

Self-Healing of Hot Bituminous Mixtures by Using Microwaves

Dr. Bassam Sultan *
Emad Ahmad Salem **

(Received 14 / 1 / 2023. Accepted 19 / 2 / 2023)

□ ABSTRACT □

The research aims to study the self-healing property of hot bituminous mixtures when subjected to electromagnetic induction by microwave waves.

The materials included in the design of bituminous mixtures were characterized, and then prismatic samples were prepared, modified by adding steel shavings with different percentages of the weight of fine aggregate then, the flexural tensile experiment was conducted to determine the initial fracture strength of these samples.

After that, the samples were heated by a microwave device for three periods of time and the temperature reached was recorded. the flexural tensile experiment was repeated to determine the fracture strength of these samples after each induction period.

The results showed that the minimum temperature at which the healing begins is (50°C) after an induction time (60s) and the highest healing rate reached by the samples was (85.9%) at an addition rate of (2%) and a heating time of (180s).

Keywords: self-healing, steel shavings, Induction heating, microwaves.

* Professor, Department of Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Postgraduate Student (Master), Department of Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

المعالجة الذاتية للخلطات البيتومينية الساخنة باستخدام أمواج المايكروويف

د. بسام سلطان*

عماد احمد سالم **

(تاريخ الإيداع 14 / 1 / 2023. قُبل للنشر في 19 / 2 / 2023)

□ ملخص □

يهدف البحث إلى دراسة خاصية المعالجة الذاتية للخلطات البيتومينية الساخنة عند تعريضها للتحميل الكهربائي بواسطة أمواج المايكروويف.

تم توصيف المواد الداخلة في تصميم الخلطات البيتومينية ومن ثم تم تحضير عينات موشورية الشكل معدلة بإضافة النشارة الفولاذية بنسب مختلفة من وزن الحصويات الناعمة ومن ثم تم إجراء تجربة الشد بالانعطاف لتحديد قوة الكسر المبدئية لهذه العينات بعد ذلك تم تسخين العينات بواسطة جهاز المايكروويف لثلاث فترات زمنية وتسجيل درجة الحرارة التي وصلت إليها وتم تكرار تجربة الشد بالانعطاف لتحديد قوة كسر هذه العينات بعد كل فترة تحريض. بينت النتائج أن الحد الأدنى لدرجات الحرارة التي يبدأ عندها الشفاء هو (50C⁰) وذلك بعد زمن تحريض (60s) وأعلى نسبة شفاء وصلت لها العينات كانت (85.9%) عند نسبة إضافة (2%) وزمن تحريض (180s).

الكلمات المفتاحية: المعالجة الذاتية، النشارة الفولاذية، التسخين التحريضي، موجات المايكروويف.

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

** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة المواصلات والنقل - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

الخلطات البيتومينية الساخنة أحد أكثر أنواع الرصف شيوعاً في العالم ويتأثر هذا الرصف بحركة المرور والعوامل البيئية المحيطة حيث تؤدي هذه العوامل لانهايار الرصف مع مرور الوقت بغض النظر عن طريقة التصميم والانشاء [1]. خلال فترة خدمة الطريق وقبل نهايتها، يتراجع أداء طبقات الرصف وتحدث عمليات تمدد وتقلص لهذه الطبقات ونتيجة لذلك، يصبح الرابط البيتوميني أكثر هشاشة، مما يتسبب في حدوث تشققات صغيرة وفي المستقبل القريب سيحدث تشقق في السطح الرابط بين البيتومين والحصىات [2]. من أجل منع هذا النوع من العيوب في الرصف المرن، يجري البحث حالياً عن طرائق تستخدم للحفاظ على الرصف البيتوميني، ومنها التسخين بالتحريض الكهروطيسي (الكهرومغناطيسي) (Induction Heating) للخرسانة البيتومينية [3]. في بحثنا هذا نسعى لحلول جديدة وفعالة تعالج تلك العيوب التي تمت مناقشتها مسبقاً.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في تقديم حل لإصلاح الشقوق في طبقات الرصف المرن من خلال تبيان تأثير أمواج المايكروويف واستخدام نشارة الفولاذ الكربوني الطري كمادة موصلة للحرارة للخلطات البيتومينية الساخنة للمساعدة في المعالجة الذاتية لهذه الخلطات.

أهداف البحث:

1. تحديد النسبة المثالية للإضافة النشارة لفولاذية التي تعزز المعالجة الذاتية للخلطات البيتومينية الساخنة.
2. تحديد زمن التسخين الأمثل ودرجة الحرارة المطلوبة للوصول إلى الشفاء.

طرائق البحث ومواده:**1- طرائق البحث:**

- تم اعتماد المنهجية التجريبية في إجراء البحث من خلال:
- ❖ اختبارات الرابط البيتوميني التوصيفية: تجربة الغرز، تجربة الممطولية، تجربة نقطة التميع، تجربة نقطة الوميض والاشتعال، تجربة النقص في الوزن، تجربة الوزن النوعي.
 - ❖ دراسة الخواص الفيزيائية لنشارة الفولاذ الكربوني الطري: (القطر، الكثافة، نقطة الانصهار).
 - ❖ اختبارات توصيف الحصىات والتي تتضمن (التركيب الحبي، لوس أنجلوس، المكافئ الرملي، الامتصاص، الوزن النوعي).
 - ❖ تصميم خلطة بيتومينية وفق مارشال لتحديد نسب البيتومين الأمثل في الخلطة.
 - ❖ بعد القيام بتوصيف المواد وإجراء التجارب اللازمة عليها وتحديد نسبة البيتومين المثالية وفق مارشال، تم تحضير عينات موشورية الشكل من خلطات بيتومينية ساخنة معدلة بإضافة النشارة الفولاذية بنسب مختلفة (0%، 2%، 4%، 6%، 8%) من وزن الحصىات الناعمة.
 - ❖ إجراء تجربة (الشد بالانعطاف) لتحديد قوة كسر هذه العينات قبل تعريضها للتحريض الكهروطيسي باستخدام أمواج المايكروويف.

