دراسة تغيرات خواص البيتومين المعدل بمزيج /بوليمر-كبريت/

م. احمد الصالح . جامعة البعث . كلية الهندسة المدنية – جامعة البعث

د.م أكرم سلامة . جامعة البعث . كلية الهندسة المدنية – جامعة البعث

الملخص :

يعد الرصف البيتوميني (الرصف المرن) النوع الأكثر انتشاراً لإنشاء الطرق في الجمهورية العربية السورية، كما هو مستخدم بشكل واسع في كافة أنحاء العالم، حيث تبلغ نسبة الطرق في العالم التي تعتمد في إنشائها على هذا النوع من الرصف حوالي 98%، ويعزى ذلك إلى سهولة وسرعة إنشائه وصيانته.

وقد استخدم البيتومين المعدل بالبوليمر، لتحسين أداء الرصف البيتوميني في مجالات عديدة ، أهمها : التخلص من تشققات الرصف المتولدة عن تأثير الإجهادات الحرارية، والحمولات المتكررة، كما تعمل على زيادة مقاومة الرابط البيتوميني عند درجات الحرارة المرتفعة ، ومنح الرابط البيتوميني قساوة عالية عند تعرضه لدرجات حرارة الخدمة العالية [4] . وقد لوحظ أن البيتومين المعدل بالبوليمرات فقط يعاني من عدم استقرار في البنية الهيكلية تحت تأثير العوامل الجوية المناخية ، ومن تكرار الحمولات أيضاً ، وذلك بعد فترة قصيرة من تنفيذه ووضعه في الاستثمار، ويعزى ذلك إلى تلدن البولميرات ذات البيئة غير المشبعة ، مما دعى إلى البحث عن إضافة مادة متفاعلة لتعزيز تشابك جزيئات البولمير للحفاظ على خواص البيتومين المعدل طيلة فترة استثمار طبقات الرصف . وقد تم العمل في البحث على تعديل البيتومين المحلي، بإضافة مادة كيميائية محسنة Polyethylene (PE)، ومادة متفاعلة لتعزيز التشابك بين جزيئات البولمير هي الكبريت Sulfur (S) بهدف استخدامه لتصميم خلطات بيتومينية مستوفه للشروط الفنية و لمواصفات وزارة المواصلات السورية . ويحسن من مقاومتها تحت تأثير الحمولات العالية والعوامل المناخية والحرارية و ظروف الاستثمار الأخرى .

الكلمات المفتاحية : . تعديل البيتومين بالبولمير . تعديل البيتومين بالكبريت . إضافة S،PE للخلطات الاسفلتية .

Study of Changes In Properties of Modified Bitumen With a Mixture / Polymer - Sulfur /

Abstract

Bituminous paving is the most widespread type of road in the syrian Arab Republic, and that is widespread in all regions of the world, where the percentage of roads that depend on this type of paving is about 98% in the world, thanks to the ease and speed of its construction.

Polymer modified bitumen has been used to improve the performance of bituminous paving in many areas, including reducing paving cracks caused by thermal stresses, repeated loads, increasing the resistance of the bituminous bond to the fatigue caused by high temperatures, associated with the construction, and giving the bituminous bond high strength at high service temperatures. it has been observed that polymer-modified bitumen suffers from instability in the structural structure under the influence of climatic weather factors and repeated loads after a short period of its implementation and investment. Due to the unsaturated structure of the polymers, they are subjected to plasticization, which prompted a search for the addition of a reactant to enhance the crosslinking of the polymer molecules. To maintain the improved properties of the modified bitumen throughout the investment period of the paving layers.

In our research, we worked on modifying the local bitumen, by adding an improved chemical (PE), and a reactant to enhance the crosslinking is sulfur (S), so that the modified bitumen is used to design bituminous mixtures that meet the conditions of the bituminous mixture design, and improve its resistance to high loads and thermal climatic factors and all conditions Investment.

Keywords: Modification of bitumen with polymer - Modification of bitumen with sulfur

1: المقدمة :

استخدمت الخلطات الإسفلتية المعدلة بالإضافات في مجالات عديدة لمشاريع المواصلات ، ولأهداف متنوعة أهمها الحد من تشكل التشوهات و التشققات الناتجة عن الإجهادات الحرارية والحمولات الثقيلة المتكررة ، واكتساب القدرة العالية لمقاومة كافة الظروف المناخية من أمطار وصقيع وغيرها .

يعد الرصف البيتوميني النوع الأكثر انتشاراً لإنشاء الطرق في الجمهورية العربية السورية، ويستخدم بشكل واسع في كافة مناطق العالم، حيث بلغت نسبة الطرق المنفذة من هذا النوع من الرصف حوالي 98% في مختلف أنحاء العالم [1]، لسهولة وسرعة إنشائه وصيانته .

يجب أن يحقق المجبول الاسفلتي مجموعة من المتطلبات الأساسية، من قدرة تحمل لكافة الحمولات المتوقع مرورها، وثبات ومقاومة جيدة للتشوهات الناتجة عن مرور الحمولات الكبيرة عند درجات الحرارة ا لمرتفعة، وتأمين سطح كتيم يؤمن تصريف ملائم وجيد للمياه ، إضافة إلى الأمان والراحة لمرور المركبات . وغالبا ما تؤدي ظروف الاستثمار والعوامل المناخية إلى حدوث التشوهات وظهور التشققات وتشكل الحفر على سطح الرصف والذي تؤدي بدورها لإنقاص عمر الرصف وانخفاض مستوى الأمان، إضافة إلى التكلفة العالية للصيانة المتكررة .

ومن هنا كان لا بد من البحث الدائم والمستمر، عن مواد محسنة ذات مقاومة عالية تحد وتمنع من تأثر الرصف المرن في طبقاته العلوية و المكونة من المجبول البيتوميني والتي يجب أن تؤمن الحماية للطبقات الأدنى منها ، من التأثر بكافة العوامل والظروف المحيطة ، إضافة إلى دورها كطبقة حاملة، معرضة بشكل مباشر للعوامل المناخية والحرارية، إضافة إلى الحمولات الستاتيكية والديناميكية العالية حيث النقص في الثبات (المقاومة) يؤدي إلى نشوء التشوهات ، وتشكل الحفر والأخاديد على سطح الرصف، وبالتالي إنقاص عمر الرصف ونقص الأمان أيضاً ، إضافة إلى الكلفة المستمرة للصيانة المتكررة [2].

يعد البيتومين من ناتج تكرير المصافي (Petroleum Asphalt) ، العامل الأساسي لصناعة المجبول البيتوميني لأنه يلعب دور المغلف والرابط للحصويات، وهنا تبرز أهمية الحفاظ على خواصه قدر الإمكان، حيث يتعرض البيتومين إلى مجموعة من التغيرات في خواصه ، تبدأ عند إنتاج المجبول البيتوميني في درجات حرارة مرتفعة، وتستمر هذه التغيرات حتى مرحلة استثماره وتعرضه للحمولات والظروف الجوية المختلفة، تؤدي هذه المتغيرات إلى منعكسات سلبية على أداء البيتومين ضمن المجبول البيتوميني، مما يسبب فقدان البيتومين للكثير من خواصه الأولية، التي قد تصل إلى درجة يصبح فيها غير صالح للاستخدام[3].

استخدم الرابط البيتوميني المعدل منذ أكثر من 50 سنة، وقد لاقى اهتماماً إضافياً في العقد الماضي، وعلى الرغم من أن استخدام البيتومين المعدل مكلف أكثر من استخدام البيتومين العادي، لكنه يزيد من عمر الرصف البيتوميني، ويتم ذلك التعديل من خلال إضافة عدة مواد، كالبولميرات (المرنة أو اللدنة)، أو المواد المالئة (الإسمنت البورتلاندي – الكلس) والألياف الصناعية (البوليستيرين – الألياف الزجاجية ..إلخ) والإطارات البالية، وغيرها من الإضافات وذلك لتحسين خواص البيتومين، مع عدم الإقلال من أهمية الصفات الأساسية للبيتومين[3].

وقد استخدم البيتومين المعدل بالبولمير، لتحسين أداء الرصف البيتوميني لأهداف عديدة، منها التخلص من تشققات الرصف الناتجة من تأثير الإجهادات الحرارية، والحمولات المتكررة، وتحسين مقاومة الرابط البيتوميني على التعب الناتج عن درجات الحرارة المرتفعة و المرافقة لمرحلة الإنشاء، ومنح الرابط البيتوميني قساوة عالية عند درجات حرارة الخدمة العالية، ومنحه مرونة أكبر عند درجات حرارة الخدمة المنخفضة، وللوصول أيضاً إلى التصاق وترابط أكبر بين الحصويات و البيتومين في حالة الرطوبة[4].

