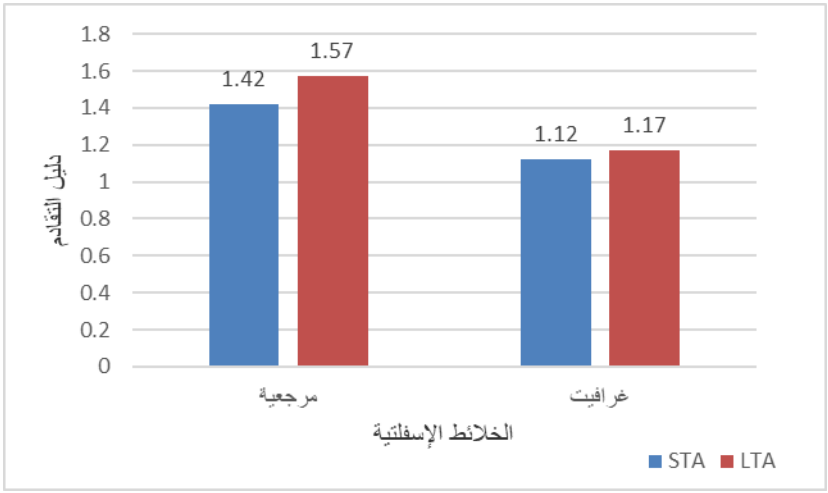
(10) و(11). ويظهر من النتائج تأثير فعالية الغرافيت في تحسين خواص الخلطة لمقاومة التقادم ، حيث بلغت نسبة التحسن في مقاومة التقادم قصير الأمد (12 %) وبنسبة (17 %)، وهذا ما يتفق مع النتائج التي توصلنا إليها عند حساب دليل الثبات كما ينسجم مع نتائج دليل التقادم في الحالتين. حيث بلغ نسبة التحسن في نتائج دليل التقادم (21.1 %) في حالة قصير الأمد و بنسبة (25.5%) في حالة طويل الأمد .

الجدول (8) نتائج الشد غير المباشر ودلائل التقادم للخلائط الإسفلتية

الخلطة	الخلطة المرجعية (غير معدلة)	الخلطة المعدلة بالغرافيت
عينات غير متقادمة UnAged	567	854
عينات معرضة للتقادم قصير الأمد STA	805	956
عينات معرضة للتقادم طويل الأمد LTA	890	999
دليل التقادم قصير الأمد	1.42	1.12
دليل التقادم طويل الأمد	1.57	1.17



الشكل (10) نتائج الشد غير المباشر للخلائط الإسفلتية



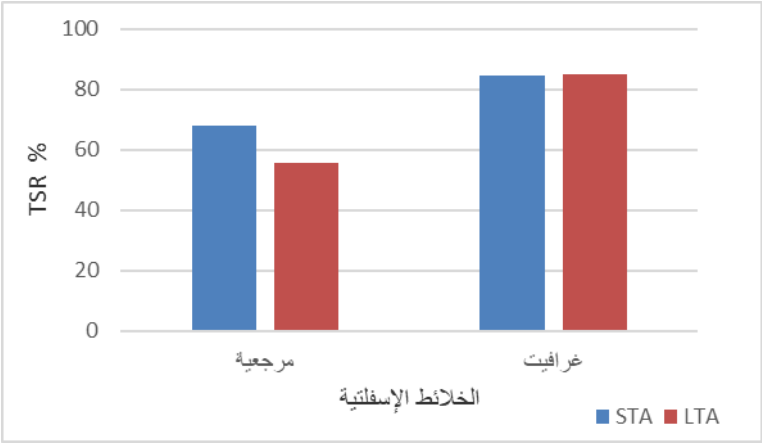
الشكل (11) دليل تقادم الخلائط الإسفلتية (الشد غير المباشر)

6-5-3-تأثير إضافة الغرافيت في حساسية الخلطة الإسفلتية للرطوبة:

بالنسبة لتأثير إضافة الغرافيت في فعالية مقاومة الخلطة لضرر المياه بعد عملية التقادم، فقد بينت النتائج المبينة في الجدول(9) والممثلة في الشكل (12) تحسنها بنسبة (24.4 %) في حالة التقادم قصير الأمد، وبنسبة (53 %) في حالة طويل الأمد . ويعتبر تأثير إيجابي جداً في مقاومة ضرر المياه للخلائط الإسفلتية، وبالتالي الحد من ظهور الشقوق في سطح الرصف الإسفلتي .