❖ تسخين العينات بواسطة التحريض الكهربي (الميكروويف) لثلاث فترات زمنية (60,120,180s) لكل عينة لمعرفة زمن التسخين الأمثل ودرجة الحرارة المطلوبة لشفاء العينات.

❖ تكرار إجراء تجربة (الشد بالانعطاف) لتحديد قوة كسر هذه العينات بعد كل فترة تعريض للتحريض الكهربي باستخدام أمواج المايكروويف لمعرفة نسبة الشفاء التي وصلت إليها كل عينة.

2- مواد البحث وخواصها:

1-2- البيتومين: المستخدم في هذه الدراسة هو بيتومين صنف (60-70) ناتج مصفاة بانياس.

الجدول (1) نتائج اختبارات البيتومين

التجربة	المواصفة	النتيجة	الحدود وفق AASHTO
الغرز	AASHTO T-49	64.5	60-70 (1/10mm)
قابلية السحب المطاوعة	AASHTO T-51	143	100 cm min
نقطة التميع	AASHTO T-53	48	48°-51°
نقطة الوميض	AASHTO T-48	تجاوز (320 C ⁰) ولم يومض أو يشتعل	لا يقل عن 232.2°
نقطة الاشتعال			
الوزن النوعي	AASHTO T-228	1.028	1.01-1.03
الفائد بالتسخين من الزيوت والمركبات الإسفلتية	AASHTO T-179	0.73	1% max

من الجدول السابق نجد أن نتائج اختبارات البيتومين محقق للمتطلبات الفنية للبيتومين صنف (60-70) وفق (AASHTO).

2-2- الجسيمات الموصلة للحرارة: وهي نشارة الفولاذ الكربوني الطري الناتج من أحد مخارط مخبر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين وخواصها موضحة في الجدولين (2-3).

الجدول (2) خواص الجسيمات الموصلة للحرارة

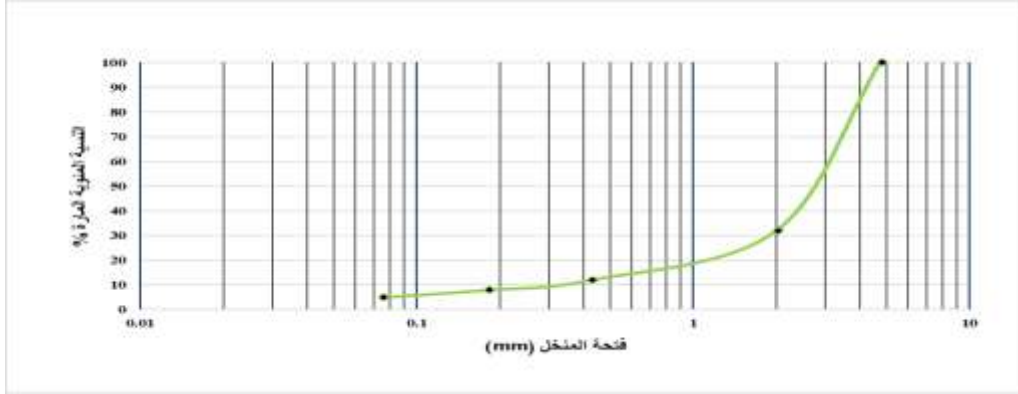
الخاصية	التفاصيل
نوع الاضافة	نشارة الفولاذ الكربوني الطري
القطر (mm)	0-2
الكثافة (gr/cm ³)	6.12
نقطة الانصهار (°C)	1400



الشكل (1) نشارة الفولاذ الكربوني الطري

الجدول (3) نتائج التحليل الحبي للنشارة الفولاذية

رقم المنخل	فتحة المنخل (mm)	النسبة المئوية المارة %
No 4	4.75	100
No 10	2	32
No 40	0.425	12
No 80	0.18	8
No 200	0.075	5