2 : هدف البحث وأهميته :

يهدف بحثنا هذا على تعديل البيتومين المحلي، بإضافة مادة كيميائية محسنة Polyethylene (PE)، ومادة متفاعلة لتعزيز الترابط (التشابك) بين جزيئلتها هي الكبريت Sulfur (S) بهدف استخدامه لتصميم خلطات بيتومينية محققة الشروط الفنية،

وذات مقاومة جيدة للحمولات العالية والعوامل المناخية والحرارية الظروف الاستثمارية الأخرى .

وتعود أهمية البحث إلى تناوله مسألة تحسين مقاومة الرصف المرن لتأثيرات درجات الحرارة المتفاوتة والحمولات العالية ومختلف الظروف الاستثمارية . فاستخدام الخلطات الاسفلتية المعدلة يهدف إلى الحد من ظاهرة التعب للمجبول الاسفلتي وتحقيق مقاومة أكبر لإجهادات الشد وقوى القص ،بالتالي التخلص من التشوهات في طبقات الرصف الاسفلتية وخاصة عند درجات الحرارة المرتفعة (التخدد . الزحف . الفوران) .

3 . المتطلبات الفنية للمجبول البيتومينى:

يجب أن يحقق المجبول البيتومينى مجموعة من المتطلبات الأساسية، أهمها تأمين قدرة تحمل كافية للحمولات المتوقع مرورها، وثبات ومقاومة جيدة للتشوهات المتشكلة من تأثير غزارة الحركة المرورية ذات الحمولات الكبيرة عند درجات الحرارة المرتفعة ، وتأمين سطح كتيم يحقق تصريف ملائم وجيد للمياه، إضافة إلى الأمان لمستخدمي الطرق .
ترتبط التغيرات التي يتعرض لها الرصف المرن، بمقدار وحجم تعرض الرابط البتومينى للهواء، فبزيادتها يزداد تعرض الرابط البيتومينى للهواء، وتزداد إمكانية تعرض طبقات الرصف السفلية للهواء، وبالتالي تزيد إمكانية حدوث التشوهات وانخفاض الديمومة[6].
ويلاحظ تراجع تأثير العوامل الجوية في حالة السطوح المرصوصة بشكل جيد، أو ذات البنية المغلقة، بينما يكون تأثير العوامل الجوية ملحوظاً في حالة الأغطية ذات البنية المفتوحة[5]، كما تتعلق ديمومة الخلطات البيتومينية بنسبة البيتومين، فالخلطات التي تكون فيها نسبة البيتومين غير كافية، تكون أقل مقاومة لهذه العوامل، وبالتالي أكثر قابلية لحدوث العيوب والتشوهات[5]، و من جهة ثانية فإن زيادة نسبة البيتومين تؤدي إلى تخفيض نسبة الفراغات الهوائية ، التي يجب ألا تقل عن حدود المواصفات المسموحة كي يتمكن الرصف المرن من استيعاب الضغط الناتج عن غزارة مرور المركبات، وتجنباً لحدوث ظاهرة الفوران، كما أن زيادة نسبة البيتومين تؤدي إلى انخفاض قيم الثابت .

تعين نسبة البيتومين المثالية بحيث تكون كافية لتغليف الحصويات بشكل مناسب، ويجب أن تتحقق عند هذه النسبة متطلبات التصميم الفنية المناسبة من الثبات و الانسياب ، نسبة فراغات مليئة بالبيتومين و نسبة فراغات هوائية وكثافة.

إن طرق تصنيع المجبول البيتوميني غير المناسبة، تقلل من عمر الرصف المرن مثل التسخين الزائد للبيتومين قبل خلطه بالحصويات بالإضافة إلى تخزين المجبول البيتوميني في درجات حرارة الخلط لمدة طويلة، إذ يؤدي ذلك إلى انخفاض درجة غرز البيتومين، وبالتالي إلى تقسيته، لذلك يجب مراعاة عدم تسخين الرابط البيتوميني بشكل زائد، والذي يؤدي إلى تشكيل الكاربيد، كما يجب أن تتم عملية الإنتاج بأقل زمن ودرجة حرارة ممكنين، وبشكل يسمح بالتغليف الجيد لجميع الحصويات، حيث أن خواص البيتومين تتغير بشكل ملموس خلال عملية الخلط[5]، ويتم تحديد درجة حرارة الخلط بشكل يوافق اللزوجة المطلوبة لتغليف الحصويات بالبيتومين بشكل كامل.

يجب أن تحقق مواد الرصف المتطلبات الفنية، فالحصويات يجب أن تكون ذات سطح خشن، وأن تكون من ناتج تكسير الحجارة القاسية، ذات مقاومة جيدة للاحتكاك، والضغط الناتج عن مرور العربات، وإضافة لما ذكر، يجب أن تتمتع الحصويات بخواص التصاق جيدة، وبمقاومة كبيرة لانتزاع الغشاء البيتوميني عنها نتيجة تأثير الرطوبة والمياه، ويجب أن يحقق التدرج الحبي للمواد الحصوية، الحدود المسموحة للمواصفات التي توصي بها وكالات الطرق، بحيث تكون عنده الفراغات ضمن الحدود المسموحة[6].

4 . البيتومين :

يعد البيتومين من أكثر مواد البناء استخداماً في العالم، فقد استخدم منذ فترة طويلة في سورية، ويحصل عليه من الطبيعة، أو عبر تقطير النفط ، أو من بعض التوضعات التي يتجمع فيها بقايا البترول المتدفق من جوف الأرض. ومع تطور عملية التقطير توفر إمكانية الحصول على بيتومين جيد لأعمال الرصف، ويعتبر البيتومين الناتج عن تقطير النفط هو الأكثر استخداماً في العالم في الوقت الحالي ، ونميز بين البيتومين الطبيعي والناتج عن تقطير النفط باطلاق اسم الاسفلت على الأول والبيتومين على الثاني .

4 . 1 البيتومين ناتج تكرير البترول:

يتم الحصول عليه كناتج عن عملية تقطير البترول في المصافي، ويعتبر النوع الأكثر استعمالاً في إنشاء الرصف المرن، وتختلف كمية البيتومين التي يمكن الحصول عليها من البترول، باختلاف مصدر ونوع البترول المستخدم في عملية التكرير، وتتعلق بقيمة كثافة البترول حسب معهد النفط الأمريكي

(American Petroleum Institute gravity) واختصاراً (API gravity) .

فعندما تكون قيمة **API gravity** مرتفعة، يكون محتوى البيتومين صغيراً وعندما تكون قيمة **API gravity** صغيرة يكون محتوى البيتومين كبيراً، مثال:

API gravity = 15 تكون نسبة البيتومين الممكن الحصول عليها 60%.

API gravity = 35 تكون نسبة البيتومين الممكن الحصول عليها 10%.

ويتم إنتاج البيتومين بدرجات مختلفة من اللزوجة أهمها:

(Ac2.5، Ac5، Ac10، Ac20،Ac40)

وتتناسب هذه الدرجات مع تصنيف الروابط البيتومينية حسب درجة الغرز وهي:

(40-50،60-70، 85-100، 120-150، 200-300)

4 . 2 مكونات البيتومين:

البيتومين مركب هيدروكربوني بوزن جزيئي مرتفع تتراوح بين mol(3000-1000).

ويدخل في تركيبه الكيميائي مجموعة من العناصر بنسب مختلفة وهي:

- الكربون Carbon(C) تتراوح نسبته بين (82−87)%.
- الهيدروجين Hydrogen(H) تتراوح نسبته بين (10−15)%.
- الأوكسجين Oxygen(O) تتراوح نسبته بين (2−3)%.
- الكبريت Sulfur(S) تتراوح نسبته بين (0.2−7)%.
- الآزوت Nitrogen(N) تتراوح نسبته بين (0.1−1)%.

إضافة إلى آثار خفيفة من بعض المعادن، مثل الفاديوم والنيكل والكوبالت والحديد.

إن التركيب البنيوي للبيتومين معقد جداً، فهو عبارة عن سلاسل من الفحوم الهيدروجينية ذات التراكيب المختلفة، والتي تتجمع ضمن مجموعات رئيسية وهي[7]:

- الإسفلتين Asphaltene:

وهو عبارة عن جزيئات من بودرة ضخمة سوداء، ذات بنية جزيئية تتراوح بين (1000-3000)mol ولها أحد الصيغتين $(CnHn)x$،$(CnH_2n)x$.

- المالتين Maltene:

هي جزيئات تحيط بجزيئات الإسفلتين، ولها تركيب قريب منه ، بنسبة هيدروجين أكبر من الكربون، وبوزن جزيئي أقل يتراوح بين (700-.1200)mol ويقسم المالتين تبعاً إلى الوزن الجزيئي إلى مجموعتين:

وزن جزيئي منخفض (700-1000)mol.

