مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (6) العدد(10) 2022
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (6) No. (10) 2022

تأثير الغرافيت في سلوك تقادم الرابط الاسفلتي

د. فايز سليمان *
د. بسام سلطان **
د. باسم علي ***
م. نغم طالب ****

(تاريخ الإيداع 2021/11/17 . قُبِل للنشر في 2022/11/6)

□ ملخّص□

يؤثر التعرض للأكسجين والأشعة فوق البنفسجية وتغيرات درجة حرارة الهواء في الإسفلت، وبالتالي في طبقة المجبول الأسفلتي، وذلك من خلال أكسدة وفقدان مكوناته المتطايرة، مما يؤدي الى تغيير تركيبها الجزيئي. تسمى هذه العملية بالتقادم او الشيخوخة (Aging)، وتتسبب في تغيير الخصائص الكيميائية والفيزيائية والريولوجية للإسفلت، مما يؤثر في عمره. وعند حصول التقادم يصبح الرابط أكثر صلابة وهشاشة وعرضة للتشقق والتعرية، وبالتالي انخفاض الديمومة وفترة الخدمة للطبقة الإسفلتية.

و يعتبر البحث في آليات منع التدهور في خواص المجبول الأسفلتي بفعل تغير درجات الحرارة، ومنها استخدام الإضافات لتحسين مقاومته للتأثيرات الضارة الناتجة عنه، من المواضيع الهامة. يهدف البحث إلى تسليط الضوء على استخدام الغرافيت كمادة مضادة لتقادم الرابط الأسفلتي. ولقد تمّ في هذا البحث إجراء دراسة مخبرية لتأثير إضافة الغرافيت في بنية الرابط الأسفلتي من خلال اختبار تقادم الرابط الأسفلتي الأساسي غير المعدل، وكذلك المعدل منه بإضافات من مادة الغرافيت بنسب معينة. ولتحقيق المطلوب تمّ إجراء الدراسة على عينات غير معدلة من الإسفلت و أخرى معدلة بالغرافيت بنسب تتراوح (5–10–15–20)% وزنا من الرابط الأسفلتي، وتحديد تأثير التقادم قصير وطويل الأمد في خواص الرابط الأسفلتي، و إيجاد مؤشراته. ولقد أظهرت النتائج أن إضافة مادة الغرافيت تحسن من مقاومة الرابط الأسفلتي لظاهرة التقادم وتخفف من التأثير السلبي في خواصه، وأنّ النسبة المثالية تبلغ (10%).

الكلمات المفتاحية : الإسفلت – التقادم قصير الأمد – التقادم طويل الأمد – الغرافيت – الغرز

* أستاذ في قسم هندسة المواصلات و النقل من كلية الهندسة المدنية بجامعة البعث.
** أستاذ مساعد في قسم هندسة المواصلات و النقل من كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين.
*** مدرس في كلية الهندسة المدنية بالجامعة العربية الدولية.
**** طالبة الدراسات العليا (دكتوراه) في قسم هندسة المواصلات و النقل من كلية الهندسة المدنية بجامعة البعث.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (6) العدد(10) 2022
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (6) No. (10) 2022

Effect of graphite on the aging behavior of asphalt binder

(Received 17/11/ 2021 . Accepted 6/11/ 2022)

□ ABSTRACT

Exposure to oxygen, ultraviolet rays and changes in air temperature affect the asphalt and thus the asphalt mixture layer, through the oxidation and loss of its volatile components, and thus its molecular structure will change. This process is called aging, and it causes a change in the chemical, physical and rheological properties of asphalt, which affects its life. When aging occurs, the binder becomes more stiff , but more brittle and exposed to cracks and erosion, thus reducing the durability and service life of the asphalt layer.

Research on the mechanisms of preventing the deterioration of the properties of asphalt due to temperature, including thermally conductive materials to improve its resistance to the harmful effects resulting from it, is an important topic. The research aims to shed light on the use of graphite as an anti-aging material for asphalt binder. In this research, a laboratory study was conducted of the effect of adding graphite on the structure of the asphalt binder by testing the aging of the unmodified asphalt binder, as well as the modification of it with additions of graphite in certain proportions. To achieve what was required, the study was conducted on unmodified samples of asphalt and others modified with graphite at rates ranging (5-10-15-20) by weight of the asphalt binder, and to determine the effect of short and long-term aging on the properties of the asphalt binder, and to find its indicators. The results showed that the addition of graphite improves the resistance of the asphalt to the phenomenon and reduces the resistance of binder to the phenomenon of aging and reduces the negative impact on its properties, and the optimum ratio is (10%).

Keywords: Asphalt - short-term aging - long-term aging – graphite – penetration

1- مقدمة :

تبدي العوامل المناخية والحمولات المارة على الطرق تأثيراً كبيراً في الرصف، وخصوصاً في الطبقة السطحية منه، وينعكس هذا التأثير من خلال حالات عجز أو عيوب تظهر على السطح كالتشققات والأخاديد والهبوطات، بالإضافة إلى هشاشة وقساوة في بعض الأماكن، تفقد الطبقة السطحية مرونتها، وبالتالي تتعرض إلى التشقق والانهيار.

ولا شك أنّ هذه العيوب تخفض إلى درجة كبيرة من مستوى الخدمة للطرق، وبالتالي ازدياد في تكاليف الاستثمار إلى درجة كبيرة. ولقد شكلت هذه العيوب مواد دراسية للكثير من الباحثين، ومنها بحثنا هذا، وذلك بهدف الحد من حصولها وتحسين مستوى الخدمة وزيادة عمر الرصف، وتخفيض تكاليف استثماره.

2- إشكالية البحث :

تفقد المواد الرابطة الإسفلتية، عند تعرضها إلى التغيرات المناخية، الكثير من خواصها، وذلك بفعل تأكسد وتطاير المواد الراتينجية والعطرية الداخلة في تركيبها. ويتزايد هذا الفعل مع الزمن في مرحلة الاستثمار لدرجة يتحول خلالها الرابط إلى مادة هشة وقاسية قابلة للتشقق، تسمح بالتالي في تخفيض الخواص الاستثمارية للرصف من جهة وفقدان الكثافة من جهة ثانية، الأمر الذي يؤدي بالنتيجة إلى انخفاض ديمومة الرابط وبالتالي عمر الرصف.