الجدول (9) نتائج اختبار حساسية الرطوبة TSR للخلائط الإسفلتية

الاختبار	خلطة مرجعية	الخلطة المعدلة بالغرافيت بنسبة(10%)
عينات معرضة للتقادم قصير الأمد STA	68	84.6
عينات معرضة للتقادم طويل الأمد LTA	55.7	85.2



الشكل (12) حساسية الخلائط الإسفلتية لمقاومة ضرر الرطوبة (TSR)

7- الاستنتاجات والتوصيات :

أ- الاستنتاجات:

أجري هذا البحث بهدف دراسة تأثير إضافة الغرافيت على تقادم الخلائط الإسفلتية الساخنة في ظروف التقادم قصير وطويل الأمد. و بناءً على نتائج التجارب المخبرية على عينات الخلائط الإسفلتية، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية :

- تعتبر إضافة نسبة (10 %) من مسحوق الغرافيت إلى الخليط الإسفلتي هي نسبة مثالية لتحسين مقاومته لظاهرة التقادم، والتخفيف من التأثير السلبي في خواص الرابط نتيجة التأثيرات الحرارية .
- تشير النتائج إلى أن عملية التقادم تؤثر بشكل كبير في ثبات مارشال ، حيث أن الخلائط المعدلة بالغرافيت المعرضة لفترات التقادم قصير وطويل الأمد تعطي قيم ثبات أكبر مقارنة مع الخلطة المرجعية .
- بينت النتائج فعالية إضافة الغرافيت بنسبة (10 %) في تحسين مقاومة الخلطات المعدلة للظاهرة التقادم حيث بلغ نسبة التحسن في نتائج دليل التقادم (21.1 %) في حالة قصير الأمد و بنسبة (25.5%) في حالة طويل الأمد .
- إن لإضافة الغرافيت تأثير إيجابي في زيادة مقاومة الخلائط الإسفلتية لضرر الرطوبة وخاصة بعد التعرض للتقادم مقارنة مع الخلطة المرجعية ، حيث بلغت نسبة التحسين (24.4 %) في حالة التقادم قصير الأمد و بنسبة (52.9 %) في حالة التقادم طويل الأمد .

ب- التوصيات:

استكمال الدراسات حول تأثير الغرافيت في خواص أخرى للخلطة الإسفلتية مثل مقاومة التخدد والشقوق ...الخ.

- المراجع :

1- Airey, G. D. (2003) **"State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials"**. International Journal of Pavement Engineering, 4(3), 2003, pp. 165-176

2- Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Rubio-Gámez, M. C. (2018)**"Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review"**. Construction and Building Materials, 192, 2018, pp. 593–609

3- Bell, C.A., Weider, A.J. and Fellin, M.J.(1994) **"Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures: Field Validation"**, Oregon State University Corvallis, OR 97331, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-390, National Research Council, Washington, DC 1994.

4- Baek, C., Underwood, S. and Kim, Y.R.(2014) "**Effects of Oxidative Aging on Asphalt Mixture Properties"**, TRB Annual Meeting, 2012.

5- Brown, K., Roberts, K. and Lee, K.(2009) "**Hot Mix Asphalt Material, mixture design and construction"**, 3rd Edition, National Asphalt Pavement Association, (2009).

6- Azari, H. (2011) **"Analysis of the Effect of Laboratory Short-Term Conditioning on Mechanical Properties of Asphalt Mixture"**, Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Washington DC 2011 Report Number 11-1427.

7- Gamarra, A. and Ossa, E. A. (2018)**"Thermo-oxidative aging of bitumen"**. International Journal of Pavement Engineering, 19(7), 2018, pp. 641–650.

8- Lin, J., Hong, J., Liu, J. and Wu, S. (2016) "**Investigation on physical and chemical parameters to predict long-term aging of asphalt binder"**. Construction and Building Materials, 122, 2016, pp. 753–759.

9- Pan, P.; Wu, S.; Xiao, Y.; Wang, P.; Liu, X. (2014).**"Influence of graphite on thermal properties and**

anti-aging properties of asphalt binder", Construction and Building Materials 68: 220–226. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.069

10- Yao, H.; Dai, Q.; You, Z.; Ye, M.; Yap, Y. K. (2016)" **Rheological properties, low-temperature cracking resistance, and optical performance of exfoliated graphite nanoplatelets modified asphalt binder"**, Construction and Building Materials 113: 988–996. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.152

11- Liu XM, Wu SP, Ye QS, Qiu J, Li B. (2008) **"Properties evaluation of asphalt-based composites with graphite and mine powders"**. Constr Build Mater 2008; 22(3):121–6.

12- Liu XM, Wu SP. (2011) **"Study on the graphite and carbon fiber modified asphalt concrete"**. Constr Build Mater 2011; 25(4):1807–11. https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.082

13- Lopes, M., Zhao, D., Chailleux, E., Kane, M., Gabet, T., Petiteau, C. and Soares, J. (2014) **"Characterization of ageing processes on the asphalt mixture surface"**. Road Materials and Pavement Design, 15(3), 2014, pp. 477–487.

14- AASHTO Designation R30. **STANDARD PRACTICE FOR MIXTURE CONDITIONING OF HOT MIX ASPHALT**.

15- ASTM Designation D6931-07. **Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixture**.

16- ASTM-D5-06 Designation. **Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials.**

17- ASTM D36/D36M Designation. **Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)**.

18- ASTM D2872-04 Designation **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).**