وزن جزيئي مرتفع (1000-1200)mol.

ويحتوي الهيدروكربون الداخل في تركيب المالتين على الأوكسجين والآزوت، وبعض المعادن الأخرى وتتصف جزيئات المالتين بلون يميل إلى السواد، وتكون بحالات مختلفة من السائل اللزج إلى الجسم الصلب الهش، وتتراوح كثافتها بين $g\backslash cm^3$(0.99-1.088).

- الزيت Oil:

هو خليط من مركبات هيدروكربونية مشبعة وغير مشبعة ذو بنية تتراوح بين (200-600)mol، ويتميز الزيت بلزوجة عالية، وبلون فاتح إلى بني غامق، وتوجد فيه نسبة من البرافين الذي يعتبر غير مفيد في البيتومين.

يعطي الإسفلتين القساوة والهشاشة للبيتومين ، كما يعطي المالتين اللزوجة والاستطالة والالتصاق ، ويعطي الزيت خاصة السيلان. وبالاعتماد على المكونات الثلاثة، تتحدد خواص البيتومين المختلفة ، وسلوكه عند تعرضه للعوامل المؤدية للتعب[9].

3 . 4 تصنيف البيتومين Asphalt Classification:

في البداية كان البيتومين يصنف بالاعتماد على نتائج الغرز في خمسة أنواع هي :
(200–300، 150–120، 100–85، 70–60، 50–40).

ومع بداية عام 1970م ولغاية عام 1980م ظهر تصنيف آخر، يعتمد على نتائج تجربة اللزوجة، تم وفقها تقسيم البيتومين إلى خمسة أضعاف :
(Ac2.5، Ac5، Ac10، Ac20،Ac40)

يشير الرقم بجانب الرمز الذي هو اختصار لـ Asphalt-cemet ، إلى اللزوجة بالبواز مقسومة على 100 ضمن المجال ±20% فعلى سبيل المثال، عندما يشار إلى البيتومين Ac10، فهذا يدل على أن اللزوجة هي 200±1000 .

وهناك تصنيف آخر يعتمد على التركيب المجموعي للبيتومين يسمى كوليانوسكي وميخايوف (Kolbanwski&Michwf)، ويسمح هذا التصنيف بتوقع سلوك المواد أثناء استخدامها على سطح الطريق، ويبين بنيتها بالإضافة إلى خواصها الريولوجية، ويقسم البيتومين وفق هذا التصنيف كما هو مبين بالجدول (1) إلى ثلاثة أصناف وهي[7]:

Zel-1:

- يقابل بنية ذات سلسلة من الحلقات الموصولة بالإسفلتين القاسي، والمثبتة بأغشية رقيقة من المالتين القليل تواجده في الزيت، ويتصف هذا الصنف بأنه سريع التأثر بالتعب، ويعود السبب في ذلك إلى كمية الإسفلتين المرتفعة، وكمية المالتين الغير كافية، ويتميز بمجال لدن كبير بسبب وجود كمية كبيرة من الزيت، الذي يخفض من درجة الكسر لهذا البيتومين، ولا تتغير لزوجته بشكل كبير مع الحرارة، وله دليل غرز كبير (Ip=0.6-4.4) وتماسك قليل.

Zol -2:

- في هذه الحالة يكون البيتومين عبارة عن جملة متصلة من الإسفلتين المجزأ، المثبتة بأغشية سميكة من المالتين، ويتصف هذا الصنف بأنه غير مقاوم للحرارة، نظراً إلى بنيته التي تحوي على القليل من الإسفلتين، والكثير من المالتين، ويتميع بسهولة ودرجة تلينه صغيرة، وعند انخفاض درجة الحرارة يصبح هشاً، إذ أن الكمية الكبيرة

من المالتين تجعل البيتومين ذا حساسية كبيرة للحرارة، فتتغير لزوجته بشكل كبير مع الحرارة، ويتعرض للتعب بسرعة.

:ZEL-ZOL-3

- هو الصنف الوسط بين الصنفين السابقين، حيث يحتوي على سلسلة مكثفة من الإسفلتين المثبتة بالمالتين، ويتميز بمقاومته الجيدة للحرارة، ويحافظ على لدونته في درجات الحرارة المنخفضة، ويقاوم التشوهات في درجات الحرارة المرتفعة، ويظهر في حالته اللزجة المرنة تماسكاً كبيراً، بالإضافة إلى التطاول، ولا يتأثر بشكل كبير بالتعب.

الجدول (1): تصنيف البيتومين وفق نتائج التركيب المجموعي:

نوع البيتومين	نسبة الإسفلتين	نسبة المالتين	نسبة الزيوت
Zel	>25	<24	>50
Zol	<15	>36	<40
Zel-Zol	20-23	30-40	45-50

4 . 4 تعب البيتومين:

يتم تسخين البيتومين إلى درجات حرارة مرتفعة من أجل تأمين اللزوجة الكافية لتغليف الحصويات بشكل جيد، من ثم يترك المجبول البيتومين بعد الرص ليبرد في درجات حرارة الجو، مما يؤدي إلى زيادة قساوته، وتستمر هذه الزيادة مع الزمن خلال الاستثمار، ويشار إلى هذا التعب من خلال مجموعة مظاهر، يمكن ملاحظتها من خلال التصلب واللزوجة العالية للبيتومين، وازدياد التقصف والهشاشة، ويصبح البيتومين أكثر قابلية للتشوهات والعيوب نتيجة تأثير المياه والعوامل الجوية المختلفة[8]، ويرى بعض الدارسون أن التقسية تحدث نتيجة الأكسدة، وتبخر المركبات الكيميائية الخفيفة، بالإضافة إلى ظاهرة البلمرة، ويحدث التطاير والتبخر بشكل أساسي في المزيج الإسفلتي في الفترة

الممتدة من عملية المزج حتى الانتهاء من عملية إنشاء الرصف وهذا ما نسميه التعب القصير الأمد (Short-Term-Aging) ولا تقف عملية الأكسدة التي تؤدي إلى تحول الزيت إلى مالتين والمالتين إلى إسفلتين عند مرحلة التعب القصير الأمد، وإنما تستمر وتتكثف مع الزمن بشكل كبير خلال استثمار الرصف تحت تأثير العوامل المناخية المختلفة، وهذا ما نسميه التعب الطويل الأمد (Long-Term-Aging)[7]
ومن أهم التغيرات التي تترافق مع تعب البيتومين[7]:

- انخفاض الاستطالة بنسبة 50% في الدرجة C° (25-15).
- انخفاض قيمة الغرز 30% في الدرجة C° (25).
- ارتفاع درجة حرارة الكسر C° (3).
- ارتفاع درجة حرارة التليين وسطياً C° (4).
- ارتفاع اللزوجة (50%) في الدرجة (135°C) و (100%) في الدرجة (60-90)°C.

يوجد مجموعة من العمليات، تساهم بشكل مشترك في حدوث التعب طويل وقصير الأمد ومنها[7]: التبخر والتطاير، الأكسدة ، الكربنة .

5 . الإضافات المحسنة للبيتومين:

مع تطور حركة المواصلات، و زيادة الكثافة المرورية و الحمولات المحورية للمركبات ازدادت الحاجة إلى بناء طبقات رصف متينة تمنع حدوث التشوهات، لذلك توجه المختصون للبحث عن طرق جديدة لتحسين خواص الرابط البيتوميني، بحيث يتمتع بخواص التصاق وتماسك جيدة مع الحصويات، واستمرارها خلال مدة الاستثمار والخدمة، وأن تكون تغيراته مع الحرارة قليلة ضمن المجال الحراري الذي يستثمر فيه الرصف، وأن تكون لزوجته منخفضة في درجات حرارة تصنيع ومد المجبول البيتوميني وأن تكون له قدرة جيدة لمقاومة التشوهات الدائمة وتحمل الإجهادات والعوامل المؤدية إلى الانهيار [4]، ومن أجل الحصول على رابط بخواص جيدة تم استخدام مجموعة من الإضافات كان

الهدف منها تحسين الخواص الفيزيوكيميائية للبيتومين ومن هذه الوسائط: المطاط – الأمينات – التانين – الكلس – البولميرات الكاوتشوك[8].

استخدمت الإضافات قديماً مع الخلطات الباردة المستعملة في الإنشاء على البارد، ولكن بدأت الأبحاث تتجه إلى دراسة تأثير الحرارة على كفاءة الإضافات، للتمكن من استخدامها مع الخلطات الساخنة، وعلى الرغم من أن بعض النتائج الأولية أشارت إلى تلف بعض هذه الإضافات بالحرارة، إلا أنه في ظروف معينة فإن هذه الإضافات حسنت من المقاومة لمنع انهيار الرصف، بفعل العوامل المختلفة خلال فترة الخدمة الاستثمارية.