تسمى عملية فقدان المواد الرابطة لبنيتها الأساسية بفعل الحرارة بشكل أساسي بظاهرة التقادم. ويشكل تناول هذه الظاهرة في الدراسة، للحد من تسارع حصولها وزيادة عمر الرصف، بحثاً جديراً في الاهتمام.

3- هدف و أهمية البحث :

يقع هذا البحث في مجال هندسة المواصلات والنقل (مواد طبقات الرصف الطرقي المرن)، ويختص في مجال دراسة سلوك الرابط الأسفلتي تحت تأثير التقادم. ويهدف إلى تسليط الضوء على استخدام الغرافيت كمادة مقاومة لتقادم الرابط الأسفلتي، وبالتالي زيادة ديمومة الخلطة الاسفلتية الساخنة المستخدمة في طبقات التغطية الطرقية المرنة.

وتبرز أهمية البحث من خلال التوصل لتحديد تأثير إضافة الغرافيت في خواص تقادم الرابط الأسفلتي بهدف الحد من تأثير عملية التقادم، وبالتالي المساهمة في حل بعض المشاكل المتعلقة بالخصائص الفنية والاقتصادية للخلطات الإسفلتية الحارة لجهة زيادة عمرها، وبالتالي تحقيق وفورات في المواد والمال والطاقة في مجال بناء الطرق وصيانتها.

4-مواد البحث ومنهجيته:

4-1- مواد البحث:

1- الإسفلت:

تم استخدام إسفلت 60/70 الناتج عن تكرير النفط في مصفاة بانياس، واختباره وفق المواصفات السورية.

2- الغرافيت (Graphite) :

استخدم في الدراسة عينات من الغرافيت تتصف بالآتي:

- الحبيبات مارة من المنخل (No. 200) (0.075mm) .
- محتوى الكربون لا يقل عن (85 %) .
- الرطوبة (0.6%).
- الكثافة ($2.1 gr/cm^3$) .
- اللون أسود رمادي داكن ذو مظهر دهني، ويترك ملمسه لطخات سوداء على الأصابع.

ويبين الشكل (1) نموذج من عينة الغرافيت المستخدمة في البحث.

الشكل (1) نموذج عينات الغرافيت المستخدمة في الدراسة

4-2 منهجية البحث:

4-2-1 الدراسات النظرية:

4-2-1-1 دراسة معرفية حول الإسفلت وخواصه:

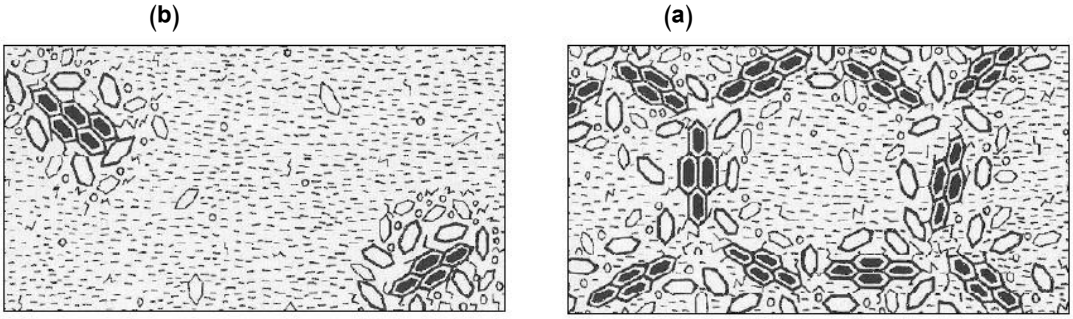
يعرف الإسفلت بأنه مادة يمكن أن تكون سائلة ذات لون أسود عالية اللزوجة أو شبه صلبة ، تتكون من مركبات هيدروكربونية عطرية متعددة الحلقات وشديدة التكثيف، تذوب بصورة كاملة في محلول ثاني كبريتيد الكربون (CS2). ويتكون من الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات شديدة التكثيف. يمكن تقسيمها إلى عائلات كيميائية مكونة من المواد المشبعة والعطريات والراتنجات والأسفلتين [1-2].

ولقد تم استخدام الاسفلت على نطاق واسع كمادة رابطة للحصويات في رصف الطرق بسبب خصائصها اللزجة المرنة الجيدة. يمكن أن يتوفر بشكل صناعي كناتج تكرير البترول، أو بشكل "طبيعي" من بحيرات أو صخور ورمال مشبعة بالإسفلت .

يشكل الإسفلت نظام غروي مكون من ذرات إسفلتية عالية الوزن الجزيئي مشتتة أو مذابة في وسط زيتي منخفض الوزن الجزيئي [2] . وتعتبر الطبيعة الغروية للإسفلت مسؤولة عن تأثير الزمن في تشوه هذه المادة.

واعتمادا على كمية الراتنجات والعطريات، يمكن أن يكون للإسفلت بنية بشكل محلول Solution (SOL)، أو هلام Gelatinous (GEL)، كما هو مبين في الشكل(2). تسمح البنية الأولى (SOL) للإسفلت بأن يتصرف كمائع نيوتني عند درجات حرارة عالية، وكمادة صلبة لزجة عند درجات حرارة منخفضة. على العكس من ذلك ، يتصرف النوع الثاني من الإسفلت (GEL) كمائع غير نيوتني عند درجات حرارة عالية، وكمادة صلبة مرنة عند درجات حرارة منخفضة [1] [2].

ويوضح الشكل(2) بنية الأسفلت.



الشكل (2) بنية الإسفلت: (a) – النوعGEL ، (b) – النوع SOL .