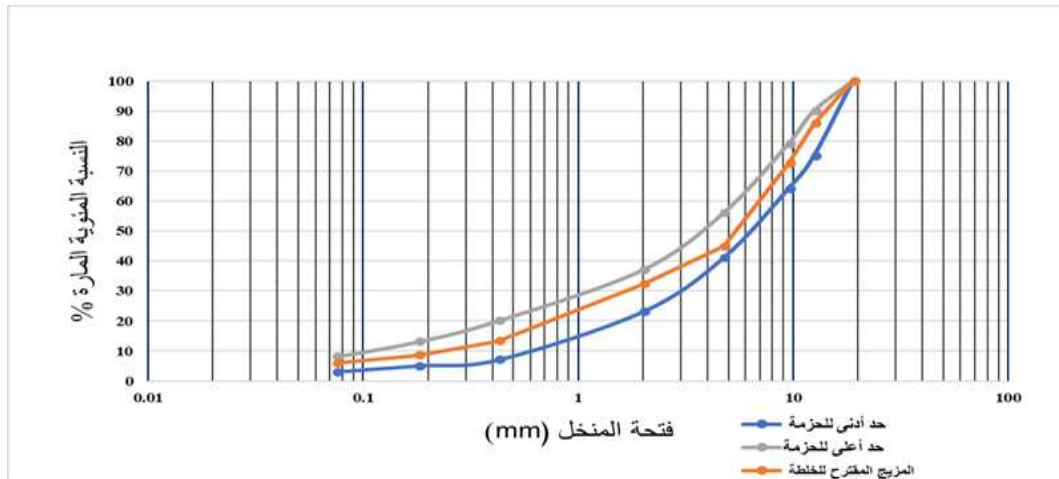
الشكل (2) التحليل الحبي للنشارة الفولاذية

3-2- الحصويات: حصويات مصدرها مدينة حسياء ونتائج التجارب على الحصويات موضحة بالجدولين (4-5).

الجدول (4) نتائج تجربة التحليل الحبي والمزيج المقترح

فتحة المنخل (مم)	بحص خشن 25%	بحص متوسط 25%	رمل رمادي 30%	رمل بني 20%	المزيج المقترح	الحزمة النظامية لطبقة الاهتراء البيتومينية وفق AASHTO T-30-77
19	100	100	100	100	100	100
12.5	43.8	100	100	100	85.9	75-90
9.5	7.9	81.8	100	100	72.4	64-79
4.75	0.7	2.6	95.9	76.2	44.9	41-56
2.00	0.7	1.2	76.3	44.5	32.3	23-37
0.425	0.7	1.2	27	23.7	13.3	7-20
0.18	0.7	1.2	14.3	18.5	8.5	5-13
0.075	0.7	1.2	10	13.2	6	3-8

من الجدول السابق نجد أن التحليل الحبي للمزيج المقترح محقق للمتطلبات الفنية لطبقة الاهتراء البيتومينية وفق (AASHTO T-30-77).



الشكل (3) المزيج المقترح للخلطة والحزمة النظامية

الجدول (5) نتائج التجارب على الحصويات

الحدود المسموحة	المواصفة وفق AASHTO	رمل بني	رمل رمادي	بحص وسط	بحص خشن	التجربة
-	AASHTO T-84&85	2.49	2.49	2.64	2.66	Gsb: الوزن النوعي الكلي
		2.56	2.56	2.68	2.67	Gssd : الوزن النوعي الكلي المشبع جاف السطح
		2.68	2.68	2.74	2.69	Gsa : الوزن النوعي الظاهري
		2.585	2.585	2.69	2.675	Gse : الوزن النوعي الفعال
		2.88	2.88	1.36	0.64	%Absorption الامتصاص
min 45%	AASHTO T-176	64.15	80.2	-	-	تجربة المكافئ الرملي للمواد الناعمة %
max 25%	AASHTO T-96	-	-	24.26	-	تجربة مقاومة الاهتراء للحصويات الخشنة %

من الجدول السابق نجد أن نتائج اختبارات المواد الحصوية محققة للمتطلبات الفنية لطبقة الاهتراء البيتومينية وفق (AASHTO).

3- تصميم الخلطة البيتومينية وفق تجربة مارشال:

صُممت الخلطة البيتومينية التي تم الاعتماد عليها لتحديد نسب البيتومين الأمثل في الخلطة البيتومينية وفق المواصفة (AASHTO T 245-78)[5].

وفق طريقة مارشال لتصميم الخليط البيتوميني كانت نسب البيتومين المثالية (4.2%) وعند هذه النسبة ووفق التدرج الحبي للمزيج الموضح سابقا في الجدول (4) تم تشكيل خلطة بيتومينية تحققت فيها تحققت المتطلبات الفنية لخواص مارشال وفق الجدول التالي:

الجدول (6) نتائج اختبار الخلطة البيتومينية المصممة وفق مارشال

الحدود المسموحة	نتائج الخلطة البيتومينية المصممة وفق مارشال	
4-6	4.2	نسبة البيتومين %
1100Min	1170	الثبات Kg
2-4	2.8	انسياب mm
-	2.386	كثافة مارشال gr/cm^3
3-5	4.2	نسبة الفراغات الهوائية %
65-75	68	نسبة الفراغات المليئة بالبيتومين %

وعند هذه النسبة تم تحضير العينات المشورية.

4- تحضير العينات المشورية:

تم تحضير (15) عينة مشورية الشكل في قوالب بأبعاد (16*4*4cm) لكل قالب وفق اختبار مقاومة الانضغاط للخلطات البيتومينية (AASHTO T 167 – 78) وبعد ذلك تم استخراج العينات من القوالب وتركها حتى تصل إلى درجة حرارة المخبر.

5- اختبار مقاومة الشد بالانعطاف:

تم اختبار العينات بواسطة جهاز الشد بالانعطاف عند درجة حرارة (20 ± 2 c°) للحصول على شقوق هشّة، بدون تشوه دائم [4]. من أجل الحصول على قوة انكسار كل عينة، أجريت الاختبارات مع السيطرة على ظروف الإجهاد، مع تحميل متزايد بمعدل تشوه يبلغ (50mm/min)، تم تسجيل القوة المطبقة في لحظة الكسر (F_i) ثم تم تخزين كل من نصفي العينات عند درجة حرارة (20 ± 2 c°) لمدة (4 ساعات) على الأقل.