1 . 5 البيتومين المعدل بالكلس:

تم استخدام الكلس من أجل تحسين خواص البيتومين منذ زمن بعيد، حيث كان يستخدم مسحوق الأحجار الكلسية. وتشير الأبحاث إلى أن إضافة الكلس، تؤدي إلى الحد من التغيرات التي يتعرض لها البيتومين نتيجة التعب، ويعزز قوى الالتصاق بين البيتومين والحصويات، ويزيد من ممانعة انسلاخه نتيجة تأثير المياه، وبالتالي زيادة الديمومة للرصف[1].

2 . 5 البيتومين المعدل بالمطاط:

تمت تجربة انتاج خلطات معدلة بالمطاط لأول مرة في هولندا سنة 1929، وكان أول المنتجين والمستخدمين الولايات المتحدة الأمريكية عام 1947م بولاية أوهايو، حيث أضيف المطاط بنسبة (5–7.5)% وزناً من البيتومين، وانتشر مثل هذه الخلطات في باقي الولايات والمدن الأمريكية، وبينت التجارب التي أجريت في فيرجينيا عام 1950م تحسن بسيط في مقاومة الانزلاق، في طبقات الرصف الحديثة، إلا أن معامل الاحتكاك زاد زيادة ملحوظة بعد ستة أشهر من إنشاء الرصف، وقد دلت التجارب السابقة لمكتب الطرق العامة في الولايات المتحدة الأمريكية على بعض المزايا والعيوب لمثل هذه الخلطات، فعند إضافة المطاط إلى مزيج الحصويات والبيتومين، ظهرت نتائج غير مرضية، أما خلط المطاط بالبيتومين أولاً فقد أدى إلى زيادة مرونة البيتومين، وقلة تأثره

بدرجات الحرارة وانخفاض درجة قساوته مع زيادة عمر الرصف، وإلى زيادة ثبات المجبول البيتومينيي[9].

3 . 5 البيتومين المعدل بالبولميرات:

بدئ بتعديل البيتومين بالبولميرات في أوائل القرن الماضي، لتحسين خواص البيتومين، وقد تكون البوليمرات سائلة كاللاتكس ، أو مواد جزيئية صغيرة لدنة بالحرارة. و تم تطوير العديد من المواد الصناعية البولميرية التي نافست الكاوتشوك الطبيعي، بعد الحرب العالمية الثانية، حيث أجريت محاولات عديدة لاستخدام نفايات المواد البولميرية الصناعية، لتحسين خواص البيتومين، ومع ذلك الوقت كانت أسعار البيتومين رخيصة ، بينما كانت أسعار البولميرات مرتفعة، مما أدى إلى عدم تشجيع تعديل البيتومين بالمواد البولميرية . وفي عام 1973م ارتفعت أسعار البترول بالنسبة لأسعار البولميرات، مما أدى إلى العودة مجدداً إلى تعديل البيتومين بالبولميرات.

تم إجراء مجموعة من التجارب في فرنسا، كان الهدف منها تحديد سلوك البيتومين المعدل بالبولميرات[4]. ويتعلق تحسن خواص البيتومين بنوعه، كما بنوع المواد البولميرية المضافة وبكميتها، حيث تقوم البولميرات التي تصلح لتعديل خواص البيتومين، ببناء شبكة في البيتومين تشبه شبكة التسليح في البيتون، وتظهر أنواع البيتومين المعدلة بالبولميرات، خواصاً ملائمة أكثر من غير المعدلة في درجات الحرارة المرتفعة والمنخفضة على حد سواء، كما أن استخدام البيتومين المعدل بالبولميرات في الخلطة البيتومينية يكسب طبقات الرصف ثباتاً كافياً ضد التشوهات في درجات الحرارة العالية، ومرونة كافية في درجات الحرارة المنخفضة وكذلك مدة استثمار طويلة [14]، وإن أي إضافة تعدل في الخواص الكيميائية للبيتومين تؤدي إلى تغير خواصه وقوامه وبنيته.

وفي حال عدم اتخاذ إجراءات معينة (تأمين درجة الحرارة مناسبة . سرعة الخلط ثابتة ومتواترة مع ثبات درجة الحرارة ، تجانس توزيع الإضافات على كامل الخليط) أثناء مزج البيتومين بالبولمير يمكن أن يأخذ المزيج (ببيتومين – بولمير) أحد الأشكال التالية[4]:

الشكل الأول:

يكون المزيج في هذه الحالة غير متجانس، ولا يتم اتحاد مكونات البيتومين مع البولمير، حيث يكونان منفصلان، وتعتبر هذه الحالة الأكثر مصادفة، ولا يرغب باستخدامها كرابط في إنشاء الطرق والمطارات.

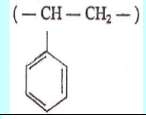
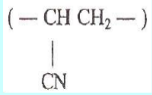
الشكل الثاني:

المزيج متجانس بشكل كامل، وتتحد فيه جزيئات البيتومين مع البولميرات، حيث يقوم الزيت الموجود في البيتومين بحل البولمير وتوزيعه بشكل كامل، ومن ثم الاتحاد مع جزيئات البيتومين الأخرى، ويكون المزيج ثابتاً ظاهرياً، لكن التغيرات الناتجة بالمقارنة مع الخواص الأولية للبيتومين طفيفة، وتزداد لزوجته فقط، وهذه النتيجة غير مرغوبة في صناعة المجبول البيتوميني.

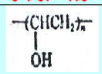
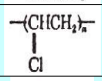
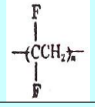
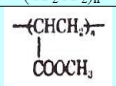
الشكل الثالث:

خواص البيتومين في هذه الحالة تتعدل بشكل فعلي ، والبولمير الموجود ينتفخ نتيجة امتصاص بعض الزيت الموجود في البيتومين. ومن أشهر أنواع هذه البولميرات، بولي ايثيلين(PE) ، وبولي بروبيلين(PP) ، وبولي سيترين ، (PS) ، و ايتيل فينيل الأستيات (EVA) وغيرها . والجدولين رقم (2) و(3) يبينان أمثلة عن بعض أنواع البولميرات إضافة إلى التسمية العالمية حسب أيوباك (IUPAC) [10] :

الجدول (2): بعض أنواع البولميرات إضافة إلى التسمية العالمية حسب أيوباك (IUPAC)

ترتيب البوليمر	الإسم المألوف	التسمية حسب IUPAC
$(-CH_2CH_2-)n$	بولي إيثيلين	بولي إيثيلين
$(-CH(CH)_3CH_2-)n$	بولي بروبيلين	بولي بروبيلين
$(-C(CH_3)_2-CH_2-)$	بولي أيزوبيوتيلين	بولي (١، ١- داي ميثيل إيثيلين)
$(-CH=CHCH_2CH_2-)$	بولي بيوتاداين	بولي (١- بيوتينيلين)
$(-CH(CH_3)-CH=CHCH_2-)$	بولي أيزوبرين	بولي (١- ميثيل – ١ – بيوتينيلين)
	بولي ستيرين	بولي (١- فنيل إيثيلين)
	بولي (أكريلو نتريل)	بولي (١- سيانو إيثيلين)

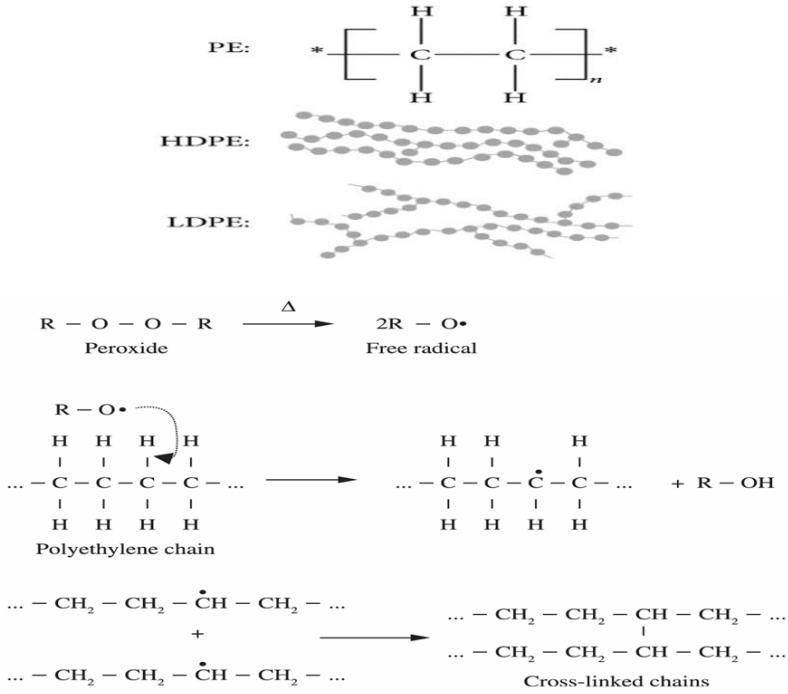
الجدول (3): بعض أنواع البولميرات إضافة إلى التسمية العالمية حسب أيوباك (IUPAC)