تتمتع معظم انواع الإسفلت ببنية وسطية، وتعتمد خصائصها الريولوجية، إلى حد كبير، على تركيز الأسفلتين. ويتأثر سلوك الإسفلت أيضا بكمية الزيوت المشبعة ، لأنها تعزز قابلية ذوبان الأسفلتين في المارتين، كما تساعد في تلبد القوام. ومن وجهة نظر كيميائية ، يتكون الإسفلت من العناصر المبينة في الجدول (1) . ويعتمد التركيب الكيميائي للرابط الاسفلتي، بشكل عام، على مصدر النفط الخام وعلى عملية الإنتاج. ويكاد الوصف الكيميائي الكامل لهذه المادة مستحيلاً ، بسبب تعقيدها. ويؤدي هذا التعقيد إلى استحالة ربط الجوانب الكيميائية بالجوانب الريولوجية.

الجدول (1) التركيب الكيميائي للإسفلت الناتج عن تكرير البترول

العنصر	النسبة من الوزن، %
الكربون carbon	88- 82
الهيدروجين hydrogen	14- 8
الكبريت Sulphur	8- 0
الأوكسجين oxygen	2- 0
النتروجين nitrogen	1.5- 0

يؤثر التعرض للأكسجين والأشعة فوق البنفسجية والتغيرات في درجة حرارة الإسفلت، وبالتالي في طبقة المجبول الأسفلتي، وذلك بفعل أكسدة وفقدان المكونات المتطايرة، وحصول، بالنتيجة، تغيير في تركيبها الجزيئي . تسمى هذه العملية بالتقادم او الشيخوخة (Aging)، وتتسبب في تغيير الخصائص الكيميائية والفيزيائية والريولوجية للإسفلت، مثل انخفاض الغرز، زيادة قيمة نقطة التمييع، زيادة في اللزوجة، مما يؤثر في عمره. فعندما يتقادم الرابط يصبح أكثر صلابة، ولكنه أكثر هشاشة وعرضة للتشقق والتعرية، وبالتالي أقل ديمومة وعمر خدمة للطبقة المستخدم فيها[3] [4].

يخضع الأسفلت، وبالتالي المجبول الاسفلتي، بشكل أساسي، لعمليتي تقادم مختلفتين إلى حد كبير طوال فترة الخدمة [5] وهما :

أ- **التقادم قصير الأمد :** ويحصل، أثناء عملية انتاج ونقل وفرش المجبول الاسفلتي الساخن، نتيجة للحرارة المرتفعة الناتجة عن الخلط والتعرض بعدها للهواء، بفعل أكسدة وتطاير المواد النفطية الخفيفة الموجودة فيه.

ب- **التقادم طويل الأمد:** و يحدث بعد عملية الفرش، نتيجة استمرار أكسدة الرابط في درجات الحرارة المتوسطة لفترة طويلة تصل من (5–10) سنوات .

يعتبر التقادم بنوعيه قصير وطويل الأمد من الظواهر المعقدة، بسبب العديد من العوامل التي تؤثر في معدل حصوله. ويشكل الأسفلت جزءا مهما من مكونات الخلطة الاسفلتية، ويؤثر في أداء الرصف في درجات حرارة التشغيل المنخفضة والعالية حقلياً. وينتج عن التغيير الكيميائي، بفعل عملية الأكسدة، خليط أسفلتي أكثر صلابة وهشاشة ، مما يؤدي إلى حصول تشققات في درجات الحرارة المنخفضة، أو تشققات التعب، بالإضافة إلى أشكال أخرى من التشوهات.

و نظراً للزيادة المستمرة في حجم حركة المرور، والحمولات المحورية الثقيلة وتأثير درجة الحرارة، فإن طبقة الرصف الأسفلتي العادية تتعرض للتشقق والتخدد. لذلك ، ولزيادة ديمومة الطبقة السطحية وتخفيف تأثير التقادم، تستخدم إضافات مختلفة مثل البوليميرات أو الألياف أو المواد المالئة، لتعديل الأسفلت [4] [5] [6].

ونظراً للسلوك اللزج – المرن للمادة الرابطة الإسفلتية، فقد تتغير الخواص الميكانيكية للمجبول الاسفلتي بشكل كبير، بسبب التغيرات في درجات الحرارة اليومية والموسمية، حيث تصل درجة حرارة المجبول الأسفلتي إلى 70 درجة مئوية في الصيف بسبب معامل الامتصاص الحراري المرتفع لهذه المادة. وتتسبب هذه الحالة في تسريع عملية التقادم، وبالتالي تدهور في ديمومة طبقة الرصف الأسفلتي، مما يؤدي إلى حدوث التشوهات الدائمة في طبقة الرصف بفعل التأثير المشترك للحمولات المرورية و للأكسدة الحرارية [7].

4–2–1–2 دراسات مرجعية:

هناك طرق مختلفة لمنع التدهور الناتج عن درجات الحرارة المرتفعة في طبقة الرصف. ويعتبر استخدام المواد المضافةً من أجل تحسين مقاومة الرصف للتأثيرات الضارة لارتفاع درجة الحرارة، إحدى هذه الطرق. وبشكل عام أن تحسين التوصيل الحراري للخرسانة الإسفلتية يمكن أن يسهل عملية نقل الطاقة التي تحدث في الخرسانة الإسفلتية. ولقد أثبتت الدراسات السابقة أن إضافة مسحوق الغرافيت يساعد في تحسين التوصيل الحراري والتوصيل الكهربائي للخرسانة الإسفلتية. وبالمقارنة مع الخرسانة الإسفلتية التقليدية، تُظهر الخرسانة الإسفلتية المعدلة بالغرافيت مقاومة أفضل للتشوه الدائم و للتعب، ولكن مقاومة أسوأ لتأثيرات الرطوبة [13].

يعتبر الغرافيت من أشكال الكربون المستقرة، يمتاز بموصلية كهربائية جيدة ومقاومة حرارية مرتفعة، بالإضافة إلى خصائص كيميائية مستقرة وديمومة عالية، كما يعتبر خامل عند اختلاطه بأي مادة أخرى تقريبا. وتتنوع استخدامات الغرافيت، بسبب هذه الخصائص، على نحو كبير، علاوة على ثمنه الرخيص قياساً بألياف الكربون.