تم تجميع نصفي العينات برفق في قالب، وتطبيق التسخين عن طريق التحريض ومراقبة درجة حرارة سطح عينات الاختبار باستمرار والشفاء (التحام العينة) يتم التبريد لمدة 4 ساعات أخرى، وبعدها تم حفظ العينات بالدرجة (-20 c°) لمدة 24 ساعة ومن ثم تم تطبيق اختبار الشد بالانعطاف مرة أخرى.

نسبة شفاء العينات $S(\tau)$: هي النسبة بين القوة المطبقة على عينة الاختبار بعد الشفاء $F_b(\tau)$ والقوة المطبقة على العينة قبل الشفاء من أجل كسرها (F_i) مع المحافظة على شروط التحميل.

حيث (τ) هو معامل يعطي فكرة عن كمية الطاقة الحرارية المطبقة على عينة اختبار الخرسانة البيتومينية أثناء عملية الشفاء.

$$S(\tau) = \frac{F_b(\tau)}{F_i}$$

الشكل (10) علاقة نسبة الشفاء بدلالة قوة الكسر

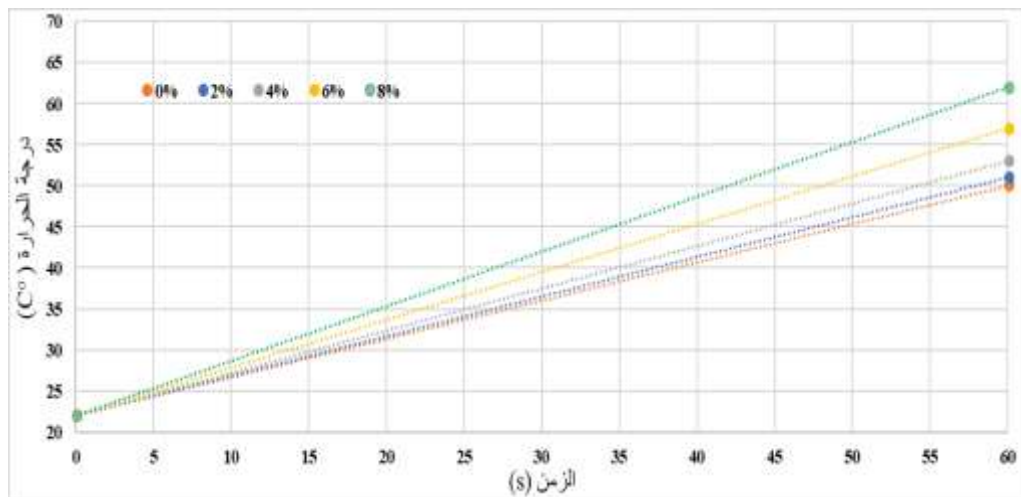
النتائج والمناقشة:

1- نتائج تسجيل درجة الحرارة بالترموتر الليزري:

تم قياس درجة حرارة العينات بواسطة مقياس حرارة ليزري بعد كل فترة تسخين بالتحريض والنتائج موضحة في الجداول التالية:

الجدول (7) درجة الحرارة المسجلة بعد التحريض (60s)

رقم العينة	النسبة المئوية للإضافة %	درجة الحرارة المبدئية	درجة حرارة العينات بعد التحريض (60s)	متوسط درجة الحرارة بعد التحريض (60s)
1	0	22	50	50
2		22	48	
3		22	52	
1	2	22	50	51
2		22	53	
3		22	50	
1	4	22	55	53
2		22	51	
3		22	53	
1	6	22	59	57
2		22	55	
3		22	57	
1	8	22	62	62
2		22	60	
3		22	64	

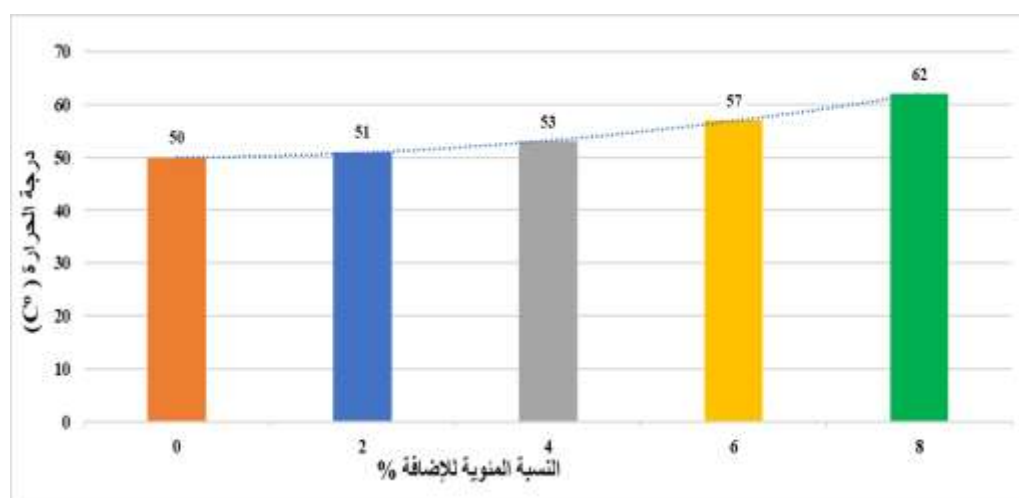


الشكل (11) يوضح العلاقة بين زمن التسخين (التحريض الكهرطيسي) ودرجة الحرارة

نلاحظ من الشكل (11) أن سرعة تسخين العينات تزداد مع زيادة نسبة الإضافة حيث أن متوسط سرعة التسخين لكل نسبة من الإضافة موضح في الجدول التالي