ترتيب البوليمر	الإسم المألوف	التسمية حسب IUPAC
	بولي (كحول الفينيل) Poly (vinyl alcohol)	بولي (١- هيدروكسي إيثيلين) poly (1- hydroxyl ethylene)
	بولي (خلات الفينيل) poly (vinyl acetate)	بولي (١- اسيتوكسي إيثيلين) poly (1- acetoxy ethylene)
	بولي (كلوريد الفينايل) poly (vinyl chloride)	بولي (ا- كلورو إيثيلين) poly (1- chloroethylene)
	بولي (فلوريد الفينيليدين) poly (vinylidene fluoride)	بولي (١، ١ – داي فلورو إيثيلين) poly (1,1-diflouroethylene)
$-(CF_2CF_2)_n$	بولي (تترافلورو إيثيلين) poly (tetraflouro ethylene)	بولي (داي فلورو ميثيلين) poly (difluoromethylene)
	بولي (أكريلات الميثيل) poly(methyl acrylate)	بولي [١ – (ميثوكسي كربونيل)- إيثيلين] poly [1-(methoxy carbonyl)ethylene]

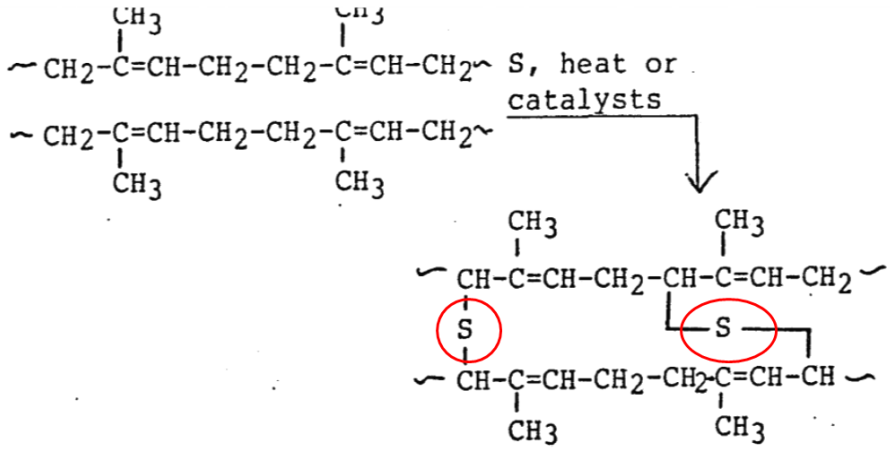
مع استخدام البولميرات ذات البنية غير المشبعة لتعديل البيتومين تبين بأنها تتعرض للتلدن والتحلل نتيجة تعرضها للعوامل الحرارية (ارتفاع أو انخفاض درجة الحرارة) والإجهاد الميكانيكي ، مما يؤدي إلى تراجع تأثير هذه الإضافات عند وضع المشاريع في ظروف الاستثمار . و يعاني البيتومين المعدل بالبولميرات من عدم الاستقرار في البنية

الهيكلية تحت تأثير العوامل الجوية المناخية و تكرار الحمولات بعد فترة قصيرة من تنفيذه ووضعه في الاستثمار ، مما لوحظ ظهور العديد من العيوب والتشققات التي أدخلت الباحثين في حيرة، رغم الدقة في التصميم والتنفيذ ومن هنا انبثقت فكرة البحث عن إضافات مساعدة تحد وتمنع ظهور أي عيوب للتمكن من الاستفادة من فعالية البوليمرات المضافة ومن أهمها هي الكبريت . إن إضافة الكبريت يعمل على استقرار البنية الهيكلية للإسفلت المعدل بالبوليمرات والمحافظة على ثباتها تحت تأثير عوامل الاستثمار ويوضح الشكل رقم (1) السلاسل الطولية الممتدة غير المترابطة في البولي ايثيلين.

الأسلوب الحالي هو إضافة المستوى المطلوب من البوليمر مع مادة متفاعلة تعزز تشابك جزيئات البوليمر حتى يتم استيفاء خواص طبقات الرصف الإسفلتية المطلوبة، من أجل ذلك سنضيف مادة متفاعلة مع البوليمر وهي الكبرى. ويوضح الشكل رقم 2 الروابط بين السلاسل بعد إضافة المادة المتفاعلة (الكبريت S) .



الشكل (1) السلاسل الطولية الممتدة غير المترابطة في البولي ايثيلين.



الشكل (2) الروابط بين السلاسل بعد إضافة المادة المتفاعلة (الكبريت S) .

6 . تحديد خواص البيتومين الأولية:

في البداية تم تحديد الخواص الأولية لعينات البيتومين المختبرة وهو بيتومين 100-85 ومصدره مصفاة حمص ، من خلال إجراء تجارب الغرز في درجات الحرارة 25°C) وتحديد درجة حرارة التميع وفق اختبار الكرة والحلقة، الاستطالة ، ودرجة الوميض ثم أعيدت هذه التجارب على البيتومين المعدل بالبولي ايثلين (PE) ومن ثم المعدل بمزيج بولمير . كبريت / PE-S/ .

أجريت بعد ذلك تجربة الفاقد بالحرارة على البيتومين المعدل ثم أعيدت نفس الاختبارات السابقة على البيتومين بعد تجربة الفاقد، وفيما يلي نتائج هذه التجارب :

6 . 1 تحديد الغرز للبيتومين:

أجريت تجربة الغرز بدرجة الحرارة 25°C للبيتومين غير المعدل A، وللبيتومين المعدل بالـ PE وفق أربع نسب (1-2-3-4) %.

تحديد الغرز بدرجة حرارة 25°C 0.1×mm (100gr-5sec) قبل اختبار فاقد الوزن بالحرارة ويبين الشكل (3) والجدول(4) نتائج التجربة :

الجدول (4) نتائج الغرز بدرجة حرارة 25°C للبيتومين غير المعدل A

العينة	A

94	95	96	(100gr-5sec-0.1×mm)،P،I
95	96	95	(100gr-5sec-0.1×mm)،P،II
93	94	93	(100gr-5sec-0.1×mm)، P،III
93	96	95	(100gr-5sec-0.1×mm)، P،IV
95			(100gr-5sec-0.1×mm)، P،الوسطي

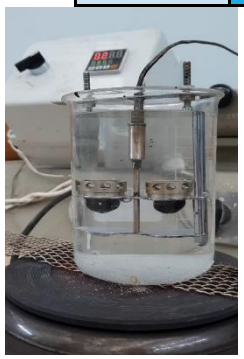
الشكل رقم (3) تجربة الغرز بدرجة حرارة C°25 للبيتومين غير المعدل A

6-2 تحديد درجة حرارة التميع (تجربة الكرة والحلقة):

أجريت تجربة تحديد درجة حرارة التميع على البيتومين غير المعدل ويوضح الشكل (4) تجربة التميع ، بينما الجدول رقم (5) نتائج التجربة .

الجدول (5) نتائج تحديد درجة حرارة التميع للرابط البيتوميني غير المعدل A

العينة	A
درجة التميع °C	52
	53
	52
	53
الوسطي °C	52.3



الشكل رقم (4) تجربة تحديد درجة حرارة التميع للرابط البيتومينيي غير المعدل A

3-6 تحديد الاستطالة (قابلية السحب):

أجريت تجربة تحديد الاستطالة على البيتومين الأولي غير المعدل A والنتائج مبينة بالجدول رقم(6) ومراحل اجراء التجربة مبينة بالشكل رقم (5) :

الجدول (6) نتائج تحديد درجة حرارة التميع للرابط البيتومينيي غير المعدل A

العينة	A
الاستطالة cm	159
	160
	158
	157
الوسطي cm	158.5

الشكل رقم (5) تجربة تحديد الاستطالة للرابط البيتومينيي غير المعدل A

4-6 تحديد درجة الوميض للرابط البيتومينيي :

أجريت التجربة على البيتومين غير المعدل A بطريقة (كليفلاند) للطبق المفتوح وكانت درجة الوميض C°313 ، والشكل رقم (6) يظهر تجربة تحديد درجة الوميض .