أظهر Du and Wang (2015) [9] أن استخدام الغرافيت مع قضبان معدنية في الخلطة الإسفلتية يمكن أن ينقل درجة الحرارة بنجاح إلى الطبقات السفلية. بينت النتائج أن درجة الحرارة انخفضت بمقدار (3.6 – 6.5 درجة مئوية) عند عمق 4 سم من السطح ، مما أدى إلى انخفاض التخدد بنسبة 43.5% .

و بين Liu وأخرون (2014) [10] أن استخدام 40% من الغرافيت مع 0.3% من ألياف الكربون يؤدي إلى زيادة بنسب 78% و 15% و 4% في المعامل الديناميكي وقوة الشد غير المباشر وثبات مارشال للخلائط الإسفلتية على التوالي.

قام Lu وأخرون (2008) [11] بإنتاج الخلطات الإسفلتية المعدلة باستخدام خبث الحديد الصلب كحصويات والغرافيت في الخلائط الإسفلتية ودرسوا خواصها. و توصلوا بنتيجة الدراسة إلى أن قيم ثبات مارشال والثبات الديناميكي للخلائط انخفضت قليلاً مع ارتفاع نسبة الغرافيت المضافة، لكنها بقيت تلبي المتطلبات القياسية.

أوصى Chen وأخرون (2016) [12] بإنشاء طبقات رصف معدلة حرارياً من أجل تحسين مقاومة التخدد وشقوق التعب.

وفي دراسة أخرى ، قام Pan وأخرون (2014) [13] بفحص الخصائص الحرارية للرابط الاسفلتي المعدل بالغرافيت، حيث وجد بالنتيجة أن الغرافيت يحسن الخصائص المضادة للتقادم.

درس Yao وأخرون (2016) [14] تأثيرات صفائح الغرافيت النانوية (graphite nanoplatelets) بنسبة (1−2%) في خصائص الرابط الأسفلتي. تم تحديد أن مجموعات التقادم(أسفلتيين، مالتين) تزداد في المادة الرابطة المعدلة من الغرافيت مما يؤدي إلى زيادة المقاومة للتخدد والضرر الناتج عن الرطوبة. كما تعمل صفائح الغرافيت النانوية أيضا على تحسين مقاومة الشقوق.

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 الاسفلتي المعدل بالغرافيت، وأيضاً في الخواص الميكانيكية للخلائط الإسفلتية .

4−2−1−3− دراسة عملية التقادم مخبرياً :

أ-التقادم قصير الأمد:

يعتبر اختبار الفرن الرقائقي الدوار (Rolling Thin Film Oven Test) (RTFOT) أحد الاختبارات المعيارية الأكثر استخداماً (EN 12607−1، ASTM D 2872) لمحاكاة التقادم قصير الأمد للرابط الأسفلتي ، ويمثل تعديل في اختبار فرن الطبقة الرقيقة التقليدي (TFOT). يستخدم هذا الاختبار لقياس التأثيرات المجتمعة للحرارة والهواء في طبقة رقيقة من الإسفلت، وبشكل متجدد نتيجة الدوران، حيث تضمن الحركة المستمرة عدم تطور طبقة ثابتة لحماية الإسفلت. يحاكي الاختبار التصلب الذي يخضع له الرابط الأسفلتي أثناء عمليات الخلط والنقل و الرص، ويمثل عملية التقادم (الشيخوخة Aging) على المدى القصير. يتضمن الاختبار تدوير ثماني عبوات زجاجية، تحتوي كل منها على (35 gr) من الإسفلت، في رف دوار عمودياً، مع نفخ الهواء الساخن في كل زجاجة. يتدفق الإسفلت، أثناء الاختبار، باستمرار حول السطح الداخلي لكل وعاء بشكل أغشية رقيقة نسبياً عند درجة حرارة 163 درجة مئوية لمدة 85 دقيقة. يتحرك الرف الدائري العمودي بمعدل 15 (دورة/دقيقة)، مع ضبط تدفق الهواء بمعدل 4 (لتر/دقيقة). يبين الشكل (3) نموذج الفرن الدوار الموجود في مخبر كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين، المستخدم في اجراء الدراسة.

الشكل (3) نموذج الفرن الرقائقي الدوار المستخدم في الدراسة

ب- التقادم طويل الأمد:

يعتبر اختبار وعاء الضغط (Pressure Ageing) (Vessel PAV) هو الأكثر استخداماً لمحاكاة التقادم طويل الأمد، والذي يمثل عمر خدمة طبقة الرصف الاسفلتية على مدار (10) سنوات. يتم في هذا الاختبار تعريض عينات من الإسفلت المتقادم قصير الأمد لضغط هواء قدره 2.1 ميجا باسكال عند درجات حرارة نموذجية 85 درجة مئوية (لمدة 65 ساعة) ، 90 درجة مئوية (لمدة 20 ساعة) ، 100 درجة مئوية (لمدة 20 ساعة) أو 110 درجة مئوية (لمدة 20 ساعة).

لقد أجريت دراسات لمحاكاة التقادم طويل الأمد للرابط الأسفلتي بطرق أخرى، كبديل عن استخدام جهاز (PAV). ولقد اعتمدنا في هذه الدراسة، كبديل، على استخدام جهاز الفرن الرقائقي الدوار (RTFOT) حيث تم فيها تعريض عينات الرابط الأسفلتي، بعد التقادم قصير الأمد، لثلاث دورات متتالية، بنفس الجهاز وبنفس ظروف درجة الحرارة، لتحقيق عملية التقادم طويلة الأمد .

4-3- دلائل التقادم (Aging Index) :

يعتبر تقادم الأسفلت أحد العوامل الحاسمة التي تتسبب في فشل طبقة الرصف الإسفلتية. وبشكل عام، تتطور عملية التقادم مع تغيرات في الخصائص الفيزيائية والكيميائية للإسفلت، مما يؤدي إلى زيادة الصلابة وضعف الالتصاق وتقليل خصائص الطلاء. ويمكن تصنيف تقادم الأسفلت وفق نوعين: الأكسدة الحرارية – شيخوخة الأكسدة الضوئية (تقادم نتيجة الأشعة فوق البنفسجية).