الجدول (8) متوسط سرعة التسخين بعد مدة تحريض (60s)

النسبة المئوية للإضافة %	متوسط تزايد درجة الحرارة بعد التسخين ل (60s)	متوسط سرعة التسخين (C°/s)
0	28	0.47
2	29	0.48
4	31	0.52
6	35	0.58
8	40	0.67

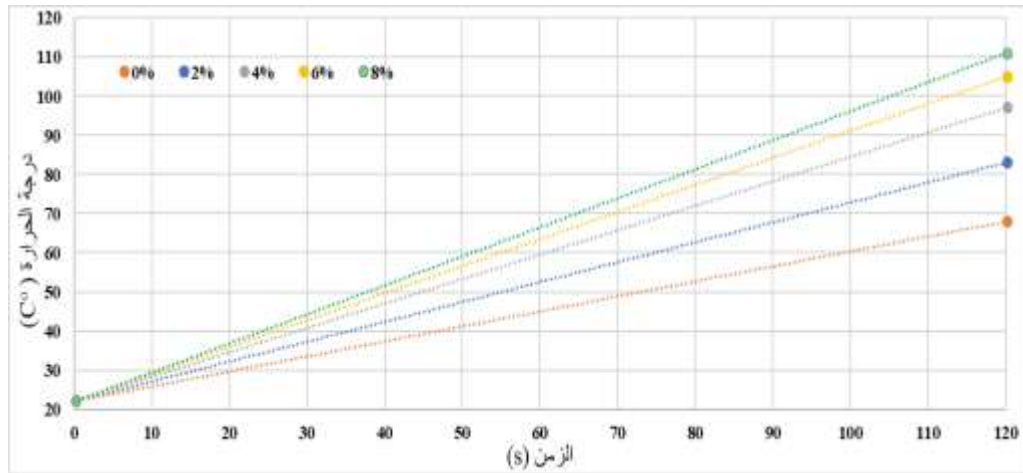


الشكل (12) يوضح العلاقة بين النسبة المئوية المئوية للإضافة ودرجة الحرارة بعد التسخين (60s)

نلاحظ من الشكل (12) أن درجة حرارة العينات تتناسب طردياً مع زيادة نسبة النشارة المضافة حيث وصلت درجة الحرارة العينات إلى (62 c°) مع نسبة إضافة (8%).

الجدول (9) درجة الحرارة المسجلة بعد التحريض (120s)

رقم العينة	النسبة المئوية للإضافة %	درجة الحرارة المبدئية	درجة حرارة العينات بعد التحريض (120s)	متوسط درجة الحرارة بعد التحريض (120s)
1	0	22	67	68
2		22	71	
3		22	66	
1	2	22	83	83
2		22	80	
3		22	86	
1	4	22	99	97
2		22	94	
3		22	98	
1	6	22	103	105
2		22	107	
3		22	105	
1	8	22	111	111
2		22	109	
3		22	113	

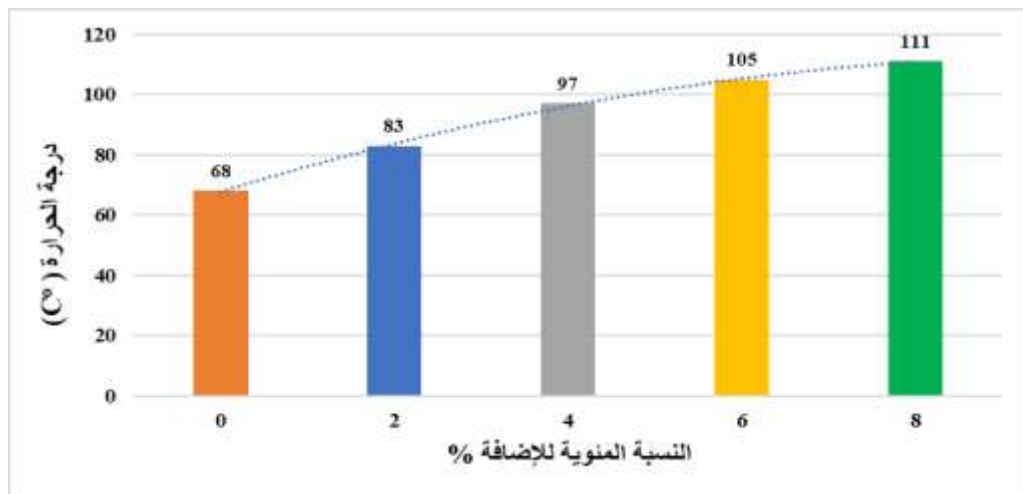


الشكل (13) يوضح العلاقة بين زمن التسخين (التحريض الكهرطيسي) (120s) ودرجة الحرارة

نلاحظ من الشكل (13) أن سرعة تسخين العينات تزداد مع زيادة نسبة الإضافة حيث أن متوسط سرعة التسخين لكل نسبة من الإضافة موضح في الجدول التالي:

الجدول (10) متوسط سرعة التسخين بعد مدة تحريض (120s)

النسبة المئوية للإضافة %	متوسط تزايد درجة الحرارة بعد التسخين ل (120 s)	متوسط سرعة التسخين (C°/s)
0	46	0.38
2	61	0.51
4	75	0.63
6	83	0.69
8	89	0.74

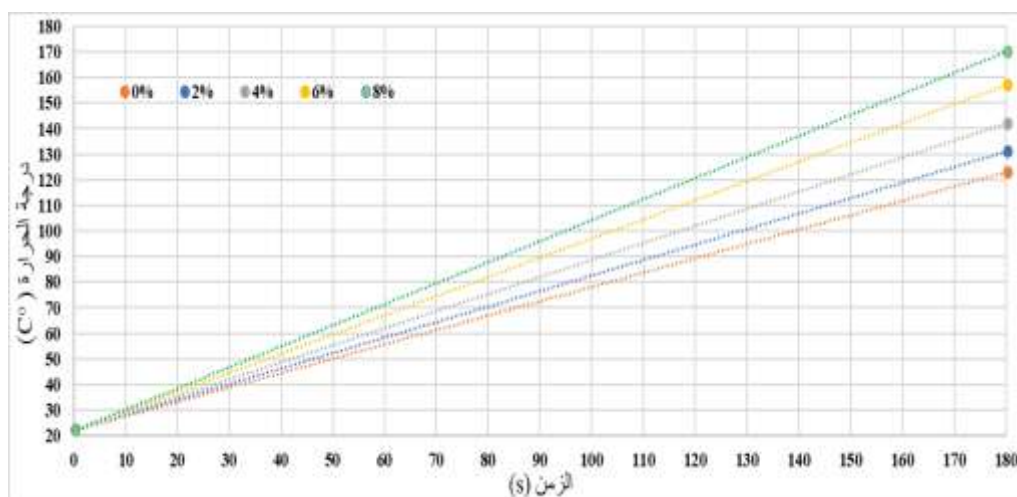


الشكل (14) يوضح العلاقة بين النسبة المئوية للإضافة ودرجة الحرارة بعد التسخين (120s)

نلاحظ من الشكل (14) أن درجة حرارة العينات تتناسب طردياً مع زيادة نسبة النشارة المضافة حيث وصلت درجة الحرارة العينات إلى (111 c°) مع نسبة إضافة (8%).

الجدول (11) درجة الحرارة المسجلة بعد التحريض (180s)

رقم العينة	النسبة المئوية للإضافة %	درجة الحرارة المبدئية	درجة حرارة العينات بعد التحريض (180s)	متوسط درجة الحرارة بعد التحريض (180s)
1	0	22	125	123
2		22	121	
3		22	123	
1	2	22	129	131
2		22	131	
3		22	133	
1	4	22	140	142
2		22	144	
3		22	142	
1	6	22	155	157
2		22	159	
3		22	157	
1	8	22	169	170
2		22	173	
3		22	168	

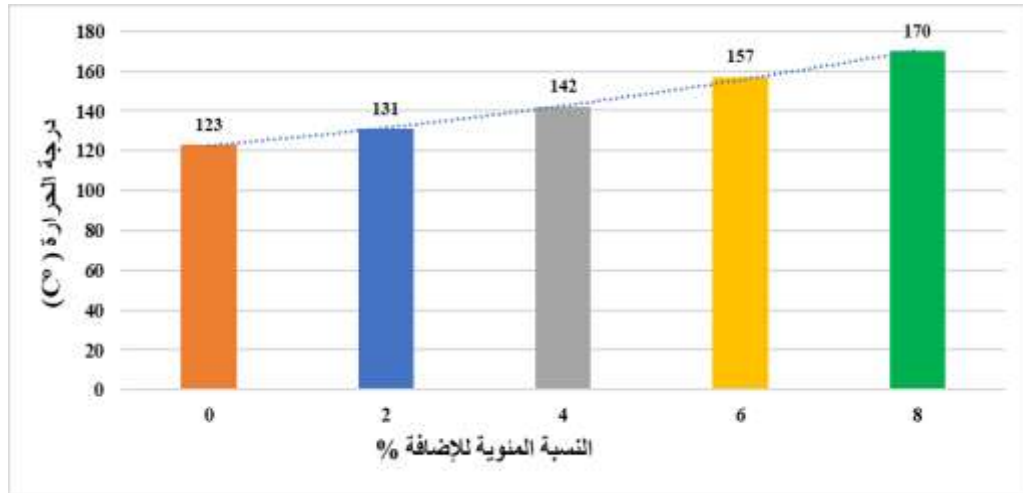


الشكل (15) يوضح العلاقة بين زمن التسخين (التحريض الكهربائي) (180s) ودرجة الحرارة

نلاحظ من الشكل (15) أن سرعة تسخين العينات تزداد مع زيادة نسبة الإضافة حيث أن متوسط سرعة التسخين لكل نسبة من الإضافة موضح في الجدول التالي:

الجدول (12) متوسط سرعة التسخين بعد مدة تحريض (180s).