الشكل (6) تجربة تحديد درجة الوميض بطريقة (كليفلاند) للرابط البيتوميني غير المعدل

6-5 تحديد فاقد الوزن بالحرارة للرابط البيتوميني :

أجرينا اختبار فاقد الوزن بالحرارة للبيتومين غير المعدل والنتائج موضحة بالجدول (7) :

الجدول (7) نتائج تحديد الفاقد بالحرارة للرابط البيتوميني غير المعدل A

رقم العينة	نسبة الفاقد بالوزن %	الوسطي %
1	0.21	0.19
2	0.19	
3	0.18	
4	0.16	
5	0.18	

6-6 تحديد خواص الرابط البيتوميني المتبقي :

وبعد اختبار فاقد الوزن بالحرارة قمنا بإجراء التجارب السابقة (الغرز – الاستطالة – درجة حرارة التميع) على البيتومين الناتج عن تجربة الفاقد بالحرارة والنتائج موضحة في الجدول رقم (8) :

الجدول (8) نتائج تجارب على البقايا للرابط البيتوميني غير المعدل A

تحديد الخواص للرابط البيتوميني غير المعدل (البقايا) بعد تجربة فاقد الوزن بالحرارة	
تحديد الغرز للبقايا تحديد الغرز بدرجة حرارة 25° (100gr-5sec)	53
تحديد درجة حرارة التميع ° C	43.2
تحديد الاستطالة (قابلية السحب) cm	127

. بعد تحديد الخواص الأولية للرابط البيتوميني المستخدم في البحث تم الانتقال إلى المرحلة الثانية وهي تعديل البيتومين بإضافة بوليمر بولي ايثلين (PE) وفق أربع نسب (1-2-3-4) % ودراسة التغيرات في خواص الرابط .

7 تحديد خواص الرابط البيتوميني المعدل بـ (PE) :

7-1 تحديد الغرز للرابط البيتوميني المعدل :

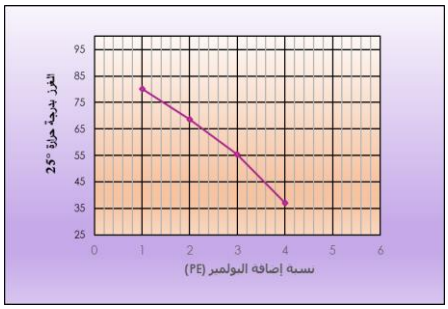
أجريت تجربة الغرز بدرجة الحرارة 25°C للبيتومين المعدل بالـ PE وفق أربع نسب (1-2-3-4) %.

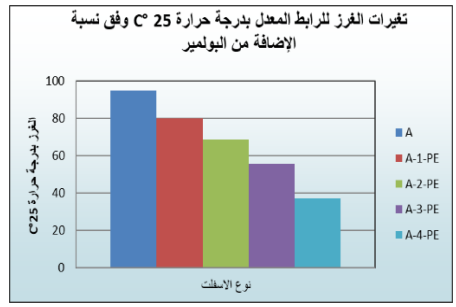
تحديد الغرز بدرجة حرارة 25°C 0.1×mm (100gr-5sec) قبل اختبار فاقد الوزن بالحرارة والنتائج موضحة بالجدول رقم (9) والشكل رقم (7) :

الجدول (9) نتائج الغرز بدرجة حرارة 25°C للبيتومين المعدل بـ PE

A-4-PE			A-3-PE			A-2-PE			A-1-PE			العينة
37	38	37	57	54	55	67	69	69	78	81	79	I,P,(100gr-5sec-0.1×mm)
36	38	40	56	55	56	67	67	68	80	80	82	II,P,(100gr-5sec-0.1×mm)
35	37	35	54	56	55	68	69	70	79	82	81	III, P,(100gr-5sec-0.1×mm)
37	37	38	56	55	57	69	70	71	81	79	80	IV, P,(100gr-5sec-0.1×mm)
37.1			55.5			68.66			80.16			, P,(100gr-5sec-0.1×mm)الوسطي

نلاحظ من النتائج انخفاض في درجة غرز البيتومين بإضافة نسب من PE أي زيادة في قساوة البيتومين بزيادة نسبة البولمير المضاف له أي تحسن في الممانعة الحرارية .





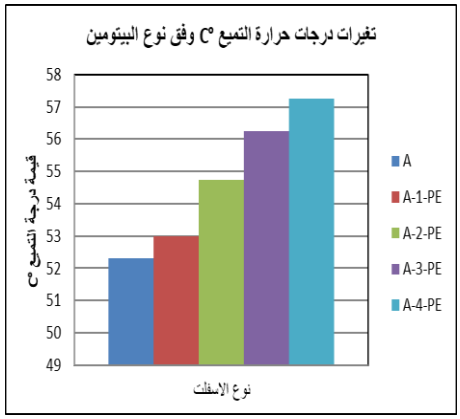
الشكل (9) تغيرات درجة الغرز بدرجة حرارة 25°C للبيتومين المعدل بـ PE

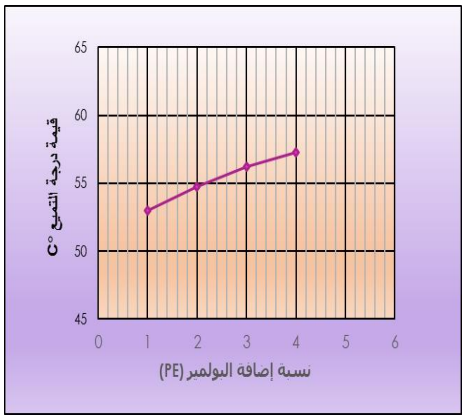
2-7 تحديد درجة حرارة التميع (تجربة الكرة والحلقة):

أجريت تجربة درجة حرارة التميع على البيتومين المعدل الـ PE والنتائج موضحة بالجدول رقم (10) والشكل رقم (10):

الجدول (10) نتائج تجربة تحديد درجة التميع للبيتومين المعدل بالـ PE

A-4-PE	A-3-PE	A-2-PE	A-1-PE	A	العينة
58	58	56	54	52	درجة التميع °C
57	56	55	53	53	
56	55	54	52	52	
58	56	54	53	53	
57.25	**56.25**	**54.75**	**53**	**52.3**	**الوسطي °C**





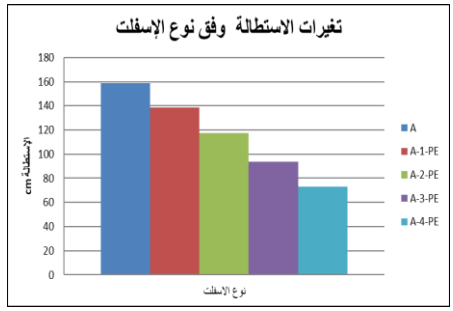
الشكل (10) تغيرات درجة التميع للبيتومين المعدل بـ PE

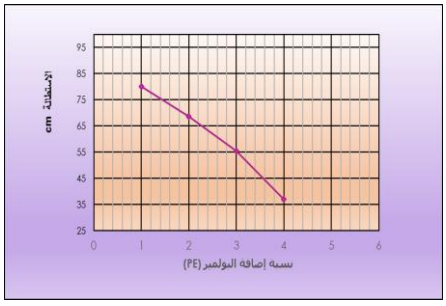
3-7 تحديد الاستطالة (قابلية السحب cm):

أجريت تجربة الاستطالة على البيتومين المعدل الـ PE والنتائج موضحة بالجدول رقم (11) والشكل رقم (11):

الجدول (11) نتائج تجربة الاستطالة للبيتومين المعدل بالـ PE

العينة	A	A-1-PE	A-2-PE	A-3-PE	A-4-PE
الاستطالة cm	159	140	117	93	73
	160	138	115	92	75
	158	137	119	96	71
	157	139	118	94	74
الوسطي (cm)	**158.5**	**138.5**	**117.25**	**93.75**	**73.25**





الشكل (11) تغيرات قيم الاستطالة للبيتومين المعدل بـ PE

تظهر النتائج السابقة زيادة في قيم درجة حرارة التميع، بزيادة نسبة إضافة البولمير وهذا يوافق بيتومين أقسى وأكثر قدرة على تحمل درجات الحرارة المرتفعة، التي تتعرض لها الطبقة السطحية للرصف المرن .

إن انخفاض قيمتي الغرز والاستطالة المترافق مع ارتفاع درجة حرارة التميع ينعكس بدوره على ممانعة أكبر لدرجات الحرارة المرتفعة .

3-7 تحديد فاقد الوزن بالحرارة للرابط البيتوميني :

لدى إجراء اختبار فاقد الوزن بالحرارة للبيتومين المعدل بالـ PE حصلنا على النتائج موضحة بالجدول (12) :

الجدول (12) نتائج تحديد فاقد الوزن بالحرارة للرابط البيتوميني المعدل بال PE

العينة	A	A-1-PE	A-2-PE	A-3-PE	A-4-PE
الفاقد %	0.21	0.16	0.13	0.13	0.12
	0.19	0.15	0.14	0.12	0.11
	0.18	0.16	0.13	0.14	0.13
	0.16	0.17	0.15	0.12	0.11
الوسطي %	0.19	0.16	0.14	0.13	0.12

ويبين الجدول (13) التغيرات في خواص البيتومين المعدل بالـ PE .