يحدث تقادم الأكسدة الحرارية على المدى القصير عندما يتعرض الأسفلت للحرارة والهواء أثناء عملية إنتاج خليط الأسفلت والرصف، والذي يرجع في المقام الأول إلى الأكسدة وفقدان المكونات المتطايرة في درجات الحرارة العالية. وتستمر عملية تقادم الأكسدة الحرارية على المدى الطويل خلال عمر خدمة الرصف، وتمثل التقادم طويل الأمد.

و لتحديد تأثير التقادم في خواص الرابط الأسفلتي، تستخدم منهجية تقييم درجة تقادم المواد الرابطة الإسفلتية من خلال قياس خصائص (فيزيائية أو كيميائية أو ريولوجية) مثل:- الغرز – درجة حرارة الحلقة والكرة (نقطة التمييع) – اللزوجة –نقصان الوزن قبل وبعد التقادم – المعامل المركب ((G*/Sin(□). والدلائل المستخدمة في هذه الدارسة هي دليل تقادم الغرز (PAI) ودليل نقطة التمييع (SAI)، وذلك وفق نتائج العمل المخبري التي اعتمدت في هذه الدراسة.

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

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

حيث أن :

- PAI: دليل تقادم الغرز Penetration Aging Index .
- Aged Pen: الغرز بعد التقادم.
- Un Aged Pen: الغرز قبل التقادم.
- SAI : دليل تقادم نقطة التميع Softing point Aging Index .
- SP_{after} : درجة حرارة نقطة التميع بعد التقادم.
- SP_{befor} : درجة حرارة نقطة التميع قبل التقادم.

4-4- الدراسة العملية :

4-4-1- خواص الإسفلت المستخدم في الدراسة

أجريت، من أجل تحديد خواص الإسفلت المستخدم، التجارب التالية: الغرز-نقطة التميع – الاستطالة – نقطة الوميض والاشتعال- الوزن النوعي- دليل الغرز- النقص في الوزن.

و يبين الجدول (2) النتائج التوصيفية للإسفلت ذو الصنف (60-70) المستخدم في الدراسة والتحقق من مدى مطابقته للمواصفات المعتمدة في سورية الخاصة بالرابط الاسفلتي المستخدم في صناعة الخلطات الاسفلتية المحلية.

نجد من نتائج الجدول (2) أن الاسفلت المستخدم في الدراسة هو من الصنف (60-70) ويحقق للمتطلبات الفنية المنصوص عنها في الشروط والمواصفات الفنية للطرق والجسور الصادر عن وزارة النقل العام 2002 .

الجدول (2) خواص الإسفلت المستخدم ومقارنتها مع المواصفات المعتمدة

نوع الاختبار	نتائج الاختبار	حدود المواصفات السورية	المواصفة المعتمدة في سورية لعام 2000
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**	100.0	ASTM D113, min
نقطة الوميض والاشتعال (Flash and Fire Point rest) (Cleveland cup open) (C°)	**درجة الوميض 252**	230	ASTM D92, min
	درجة الاشتعال 276		
الوزن النوعي، g/cm^3	**1.03**	1.01-1.03	ASTM D70

دليل الغرز (PI)	**-0.725**	-	-
النقص في الوزن (LOSS On Heating) (%)	**0.47**	0.8	ASTM D1754, max

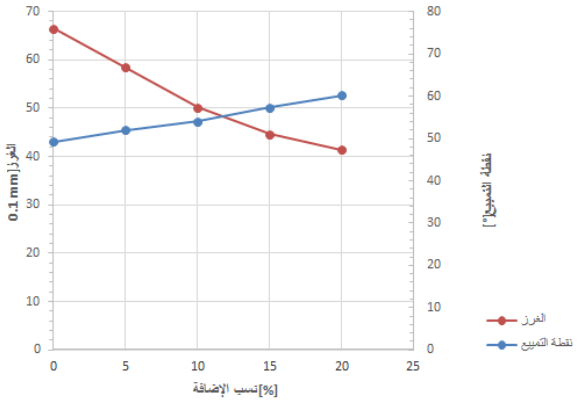
4-4-2- تأثير الغرافيت في خواص الرابط الأسفلتي :

تمت إضافة الغرافيت إلى الإسفلت بأربع نسب مختلفة (5 ، 10 ، 15 ، 20 %) وزناً من الإسفلت، وباعتماد الرموز (G0 ، G5 ، G10 ، G15 ، G20)، حيث يمثل كل رقم النسبة المضافة % . ولقد تمت خطوات خلط الغرافيت وتحضير عينات الإسفلت المعدل على النحو التالي ، 1 - تسخين الرابط الأسفلتي إلى درجة حرارة 150°C. 2 - تشغيل الخلاط الآلي وتثبيت حركته على 1000 دورة /دقيقة 3 - إضافة عينات الغرافيت ببطء خلال فترة 10 دقائق، مع المحافظة على حركة الخلاط حتى اتمام عملية مزج الغرافيت ضمن الإسفلت. ومن ثم تتم عملية تقييم خواص الإسفلت المعدل بالغرافيت وفق اختبارات الغرز ونقطة التمييع و إيجاد دليل الغرز.

وبعد ان تمت عملية خلط الغرافيت مع الأسفلت 60/70 وفق النسب المذكورة أعلاه، واجراء اختبارات الغرز ونقطة التمييع، والاستطالة، وإيجاد دليل الغرز، حصلنا على النتائج التوصيفية للإسفلت المعدل بالغرافيت، المبينة في الجدول (3)، والممثلة بالشكل (4).