النسبة المئوية للإضافة %	متوسط تزايد درجة الحرارة بعد التسخين ل (180 s)	متوسط سرعة التسخين (C°/s)
0	101	0.56
2	109	0.61
4	120	0.67
6	135	0.75
8	148	0.82



الشكل (16) يوضح العلاقة بين النسبة المئوية للإضافة ودرجة الحرارة بعد التسخين (180s)

نلاحظ من الشكل (16) أن درجة حرارة العينات تتناسب طردياً مع زيادة نسبة النشارة المضافة حيث وصلت درجة الحرارة العينات إلى (170 c°) مع نسبة إضافة (8%).

2- نتائج قوة الكسر المطبقة على العينات بعد إجراء تجربة الشد بالانعطاف:

تم إجراء تجربة (الشد بالانعطاف) لتحديد قوة كسر هذه العينات قبل تعريضها للتحريض الكهرطيسي باستخدام أمواج المايكروويف ومن ثم تم تكرار التجربة لتحديد قوة كسر هذه العينات بعد كل فترة تعريض للتحريض الكهرطيسي (60,120,180s) لمعرفة نسبة الشفاء التي وصلت إليها كل عينة ونتائج التجربة موضحة في الشكل (17) والجدول التالية:

الجدول (13) قوة الكسر المطبقة في تجربة الشد بالانعطاف بعد التسخين (60s).

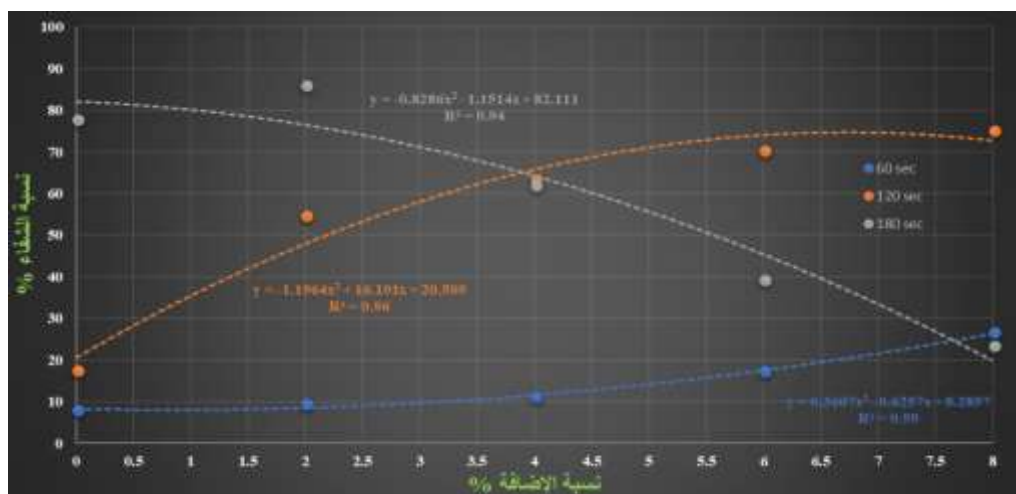
رقم العينة	النسبة المئوية للإضافة %	حمولة الكسر المبدئية (KN) (-20°C)	متوسط حمولة الكسر المبدئية (KN)	حمولة الكسر بعد التسخين (KN)	متوسط حمولة الكسر بعد التسخين (KN)	نسبة الشفاء %
1	0	0.62	0.63	0.02	0.05	7.9%
2		0.62		0.06		
3		0.64		0.07		
1	2	0.63	0.64	0.06	0.06	9.4%
2		0.63		0.07		
3		0.65		0.06		
1	4	0.63	0.63	0.07	0.07	11.1%
2		0.62		0.06		
3		0.64		0.07		
1	6	0.64	0.64	0.11	0.11	17.2%
2		0.65		0.10		
3		0.63		0.10		
1	8	0.63	0.64	0.16	0.17	26.6%
2		0.64		0.13		
3		0.66		0.21		

الجدول (14) قوة الكسر المطبقة في تجربة الشد بالانعطاف بعد التسخين (120s)

رقم العينة	النسبة المئوية للإضافة %	حمولة الكسر المبدئية (KN) (-20°C)	متوسط حمولة الكسر المبدئية (KN)	حمولة الكسر بعد التسخين (KN)	متوسط حمولة الكسر بعد التسخين (KN)	نسبة الشفاء %
1	0	0.62	0.63	0.10	0.11	17.5%
2		0.62		20.1		
3		0.64		0.10		
1	2	0.63	0.64	0.35	0.35	54.7%
2		0.63		0.33		
3		0.65		80.3		
1	4	0.63	0.63	0.40	0.40	63.5%
2		0.62		90.3		
3		0.64		0.40		
1	6	0.64	0.64	0.43	0.45	70.3%
2		0.65		0.46		
3		0.63		0.45		
1	8	0.63	0.64	0.48	0.48	75%
2		0.64		0.47		
3		0.66		0.49		

الجدول (15) قوة الكسر المطبقة في تجربة الشد بالانعطاف بعد التسخين (180s)

رقم العينة	النسبة المئوية للإضافة %	حمولة الكسر المبدئية (KN) (-20°C)	متوسط حمولة الكسر المبدئية (KN)	حمولة الكسر بعد التسخين (KN)	متوسط حمولة الكسر بعد التسخين (KN)	نسبة الشفاء %
1	0	0.62	0.63	0.50	0.49	77.8%
2		0.62		0.49		
3		0.64		90.4		
1	2	0.63	0.64	0.54	0.55	85.9%
2		0.63		0.55		
3		0.65		0.55		
1	4	0.63	0.63	0.40	0.39	61.9%
2		0.62		0.38		
3		0.64		0.39		
1	6	0.64	0.64	0.25	0.25	39.1%
2		0.65		0.23		
3		0.63		70.2		
1	8	0.63	0.64	50.1	0.15	23.4%
2		0.64		0.12		
3		0.66		0.17		