الجدول (13) التغيرات في خواص البيتومين المعدل بالـ PE

نسبة PE %	الغرز بدرجة حرارة 25 ° C	الاستطالة للبيتومين cm	درجة التميع للبيتومين C°	الفاقد في الوزن %
0	95	158.5	52.3	0.19
1	80.16	135.5	53	0.16
2	68.66	117.25	54.75	0.14
3	55.1	93.75	56.25	0.13
4	37.1	73.25	57.25	0.12

بالمقارنة بين النتائج الموضحة في الجدول رقم (13) للبيتومين المعدل ب PE وفق النسب الأربعة فإننا نجد ان نسبة الإضافة (2 %) هي النسبة المثالية لاعتمادها لتعديل البيتومين ، كون إضافة هذه النسبة أدت لزيادة الممانعة الحرارية وأعطت قيمة

أكبر لدرجة حرارة التميع مع انخفاض ملحوظ بقيمة الغرز و الاستطالة و بقاء قيمتهما ضمن الحدود المسموحة حسب المواصفات .

4-7 تحديد خواص الرابط البيتوميني المعدل بـ (2% PE) من وزن الرابط للبقايا بعد اختبار فاقد الوزن بالحرارة:

بعد تحديد نسبة الإضافة من الـ PE وزناً من الرابط البيتوميني قمنا بإجراء بعد اختبار فاقد الوزن بالحرارة التجارب التالية (الغرز – الاستطالة – درجة حرارة التميع) على البيتومين الناتج من تجربة الفاقد بالحرارة والمعدل بنسبة إضافة (2%) من الـ PE وتوضح النتائج في الجدول رقم (14) :

الجدول (14) نتائج تجارب على البقايا للرابط البيتوميني المعدل بـ (2% PE)

تحديد الخواص للرابط البيتوميني المعدل (A-2-PE)	
تحديد الغرز للبقايا تحديد الغرز بدرجة حرارة ٢٥° (100gr-5sec)	44.6
تحديد درجة حرارة التميع C °	56.5
تحديد الاستطالة (قابلية السحب) cm	105

والرابط البيتوميني المعدل بالـ PE يحقق الشروط والمواصفات المطلوبة للتجارب على البقايا بعد تجربة فاقد الوزن بالحرارة كما هو موضح في الجدول (15)

الجدول (15) نتائج التجارب للرابط المعدل بـ PE ومقارنتها مع الحدود المسموحة

تحقيق الرابط البيتوميني المعدل للاشتراطات بعد اختبار الفاقد بالحرارة	القيمة	الحدود المسموحة
النقص في الوزن %	0.14	-0.5,+0.5
الغرز للبقايا من الأصل %	64.95 %	MIN 54 %
تغير درجة حرارة التميع C °	1.75	MAX 9 C °

8 . تعزيز التشابك بين سلاسل البولمير بإضافة الكبريت :

كما ذكرنا سابقاً عند استخدام البوليمرات ذات البنية غير المشبعة تبين بأنها تتعرض للتلدن والتحلل نتيجة تعرضها للعوامل الحرارية (ارتفاع أو انخفاض درجة الحرارة)

والإجهاد الميكانيكي ، مما يؤدي إلى تراجع تأثير هذه الإضافات عند وضع المشاريع في ظروف الاستثمار ، و يعاني البيتومين المعدل بالبوليمرات من عدم الاستقرار في البنية الهيكلية تحت تأثير العوامل الجوية و المناخية ، و تكرار الحمولات بعد فترة قصيرة من تنفيذه ووضعه في الاستثمار . مما لوحظ ظهور العديد من العيوب والتشققات التي أدخلت الباحثين في حيرة رغم الدقة في التصميم والتنفيذ ومن هنا انبثقت فكرة البحث عن إضافات مساعدة تحد وتمنع ظهور أي عيوب للتمكن من الاستفادة من فعالية البوليمرات المضافة ومن أهم هذه الاضافات هي **الكبريت** ، إن إضافة الكبريت يعمل على استقرار البنية الهيكلية للإسفلت المعدل بالبوليمرات والمحافظة على ثباتها تحت تأثير عوامل الاستثمار.

الكبريت "الحر" أو "العنصري" عبارة عن مادة وفيرة ورخيصة. و الكبريت هو عبارة عن منتج ثانوي من معالجة البترول والغاز الطبيعي. تشمل مصادر الكبريت الحر مصافي البترول ووحدات تحلية الغاز الطبيعي . ويعتبر الكثير من منتجي الكبريت أنه منتج ثانوي ومهدور.

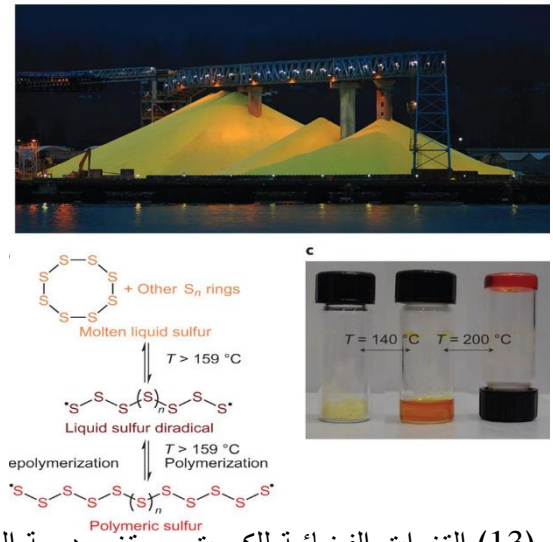
ففي عام 2005 أنتج حوالي 70 مليون طن على نطاق العالم من الكبريت كناتج ثانوي في مصافي النفط كما هو موضح بالشكل رقم (12).

الشكل رقم (12) الكبريت كمنتج ثانوي في مصافي النفط

ويبين الجدول رقم (16) والشكل رقم(13) خواص الكبريت المستخدم .

الجدول (16) خواص الكبريت المستخدم

الخواص الفيزيائية	
الطور	صلب
الكثافة (عند ٢٥ °س)	٢,٠٧ غ·سم$^{-٣}$
كثافة السائل عند نقطة الانصهار	١,٨١٩ غ·سم$^{-٣}$
نقطة الانصهار	٣٨٨,٣٦ ك، ١١٥,٢١ °س، ٢٣٩,٢٨ °ف
نقطة الغليان	٧١٧,٨ ك، ٤٤٤,٦ °س، ٨٣٢,٣ °ف
النقطة الحرجة	١٣١٤ ك، ٢٠,٧ ميغاباسكال
حرارة الانصهار	(أحادي) ١,٧٢٧ كيلوجول·مول$^{-١}$
حرارة التبخر	(أحادي) ٤٥ كيلوجول·مول$^{-١}$
السعة الحرارية (عند ٢٥ °س)	٢٢,٧٥ جول·مول$^{-١}$·كلفن$^{-١}$



الشكل (13) التغيرات الفيزيائية للكبريت مع تغير درجة الحرارة

8-1 تحديد الفاقد بالحرارة للرابط البيتومين :

. تم إضافة الكبريت إلى البيتومين المعدل بالبولي ايتلين بنسبة (2 %) (A-PE2) بنسب (1-2-3-4) % من وزن الرابط المعدل ، وتم إجراء التجارب المخبرية اللازمة لتحديد التغيرات في الخواص ، والجدول رقم (17) يبين خواص البيتومين المعدل بمزيج (بوليمر. كبريت) وفق كل نسبة إضافة .

الجدول (17) يبين خواص البيتومين المعدل بمزيج (بوليمر. كبريت)

نسبة S %	الغرز بدرجة حرارة ° 25 C	الاستطالة cm	درجة التميع C°	الفاقد في الوزن %
0	68.66	117.25	54.75	0.14
1	65.25	111.75	55.2	0.13
2	62.75	105.5	55.85	0.12
3	59.25	97.25	56.65	0.11
4	55.5	90	57.25	0.10

من خلال النتائج الموضحة في الجدول رقم (17) للبيتومين المعدل بمزيج (بوليمر . كبريت)، وفق النسب الأربعة فإننا نجد ان نسبة الإضافة (2 %) هي النسبة المثلى من الكبريت اللازم إضافتها للبيتومين المعدل بالبوليمر ، وبموجب هذه الإضافة نحصل على بيتومين معدل بمزيج (بوليمر . كبريت) ، ذو مقاومة مناسبة للحرارة لزيادة الممانعة الحرارية وقيمة أكبر لدرجة حرارة التميع مع انخفاض ملحوظ بقيمة الغرز و الاستطالة و بقاء القيم ضمن الحدود المسموحة حسب المواصفات [11] .