الجدول (3) خواص الإسفلت المعدل بالغرافيت وفق النسب المدروسة

	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



الشكل (4) نتائج غرز ونقطة تميع الإسفلت المعدل بالغرافيت

وبالتدقيق في معطيات الجدول (2) والشكل (4)، يمكن استخلاص النتائج التالية :

- انخفاض الغرز تبعا لزيادة نسبة الغرافيت المضافة ، حيث بلغ (37.7%) عند النسبة 20%، كما هو موضح في الشكل (4).

-زيادة نقطة التميع للإسفلت المعدل بمقدار(22.4 %) بالمقارنة مع غير المعدل، كما هو موضح بالشكل (4).

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

4-4-3 تأثير التقادم في الرابط الأسفلتي:

لدراسة تأثير التقادم في الرابط الأسفلتي، اجري اختبار الغرز ونقطة التمييع لكل من الاسفلت غير المعدل والاسفلت المعدل بالغرافيت، بعد إجراء اختبار التقادم بنوعيه(STA,LTA) عليهما، باستخدام جهاز الفرن الرقائقي الدوار (RTFOT)،وفق الآتي:

1 –اختبار التقادم قصير الأمد، STA:

اجري الاختبار باستخدام الجهاز المذكور كما اسلفنا في البند 3-1-2-4 الصفحة 7 .

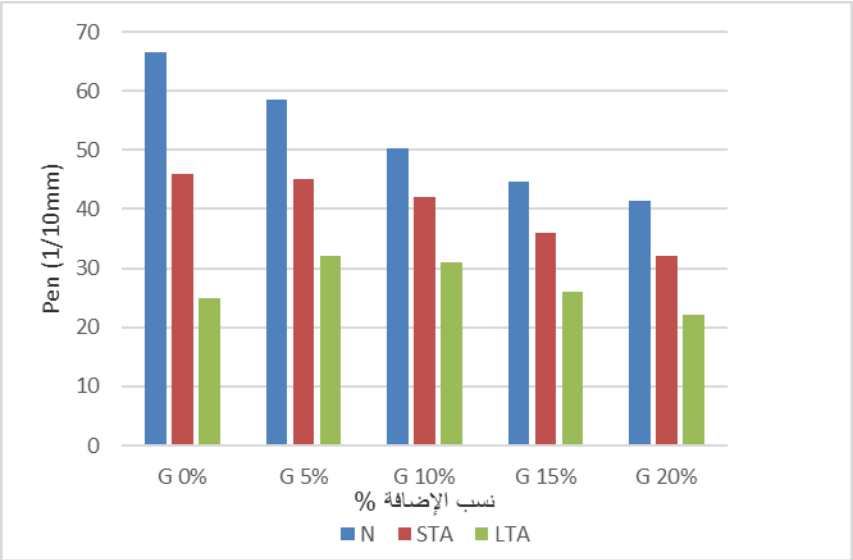
2 – اختبار التقادم طويل الأمد LTA:

نظرا لعدم توفر جهاز وعاء الضغط (PAV)، تمت محاكاة العملية باستخدام الفرن الرقائقي الدوار من خلال تعريض العينات، بعد اجراء التقادم قصير الأمد عليها، لثلاث دورات متتالية بنفس الجهاز وبنفس الظروف لدرجة الحرارة.

ويبين الجدول (4) والشكل (5) نتائج اختبار الغرز لكل من الاسفلت غير المعدل والمعدل بالغرافيت بنسب مختلفة وفي الحالات الثلاثة: – الطبيعة (N) – بعد التقادم قصير الأمد (STA) – بعد التقادم طويل الأمد (LTA).

الجدول (4) نتائج اختبار الغرز لكل من الاسفلت غير المعدل والمعدل بالغرافيت

نسبة الإضافة، %	الغرز بالحالة الطبيعية N	الغرز بعد التقادم قصير الأمد STA	الغرز بعد التقادم طويل الأمد LTA
G 0	66.5	46	25
G 5	58.5	45	32
G 10	50.2	42	31
G 15	44.7	36	26
G 20	41.4	32	22



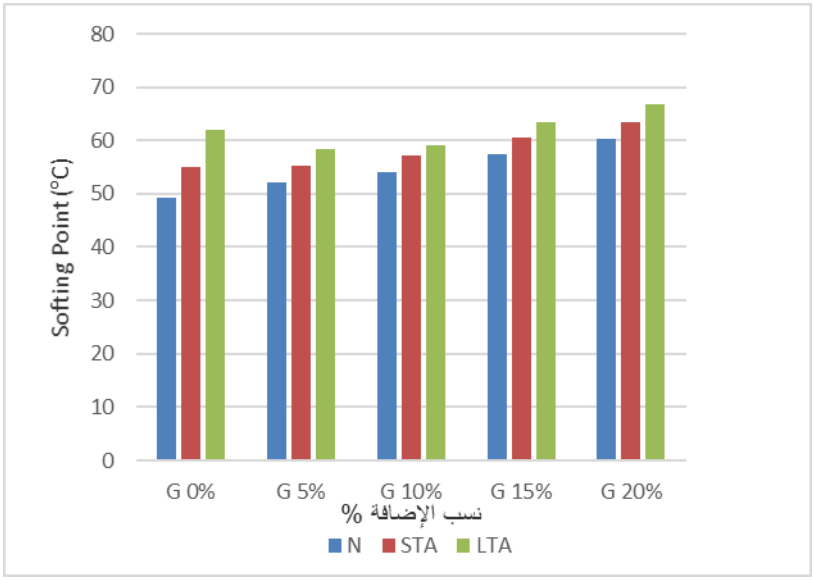
الشكل (5) نتائج الغرز للإسفلت المعدل بالغرافيت قبل وبعد التقادم

يعكس اختبار الغرز قوام وصلابة الاسفلت، يشير الغرز المنخفض عادةً إلى قوام صلب عالي، ويصبح الإسفلت أقسى، وبالتالي يصبح التنفيذ والفرش أكثر صعوبة. وبعد التقادم قصير الأمد، تنخفض قيم الغرز مما يشير إلى أن مركبات الأسفلت قد تغيرت بفعل درجات الحرارة المرتفعة، كما يظهر زيادة قساوة الأسفلت ليصبح أكثر صلابة. مع زيادة محتوى الغرافيت، يتناقص ميل الغرز قبل وبعد التقادم القصير والطويل ، وتقل نسبة انخفاض الغرز قبل وبعد التقادم مع تزايد نسبة التعديل.