الشكل (17) يوضح العلاقة بين نسبة الإضافة ونسبة الشفاء خلال ثلاث فترات من التسخين

نلاحظ من الشكل (17) أنه وبعد التسخين لمدة (120s) كان المنحني البياني متزايداً وأعطى أعلى قيمة ارتباط بين نسبة الإضافة ونسبة الشفاء وكانت ($R^2=0.96$) أما عند التسخين لمدة (180s) كان المنحني البياني متناقصاً وأعطى قيمة ارتباط أقل وكانت ($R^2=0.94$) وتفسير ذلك أنه ومع زيادة مدة التسخين وصلت درجة حرارة العينات إلى ($C^{\circ} 170$) وعند هذه الدرجة سال البيتومين وقلة تغليفه للحصويات. وعند التسخين لمدة (120s) ومع نسبة إضافة (4%) وصلت نسبة الشفاء إلى (63.5%) عند درجة حرارة ($C^{\circ} 97$) وهي أعلى من نسبة الشفاء بعد التسخين لمدة (180s) والتي وصلت إلى (61.9%) عند درجة حرارة ($C^{\circ} 142$) مع نفس نسبة الإضافة. أعلى نسبة شفاء وصلت لها العينات كانت (85.9%) حيث وصلت درجة حرارة العينات إلى ($C^{\circ} 131$) عند نسبة إضافة (2%) وزمن تسخين (180s).

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. الحد الأدنى لدرجات الحرارة التي يبدأ عندها الشفاء هو ($C^{\circ} 50$) وذلك بعد زمن تسخين (60s) وبدون أي إضافة.
2. عند التسخين لمدة (120s) ومع نسبة إضافة (8%) وصلت نسبة الشفاء إلى (75%) عند درجة حرارة ($C^{\circ} 111$) وبالتالي زمن التسخين الأمثل في هذه الدراسة هو (120s) ودرجة الحرارة المثلى التي تعطي أعلى نسبة شفاء وتحافظ على تغليف البيتومين للحصويات هي ($C^{\circ} 111$).
3. العينات التي لم تحتوي على أي نسبة إضافة وعند التسخين لمدة (60s) وصلت إلى نسبة شفاء (7.9%) وعند التسخين لمدة (120s) وصلت إلى نسبة شفاء (17.5%) وعند التسخين لمدة (180s) وصلت إلى نسبة شفاء (77.8%) ودرجة حرارة ($C^{\circ} 123$) ومن نستنتج أنه يمكن أن تشفى العينات بدون إضافة نشارة الفولاذ ولكن سنزيد زمن التسخين إلى (180s).

4. التسخين بأمواج المايكروويف يؤدي إلى استرجاع متانة الرصف المرن ويؤدي تعافي الشقوق وبالتالي زيادة عمر خدمة الرصف المرن ويقلل من تكاليف صيانتته.

التوصيات:

1. الدراسة الحالية اقتصرت على نوع بيتومين واحد وهو بيتومين صنف (60-70) واستخدم خلطات بيتومينية ذات تدرج كثيف لذلك نوصي بالمستقبل بدراسة خاصية المعالجة الذاتية مع تغير نوع البيتومين وتصميم خلطات بيتومينية بتدرجات مفتوحة ومسامية.
2. في هذا البحث تم دراسة خاصية المعالجة الذاتية باستخدام طريقة التحريض الكهربي بواسطة أمواج المايكروويف لذلك نوصي بدراسة هذه الخاصية بطريقة أخرى مثل إضافة الكبسولات للخلطات البيتومينية.
3. دراسة خاصية المعالجة الذاتية على عينات مأخوذة من طرق مرصوفة مسبقاً للحصول على نتائج واستنتاجات أكثر واقعية ودقة حيث اقتصرت هذه الدراسة على عينات تم تحضيرها مخبرياً.
4. تصميم آلة تحريض كهربي لنقل هذه الدراسة الى الواقع وتجريبها على الطرق في سورية حيث لا تتوفر مثل هذه الآلات في بلدنا.

References:

1. Ajam, H. K. (2019). *Effect of heating energy, steel fibres, bitumen types and ageing on the self-healing phenomena in hot mix asphalt* (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
2. Branthaver, J. F., Petersen, J. C., Robertson, R. E., Duvall, J. J., Kim, S. S., Harnsberger, P. M., ... & Scharbron, J. F. (1993). *Binder characterization and evaluation. Volume 2: Chemistry* (No. SHRP-A-368).
3. Jendia, S., Hassan, N., Ramlawi, K., & Abu-Aisha, H. (2016). *Study of the mechanical and physical properties of self-healing asphalt*. *Journal of Engineering Research & Technology*, 3(4).
4. GARCÍA, A., NORAMBUENA-CONTRERAS, J., BUENO, M. & PARTL, M. N. 2015. *Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26,425-433.
5. <https://dor.gov.np/uploads/publication/publication_1558676982.pdf>. (accessed:2022-7-20).