2-8 تحديد خواص الرابط البيتومينى المعدل بـ (2%S + 2% PE) للمتبقي :

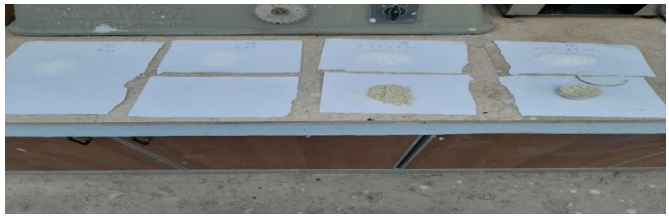
تم إجراء التجارب المخبرية على البيتومين الناتج بعد التجربة (البقايا) والمعدل بنسبة إضافة بـ (2%PE+2%S) وذلك بهدف معرفة تأثير الإضافات على البيتومين المعرض للتعب القصير الأمد، بهدف الحصول على ديمومة أكبر للبيتومين والنتائج موضحة في الجدول رقم (18) ومقارنتها مع الحدود المسموحة موضحة في الجدول رقم (19) :

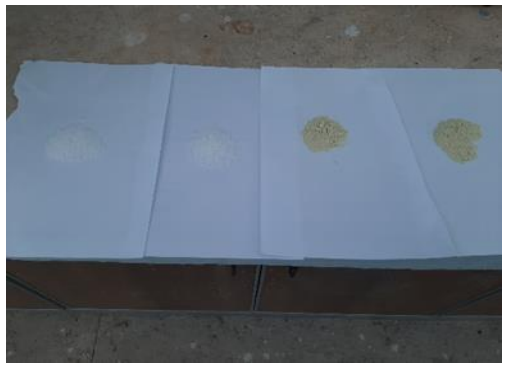
الجدول (18) نتائج التجارب للرابط المعدل بـ (2%PE+2%S) للمتبقي

تحديد الخواص للرابط البيتومينى المعدل (A-2-PE)	
تحديد الغرز للبقايا تحديد الغرز بدرجة حرارة ٢٥° (100gr-5sec)	44.8
تحديد درجة حرارة التميع C °	57.85

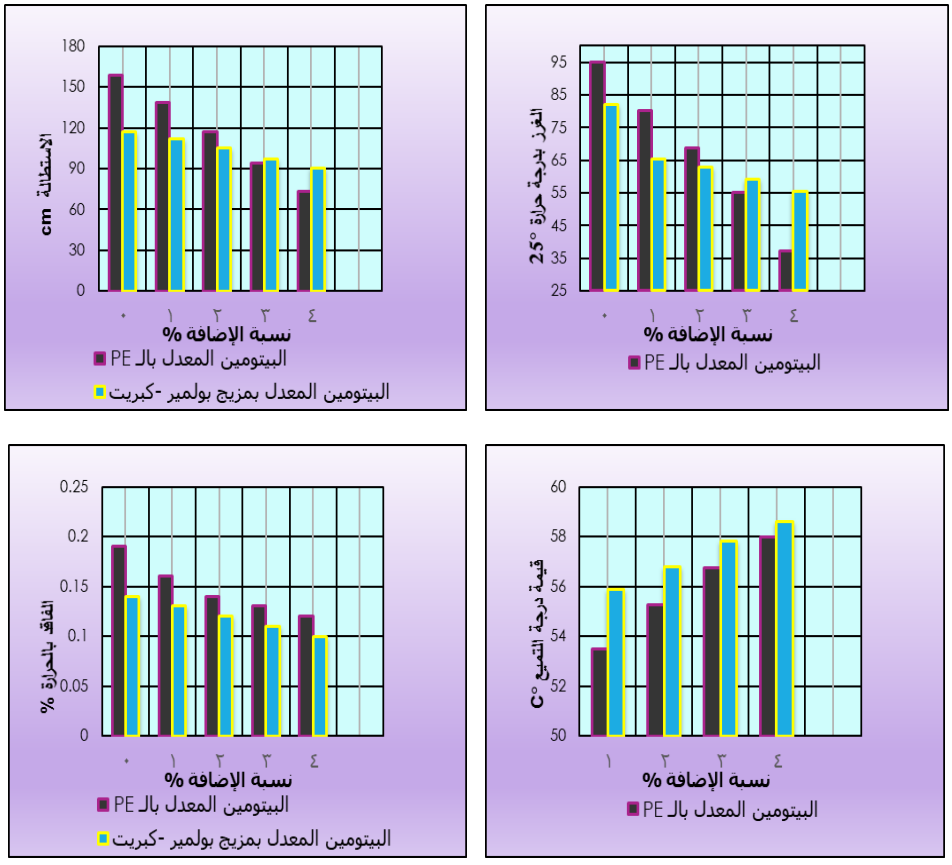
الجدول (19) مقارنة نتائج تجارب الرابط المدروس مع الحدود المسموحة

تحقيق الرابط البيتومينى المعدل للاشتراطات بعد اختبار الفاقد بالحرارة	القيمة	الحدود المسموحة
النقص في الوزن %	0.12	-0.5,+0.5
الغرز للبقايا من الأصل %	65.8 %	MIN 54 %
تغير درجة حرارة التميع C °	2	MAX 9 C °





والشكل رقم (14) يبين التغيرات الحاصلة على نتائج خواص الرابط البيتوميني :



الشكل رقم (14) تغيرات خواص البيتومين مع الإضافات

9 . الاستنتاجات :

1 – نلاحظ من خلال إضافة مزيج /بوليمر . كبريت / (2%PE+2%S) وزنا من البيتومين أن قيمة الغرز بدرجة حرارة 25° C انخفضت بنسبة % 35 ، ليتغير مجال الغرز من 85–100 للبيتومين غير المعدل إلى المجال 60–70 للبيتومين المعدل وهذا يوافق بيتومين أقسى وأكثر قدرة على تحمل درجات الحرارة المرتفعة، التي تتعرض لها الطبقة السطحية للرصف المرن.

2 – لوحظ انخفاض قيم الاستطالة بنسبة % 34 للبيتومين المعدل بمزيج (2%PE+2%S) وزنا من البيتومين .

3 – إن انخفاض قيمتي الغرز والاستطالة المترافق مع ارتفاع قيمة درجة حرارة التميع للبيتومين ينعكس بدوره على مقاومة أكبر لمختلف العوامل المناخية والاستثمارية خلال فترة الخدمة .

4 – لوحظ من خلال تجربة فاقد الوزن بالحرارة على البيتومين المعدل بمزيج / بوليمر . كبريت / وغير المعدل أن قيم النقص في الوزن لم تتجاوز الحدود المذكورة في المواصفة والتي لا تزيد قيمة الفاقد فيها % 1 بعد التسخين لمدة 5h ، وقد حسنت الإضافات المستخدمة من نسبة الفاقد بالتسخين بنسبة % 60 عند البيتومين المعدل .

5 – إن انخفاض قيمة الوزن بالحرارة بنسبة 60% للبيتومين المعدل مقارنة مع البيتومين قبل التعديل يدل على أن الإضافات المستخدمة قد حسنت من الممانعة الحرارية للبيتومين أثناء تعرضه للحرارة العالية، مما يبين الجدوى من استخدام هذه الإضافات لتحسين مقاومة البيتومين تجاه الحرارة التي تتعرض لها طبقة التغطية السطحية .

6 – نلاحظ إزدياد مقاومة الرابط البيتوميني المعدل للتعب قصير الأمد بنسبة 30 % ، وذلك من خلال التجارب التي تم إجراؤها على البقايا للرابط البيتوميني المعدل بعد تجربة الفاقد بالحرارة مما يشير إلى ديمومة أكبر للبيتومين المعدل .

10: المراجع :

1- **Seriy N&Bill .Recyclabiti of Moisture Damaged Felexible Pavements،1993**
2- **Felice Giuliani.Effects of polymer modification on the resistant of asphalt binder ،2009**
3- **FAA.Engineering.Polymer-Moddified Asphalt،1990**
4- **Bernared Brule.Polymer use in the road construction industruy،2007**
5- **Charles WSwartz.Evalution of eni modified asphalt.2002**
6- **Burak Sengon.Properties and microstryre of SBS polymer modified bitumen،2008**
7- **Filippo Merusi.Kerosen resistance of binder binder modified with crumb rubber.2009**
8- **Sharp A-341.fundamental properties of asphalt.1993**
9- **Jale Hacaloglu.Polysis mass spectrometric of styrene-butadiene block and random copolymer.1997**
10 . **د.عبد الله الهزازي . "كتاب علم البوليمرات" ، 1997**
11 . **الشروط والمواصفات الفنية لأعمال الطرق والجسور،" الأعمال البيتومينية "، وزارة المواصلات السورية ، الجزء الرابع،2002 ./AASHTO14-ASTM2018 /**