ويبين الجدول (5) والشكل (6)، نتائج اختبار نقطة التمييع لكل من الاسفلت غير المعدل والمعدل بالغرافيت قبل وبعد اجراء التقادم بنوعيه عليه.

الجدول (5) نتائج اختبار نقطة التمييع لكل من الاسفلت غير المعدل والمعدل بالغرافيت

نسبة الإضافة، %	التمييع بالحالة الطبيعية N	التمييع بعد التقادم قصير الأمد STA	التمييع بعد التقادم طويل الأمد LTA
G 0	49.2	55	62
G 5	52	55.3	58.3
G 10	54.1	57.2	59.1
G 15	57.3	60.6	63.4
G 20	60.2	63.5	66.8



الشكل (6) نتائج نقطة التمييع للإسفلت المعدل بالغرافيت

تعتبر نقطة التمييع مؤشرا مهما لأداء الإسفلت في درجات الحرارة المرتفعة، وترتبط مباشرةً بدرجة تشوه سطح الطريق. يلاحظ زيادة نقطة التمييع بعد التقادم، وثبات درجة الحرارة للإسفلت مع درجة معينة من التحسن. مع زيادة نسبة الإضافة من الغرافيت، يميل منحى نقطة تمييع الإسفلت نحو تحسن في مقاومة الاسفلت للتغيرات الحرارية بانخفاض الفرق بين نقطة التميع قبل وبعد التقادم. بينت النتائج أن نسبة التعديل لها تأثير على أداء درجات الحرارة العالية بعد التقادم، وتعكس التغيرات في نقطة التمييع، درجة حساسية الرابط الأسفلتي للتقادم.

4-4-4- مناقشة دلائل التقادم :

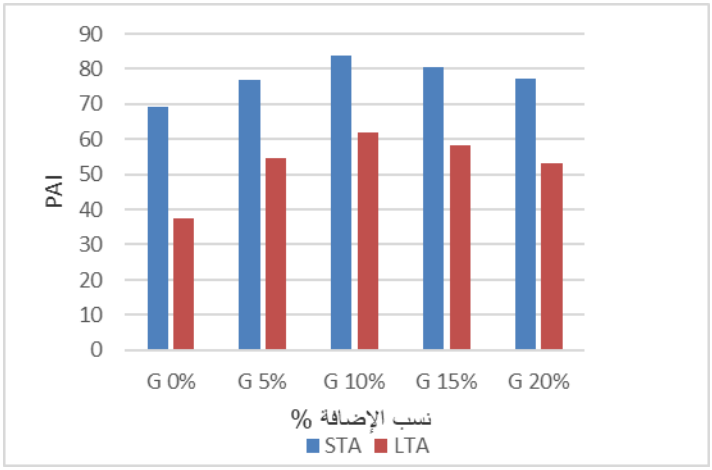
تمثل دلائل التقادم مؤشراً لفهم سلوك الرابط الأسفلتي قبل وبعد التقادم قصير وطويل الأمد. ولقد تم تحديد دلائل التقادم بناء على نتائج تحديد درجة الغرز ونقطة التميع للأسفلت المعدل بالغرافيت قبل وبعد التقادم، باعتماد العلاقات المذكورة في البند 4-3 ، الصفحة 9 وهي:

- دليل الغرز PAI في حالتي التقادم قصير وطويل الأمد.
- دليل نقطة التميع SAI في حالتي التقادم قصير وطويل الأمد.

ولقد ادرجت النتائج في الجدولين (6) و (7) ومثلت في الشكلين (7) و(8).

الجدول (6) دليل تقادم الغرز (PAI) لكل من الاسفلت غير المعدل والمعدل بالغرافيت

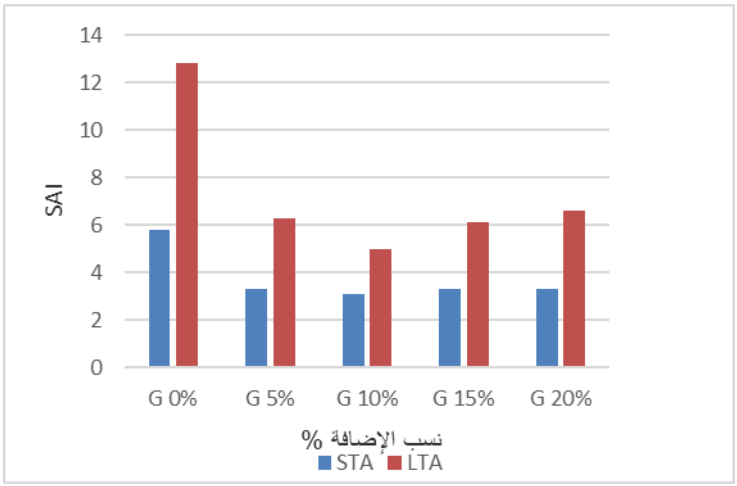
نسبة الإضافة، %	دليل الغرز PAI في حالة التقادم قصير الأمد STA	دليل الغرز PAI في حالة التقادم طويل الأمد LTA
G 0	69.2	37.6
G 5	76.9	54.7
G 10	83.7	61.8
G 15	80.5	58.2
G 20	77.3	53.1



الشكل (7) نتائج دليل تقادم الغرز للإسفلت المعدل بالغرافيت

الجدول (7) دليل نقطة التمييع (SAI) لكل من الاسفلت غير المعدل والمعدل بالغرافيت

نسبة الإضافة، %	دليل نقطة التمييع SAI في حالة التقادم قصير الأمد STA	دليل نقطة التمييع SAI في حالة التقادم طويل الأمد LTA
G 0	5.8	12.8
G 5	3.3	6.3
G 10	3.1	5
G 15	3.3	6.1
G 20	3.3	6.6



الشكل (8) نتائج دليل تقادم نقطة التمييع للإسفلت المعدل بالغرافيت

يلاحظ من النتائج المبينة في الجدول(6)، والممثلة بيانياً في الشكل (7)، ازدياد دليل تقادم الغرز PAI مع زيادة نسبة التعديل حتى (10%)، حيث وصل دليل تقادم الغرز في حالة قصير الأمد (83.7 %) مقارنة مع (69.2 %) للإسفلت غير المعدل ، بينما وصل في حالة التقادم طويل الأمد إلى (61.8 %) مقارنة مع (37.6 %) للإسفلت غير المعدل، ثم بدأ بالانخفاض مع زيادة نسبة الإضافة من الغرافيت. وتشير نتائج PAI أن التعديل بالغرافيت قد حسن من مقاومة الرابط الاسفلتي للأكسدة عند تعريضه للتقادم.

ونلاحظ من النتائج الواردة في الجدول (7) والممثلة في الشكل (8) أن دليل نقطة التمييع SAI للإسفلت غير المعدل وصل لأعلى قيمة، حيث بلغت الزيادة في نقطة التمييع مقدار (12.8 درجة مئوية) بعد التقادم قصير الأمد مقارنة مع الاسفلت المعدل، ومن ثم انخفض المؤشر بشكل واضح عند التعديل بنسبة (10%) ، وعاد للازدياد بشكل طفيف وفقا لزيادة نسبة التعديل. ويبين هذا أنه كان لإضافة الغرافيت تأثير واضح في نقطة التمييع للرابط المعدل لجهة ازدياد ممانعة الاسفلت المعدل للتشوهات في درجات الحرارة المرتفعة.

وبناء على نتائج الاختبارات وتحليلها يمكن التوصل إلى النسبة المثالية لإضافة الغرافيت، والتي عندها يكون الرابط الاسفلتي مقاوماً لظروف التقادم قصير وطويل الأمد هي (10 %).

5- الاستنتاجات و التوصيات:

أجري هذا البحث بهدف دراسة تحسين مقاومة الرابط الأسفلتي، المستخدم في صناعة الخلطات الإسفلتية المحلية، لظروف التقادم قصير وطويل الأمد، وبالتالي زيادة ديمومة المجبول عبر إضافة مسحوق الغرافيت. وبناءً على نتائج التجارب المخبرية على عينات الإسفلت، تم التوصل إلى النتائج الهامة والتوصيات التالية:

1- النتائج الهامة:

- بينت النتائج أن الغرز بدرجة حرارة (25 درجة مئوية) يتناقص مع زيادة نسبة إضافة مسحوق الغرافيت، ولكن يقابل هذه النقصان زيادة في مقاومة الاسفلت للتقادم قصير وطويل الأمد، ويظهر ذلك بشكل واضح عند نسبة التعديل (10%).
- أدت إضافة مسحوق الغرافيت إلى تحسن في دليل نقطة التمييع وانخفض الفرق بين نقطة التمييع قبل وبعد التقادم مقارنة مع الإسفلت غير المعدل، وذلك في حالتي التقادم قصر وطويل الأمد.
- تعتبر إضافة نسبة (10 %) من مسحوق الغرافيت هي نسبة مثالية لتحسين مقاومة الرابط الأسفلتي لظاهرة التقادم والتخفيف من التأثير السلبي لفقدان خواصه بنتيجتها.

2- التوصيات:

- دراسة تأثير إضافة الغرافيت في خواص الرابط الاسفلتي المعدل بالغرافيت باستخدام مقياس القص الديناميكي وتحديد المعامل المركب (G^* complex modulus) وزاوية الطور (phase angle δ) والنسبة ($G^*/\sin\delta$) للرابط الأسفلتي قبل وبعد التقادم.
- دراسة تأثير الغرافيت في خواص الخلطة الإسفلتية، وتحديد الخواص الميكانيكية للخلطات المعدلة بالغرافيت ومقارنتها مع خواص الخلطة غير المعدلة.

6- 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- Petersen, J. C. A (1989) **"Thin Film Accelerated Ageing Test for evaluating asphalt oxidative ageing"**. Proc. Assn. Asphalt Paving Technology, 58, 1989, pp. 220–244.

3- 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

4- Besamusca, J., Sörensen, A., Southwell, C. (2012)**"Addresing ageing characteristics of bituminous binders in Europe"**. In 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress Istambul, Turkey, 2012.

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

6- 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.

7- Anderson, D. A. and Bonaquist, R. (2012) "**Investigation of short-term laboratory ageing of neat and modified asphalt binders"**, NCHRP Report 709, 2012

8- Yan, C., Huang, W. and Tang, N**.** (2017)**"Evaluation of the temperature effect on Rolling Thin Film Oven aging for polymer modified asphalt"**. Construction and Building Materials, 137, 2017, pp. 485–493.

9- Du, Y.; Wang, S. (2015)**"Oriented heat release in asphalt pavement induced by high-thermal-conductivity rods"**, Applied Thermal Engineering 90: 424–431. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.026

10- Liu, X.; Liu, W.; Wu, S.; Wang, C. (2014). **"Effect of carbon fillers on electrical and road properties of conductive asphalt materials**", Construction and Building Materials 68: 301–306. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.059

11- Lu, L.; Ao, Z.; He, Y.; Ding, Q.; Hu, S. (2008). "**Experimental study on conductive asphalt concrete using steel slag as aggregate"**, in the 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, 2008, Nanjing, China, 1043–1050.

12- Chen, J.; Wang, H.; Li, M.; Li, L. (2016). **"Evaluation of pavement responses and performance with thermally modified asphalt mixture"**, Materials and Design 111: 88–97. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.085

13- 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

14- 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

15- 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.

16- 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

17- 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.

18- Cong, P.L., Xu, P.J. and Chen, S.F. (2014**) "Effects of carbon black on the anti aging, rheological and conductive properties of SBS/asphalt/carbon black composites"**. Construction and Building Materials, 52, 2014, pp. 306–313